

การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการสกดไอออนทองแดงโดยใช้  
เยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพุงแบบแผ่น



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...42393  
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ศ. 2545

.b.....  
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเอกสารไปใช้

A Preliminary Study for the Extraction of Copper Ions by  
Flat-Sheet Supported Liquid Membrane



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
For the Bachelor Degree of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้เยื่อ-  
แผ่นของเหลวบนตัวพวยแบบแผ่น


โดย นางสาวณัฐพร คำรงโรจน์วัฒนา  
นางสาวทิพย์รัตน์ เตียงชวีช

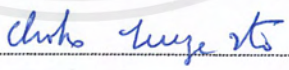
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์


อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.ประกอบ กิจไชยา

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
ประธานกรรมการ  
(ผศ. ดร.ประกอบ กิจไชยา)

  
กรรมการ  
(Dr. Choko Teraza Ito)

  
กรรมการ  
(อาจารย์รันทดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการสกัด ไอออนทองแดง โดยใช้เยื่อแผ่นของ- เหลวบนตัวพุงแบบแผ่น
โดย	นางสาวณัฐพร คำรงโรจน์วัฒนา นางสาวทิพย์รัตน์ เตียงธวัช
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.ประกอบ กิจไชยา
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการสกัดพร้อมกับการดึงกลับของไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ออกจากสารละลายป้อนเข้าสู่สารละลายสตริป โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพุงแบบแผ่น รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด โดยการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบในส่วนของ การควบคุมค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ใช้สารละลายคอปเปอร์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน เป็นสารละลายป้อน ใช้สารละลาย D2EHPA เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในน้ำมันก๊าด เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 0 และ 0.5 เป็นสารละลายสตริป

จากการศึกษาพบว่า การควบคุมค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายป้อน และเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกลงในสารละลายสตริป รวมถึงการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น โดยร้อยละของการสกัดไอออนทองแดงของการทดลองที่ไม่ได้เพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ สำหรับสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน มีค่าเท่ากับ 47 26 และ 17 ตามลำดับ โดยเมื่อดำเนินการทดลองแบบอนุกรม จะได้ร้อยละของการสกัดเพิ่มขึ้นเป็น 73 72 และ 43 ตามลำดับ และถ้าดำเนินการทดลองแบบอนุกรม ร่วมกับการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียส จะได้ร้อยละของการสกัดสูงถึง 92 80 และ 63 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title            A Preliminary Study for the Extraction of Copper Ions by Flat-Sheet Supported Liquid Membrane

By                        Miss Nattaporn Dumrongrojwattana  
Miss Tipparat Tiangtawat

Advisor                Assist. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

Report for             Bachelor Degree of Chemical Engineering  
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This research is the possibility study of simultaneous extracting and stripping copper ions from feed solutions into strip solutions by using a flat-sheet supported liquid membrane system, including the increase of the extraction's efficiency by adding system's driving force; by virtue of pH control of the aqueous solutions and series experiment. The experimental conditions were the initial copper ion concentration in the feed solution at 500, 1,000 and 2,500 ppm, D2EHPA 0.5 mol/l in kerosene as organic phase and sulfuric acid at pH 0 and 0.5 as strip solution.

It was found that the pH of both solutions controlled the pH by adding sodium hydroxide solution in the feed solution and sulfuric acid solution in the strip solution including using the series experiment enhance the extraction efficiency. The percentage of the copper ions extraction without system's driving force in feed solutions of copper ion at 500, 1,000 and 2,500 ppm concentrate were 47, 26 and 17, respectively. After running the series experiment, the percentage of the copper ions extractions were increased to 73, 72 and 43, respectively. Further, 92, 80 and 63 percent extraction of copper ion from those feed solutions could be reached by using the series experiment coupled with the pH control.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุน รวมถึงการให้ข้อมูล และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์จากบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้จัดทำใคร่ขอแสดงความขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

ผศ. ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ให้คำแนะนำปรึกษาในทุกด้าน ตลอดจนแนวทางแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง และให้กำลังใจ ตลอดระยะเวลา ในการทำโครงการนี้จนสำเร็จ

อาจารย์นภกร รัชมพิธิธ ผู้แนะนำและให้ความรู้ในเรื่องเยื่อแผ่นสังเคราะห์ และวิธีการ ทดลอง รวมถึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่าง ๆ

อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวานิชย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี และคุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่เทคนิคภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยดูแลการทำกรทดลอง การจัดทำ และซ่อมแซมอุปกรณ์ใน การทดลอง และแนะนำการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ spectrophotometer

ผศ. สาทิป รัตนภาสกร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอาหาร รวมถึงเจ้าหน้าที่เทคนิคภาควิชา วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด- กระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำวิธีใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ

คุณไวยวิทย์ อัครเรศวิมาน, คุณสมนึก ศรีเสริมสิน, และคุณเอกสิทธิ์ เรืองรัตน์ ที่ให้ คำแนะนำในการทดลอง รวมถึงเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลอง

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้การสนับสนุนและ กำลังใจตลอดเวลา 4 ปีที่ผ่านมา รวมถึงพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ อีกหลายคนที่มีได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ ซึ่ง คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ซึ่งคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 วัตถุประสงค์.....	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี.....</b>	<b>7</b>
2.1 นิยามของเยื่อแผ่น.....	7
2.2 ฟลักซ์และแรงขับเคลื่อน (driving force) ในกระบวนการแยก ค้ำยเยื่อแผ่น.....	8
2.3 กระบวนการเยื่อแผ่นของเหลว.....	10
2.4 เยื่อแผ่นของเหลวที่อาศัยตัวพุง (supported liquid membranes).....	12
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลองและขั้นตอนการทดลอง.....</b>	<b>23</b>
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.2 การดำเนินการทดลอง.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
4.1 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1.....	34
4.2 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2.....	37
4.3 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.3.....	41
4.4 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4.....	44
4.5 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5.....	47
4.6 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	66
ภาคผนวก ค.....	68
ภาคผนวก ง.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	93

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบ โมดูลเชื่อมต่อแบบต่าง ๆ .....	19
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของสารละลายในหลอดทดลองที่มีองค์ประกอบต่างกัน.....	42
ตารางที่ 4.2 ลักษณะของสารละลายที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อทำการเติม สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	43
ตารางที่ 4.3 ลักษณะของสารละลายที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อทำการเติม สารละลาย กรดซัลฟิวริก.....	43
ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ ไอออนทองแดงที่ความยาวคลื่น ต่าง ๆ .....	62
ตารางที่ ก.2 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ ไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	64
ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่อ่านได้จากเครื่องวัดค่าพีเอช.....	66
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน.....	68
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน.....	69
ตารางที่ ค.3 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน.....	69
ตารางที่ ค.4 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน.....	73
ตารางที่ ค.5 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน.....	73
ตารางที่ ค.6 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน.....	74
ตารางที่ ค.7 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความ เข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค.8 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน.....	78
ตารางที่ ค.9 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน.....	79
ตารางที่ ค.10 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5 เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน.....	82
ตารางที่ ค.11 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5 เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสทั้งสองฝั่ง.....	82
ตารางที่ ค.12 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน.....	85
ตารางที่ ค.13 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน.....	86
ตารางที่ ค.14 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน.....	87

## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 กระบวนการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วิธีตกตะกอน.....	3
รูปที่ 1.2 ความแตกต่างระหว่าง ELM กับ ELM ที่ใช้โมดูลแบบเส้นใยกลวง.....	5
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทมวลที่ต้องอาศัยตัวพาจำเพาะ .....	8
รูปที่ 2.2 กลไกการแยกโลหะ โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวแบบ counter transport.....	10
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการแยกสาร โดยใช้ ELM.....	11
รูปที่ 2.4 การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นของเหลว.....	13
รูปที่ 2.5 รูปแบบและทิศทางการไหลในโมดูลแบบแผ่นและกรอบ.....	16
รูปที่ 2.6 ลักษณะโมดูลแบบท่อซึ่งประกอบด้วยท่อเยื่อแผ่นเล็ก ๆ รวมกันใน ตัวบรรจุ.....	17
รูปที่ 2.7 ก) ภาพขยายของการไหลผ่านเส้นใยกลวง ข) การป้อนสารในเส้นใย ค) การป้อนสารนอกเส้นใย.....	18
รูปที่ 2.8 ลักษณะโมดูลแบบท่อม้วน.....	18
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....	35
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....	35
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....	36
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....	36

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[ \frac{2 [\text{Cu}^{2+}]_I - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right]$ และ $t$ ที่ความ เข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> )...37	
รูปที่ 4.6	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....38	
รูปที่ 4.7	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....38	
รูปที่ 4.8	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....39	
รูปที่ 4.9	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....39	
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[ \frac{2 [\text{Cu}^{2+}]_I - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right]$ และ $t$ ที่ความ เข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> )...40	
รูปที่ 4.11	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม.....45	
รูปที่ 4.12	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม.....45	

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม.....	46
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม.....	46
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[ \frac{2 [\text{Cu}^{2+}]_I - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right]$ และ $t$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ).....	47
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคียสเป็นระยะ ตลอดการทดลอง.....	48
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคียสเป็นระยะ ตลอดการทดลอง.....	48
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคียส เป็นระยะ ตลอดการทดลอง.....	50
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคียส เป็นระยะ ตลอดการทดลอง.....	50

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวส เป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม.....	52
รูปที่ 4.21	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวส เป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม.....	52
รูปที่ 4.22	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอช ของสารละลายเอควิวสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนิน การแบบอนุกรม.....	53
รูปที่ 4.23	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$ เซนติเมตร <sup>-1</sup> ) เมื่อปรับค่าพีเอช ของสารละลายเอควิวสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนิน การแบบอนุกรม.....	53
รูปที่ ก.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น และค่าการดูดกลืนแสง.....	63
รูปที่ ก.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดง และค่าการ ดูดกลืนแสงเพิ่มเติมเส้นแนวโน้มเพื่อหาสมการเส้นตรงที่จะนำไปใช้งาน.....	64
รูปที่ ก.3	กราฟสอบเทียบมาตรฐานของไอออนทองแดง และสมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของไอออนทองแดง.....	65
รูปที่ ข.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่อ่านได้ และเวลา.....	67
รูปที่ ค.1	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงใน สารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้น เริ่มต้น ต่าง ๆ .....	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

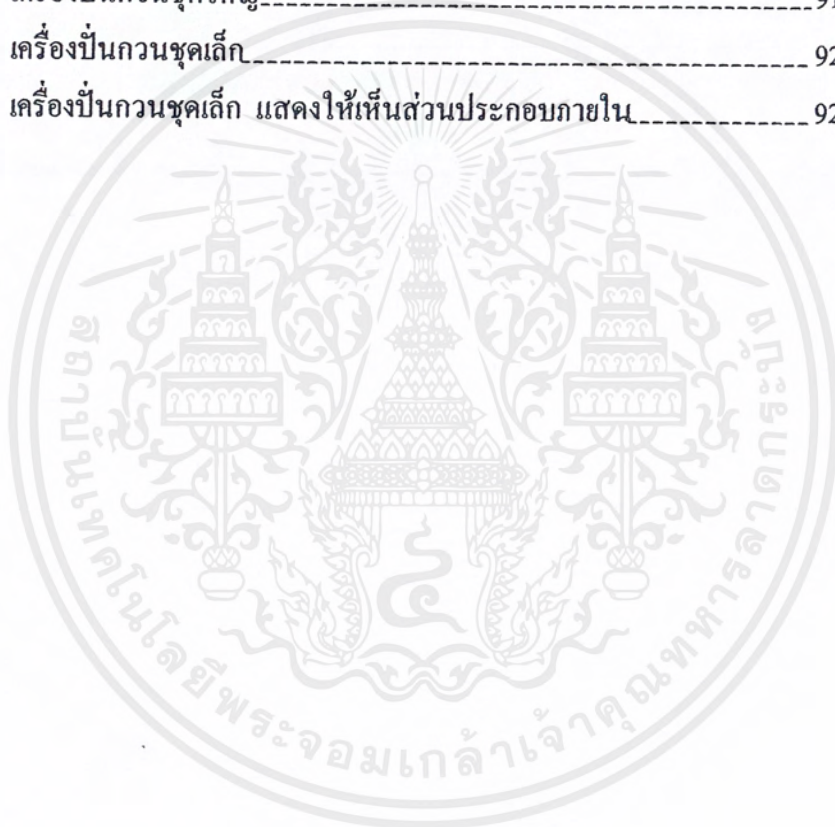
	หน้า
รูปที่ ค.2 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	71
รูปที่ ค.3 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	71
รูปที่ ค.4 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	72
รูปที่ ค.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของ ไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	72
รูปที่ ค.6 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	75
รูปที่ ค.7 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	75
รูปที่ ค.8 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	76
รูปที่ ค.9 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	76
รูปที่ ค.10 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของ ไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	77
รูปที่ ค.11 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	79

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ค.12 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	80
รูปที่ ค.13 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	80
รูปที่ ค.14 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	81
รูปที่ ค.15 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	81
รูปที่ ค.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5.....	83
รูปที่ ค.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5.....	84
รูปที่ ค.18 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5.....	84
รูปที่ ค.19 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5.....	85
รูปที่ ค.20 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	88
รูปที่ ค.21 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	89
รูปที่ ค.22 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ.....	89

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ค.23 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตรีป สำหรับการทดลองใน หัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ -----	90
รูปที่ ง.1 เครื่องปั่นกวนชุดใหญ่ -----	91
รูปที่ ง.2 เครื่องปั่นกวนชุดเล็ก -----	92
รูปที่ ง.3 เครื่องปั่นกวนชุดเล็ก แสดงให้เห็นส่วนประกอบภายใน -----	92



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### สัญลักษณ์

$A_m$	-	พื้นที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่น, ตารางเมตร
$d_p$	-	ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดของเยื่อแผ่น, เมตร
$D$	-	สัมประสิทธิ์การแพร่, ตารางเมตรต่อวินาที
$J_{Cu^{2+}}$	-	อัตราการแพร่, โมลต่อวินาที
$k_C$	-	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, เมตรต่อวินาที
$K$	-	ค่าคงที่สมดุล
$n$	-	จำนวน โมลของอนุภาคเชิงซ้อน, โมล
$N_{Cu^{2+}}$	-	ฟลักซ์เชิงโมล, โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที
$r$	-	รัศมีของอนุภาคเชิงซ้อน, เมตร
$R$	-	ค่าคงที่ของก๊าซ, จูลต่อโมลต่อเคลวิน
$S$	-	ความหนาของชั้นเยื่อแผ่น, เมตร
$t$	-	เวลา, วินาที
$T$	-	อุณหภูมิ, เคลวิน
$V$	-	ปริมาตรของสารละลาย, ลูกบาศก์เมตร
$[H^+]$	-	ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในวัฏภาคเอควิวส, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
$[HX]$	-	ความเข้มข้นของตัวพาในวัฏภาคสารอินทรีย์ของเยื่อแผ่น, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
$[Cu^{2+}]$	-	ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคเอควิวส, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
$[Cu^{2+}]_0$	-	ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
$[Cu^{2+}]_I$	-	ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่เวลาใด ๆ, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
$[Cu^{2+}]_{III}$	-	ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตรีปที่เวลาใด ๆ, โมลต่อลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- [CuX<sub>2</sub>] - ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนในวิทยาศาสตร์อินทรีย์ของเยื่อแผ่น, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
- $\Delta P$  - wetting pressure, นิวตันต่อตารางเมตร
- $\Delta pH$  - ความแตกต่างระหว่างค่าพีเอชของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป

## อักษรกรีกโรมัน

- $\varphi$  - marginal angle
- $\eta$  - ความหนืดของเยื่อแผ่นของเหลว, ปาสคาลวินาที
- $\sigma$  - แรงตึงผิวระหว่างวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์, นิวตันต่อเมตร

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตโลหะนับเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนา อย่างไรก็ตาม สำหรับในกระบวนการผลิตก็ยังมีอุปสรรคปัญหาต่าง ๆ อาทิเช่น ปริมาณวัตถุดิบที่ลดลงเนื่องจากทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ตลอดจนปัญหามลภาวะจากกระบวนการผลิต เป็นต้น ทั้งนี้ปัญหาดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการวิเคราะห์กระบวนการผลิต เพื่อลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด เปลี่ยนของเสียให้เป็นผลผลิต ประหยัดการใช้ทรัพยากร เพิ่มผลผลิตและคุณภาพผลิตภัณฑ์ รวมทั้งลดค่าใช้จ่าย ความเสี่ยงและอันตรายในกระบวนการผลิต ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาค้นคว้าหากระบวนการผลิตใหม่หรือพัฒนากระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีโลหะหรือสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการปนเปื้อนไปกับน้ำทิ้งน้อยที่สุด และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ไม่สูงเกินไป

ปริญญานิพนธ์นี้ ได้นำตัวอย่างของกระบวนการสกัดไอออนทองแดง ด้วยเยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพองแบบแผ่น มาเป็นกรณีศึกษา โดยกระบวนการดังกล่าว สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหนักที่มีการใช้ทองแดงเป็นวัตถุดิบได้ทั้งในส่วนของกระบวนการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่ และในส่วนของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

### 1.1 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาความเป็นไปได้ของการสกัดไอออนทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพองแบบแผ่น ซึ่งใช้กรดได-2เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (D2EHPA) เป็นสารสกัด
- 2) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงที่มีต่อการสกัด
- 3) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดไอออนทองแดง ได้โดยการควบคุมค่าพีเอชของสารละลายเอควิวสให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม รวมถึงการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบโดยการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม

- 4) ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับระบบจริงสำหรับกระบวนการอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนทองแดง เพื่อคำนวณร้อยละของการสกัด และศึกษาความเป็นไปได้ของการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพวยแบบแผ่น
- 2) ศึกษาแนวโน้มของร้อยละของการสกัดไอออนทองแดง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร โดยทำการทดลองในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนระหว่าง 500-2,500 ส่วนในล้านส่วน
- 3) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายเอเคียสสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมค่าพีเอชของสารละลายเอเคียสให้ได้ร้อยละของการสกัดสูงขึ้น
- 4) ศึกษาการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด โดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคียสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง และการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม

## 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) การศึกษาข้อมูลและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสกัด โลหะด้วยวิธีต่าง ๆ
- 2) สั่งซื้อ และจัดหาอุปกรณ์ รวมถึงสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง
- 3) การทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนทำการทดลองจริง
- 4) การดำเนินการทดลอง และเก็บข้อมูล
- 5) การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 6) การสรุปและการเสนอแนะผลการวิจัย

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

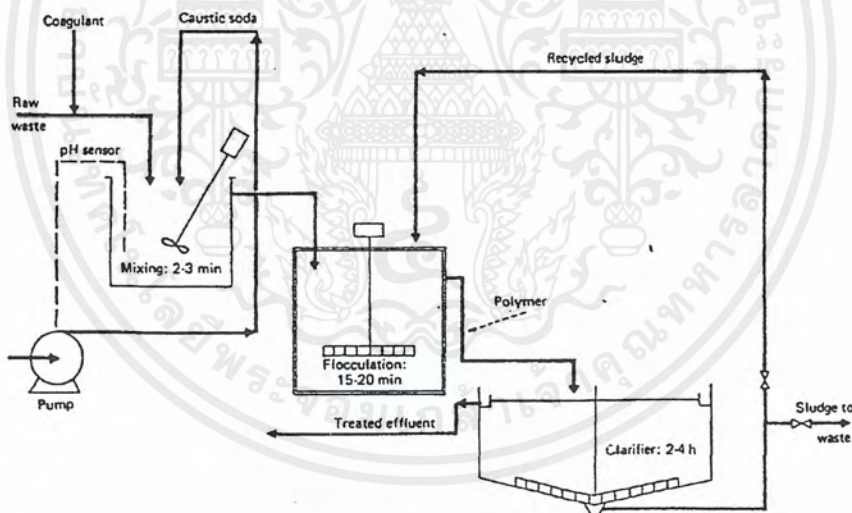
- 1) ทำให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพวยแบบแผ่น เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการแยกทองแดงให้ดีขึ้นต่อไป
- 2) ทำให้ทราบแนวทางที่เหมาะสมในการทำให้การแยกมีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวบนตัวพวยแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายทองแดง เช่น ลดการสูญเสียสารตั้งต้น โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นแยกโลหะทองแดงออกจากของผสมในส่วนเหลือทิ้ง เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

## 1.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

Lanouette (1977) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ โดยใช้วิธีตกตะกอนโลหะ โดยการเติมสารที่ทำให้ตกตะกอนชนิดต่าง ๆ เช่น ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ หรือสารที่ทำให้เกิดสารเชิงซ้อน เช่น แอมโมเนีย และควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะกับการตกตะกอนโลหะแต่ละชนิด แต่ยังมีปัญหาในการกำจัดตะกอนสลัดจ์ (sludge) ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการนำโลหะออกจากสลัดจ์เพื่อนำไปใช้ใหม่ยังมีต้นทุนสูงอยู่มาก กระบวนการดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กระบวนการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วิธีตกตะกอน [Lanouette,1977]

Loiacono, Drioli และ Molinari (1986) ได้ศึกษาการแยกไอออนของโลหะ โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวที่มีตัวพอง (supported liquid membranes; SLM) แบบแผ่นและแบบเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด กรดได-2เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (D2EHPA) และ LIX64N เป็นตัวพา ในการแยกไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) กับไอออนสังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ออกจากกัน และศึกษาถึงผลของค่าพีเอชของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของตัวพาและชนิดของสารเจือจางตัวพา (diluent) คือ น้ำมันก๊าดและเอกซานเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออโรโซลิน จากการทดลองพบว่า D2EHPA จะสกัดไอออนสังกะสีได้ดี และ LIX64N สามารถสกัดไอออนทองแดงได้ดีมาก โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 3 ตัวพามีความเข้มข้น 5 % โดยปริมาตร และใช้ออโรโซลินเป็นสารเจือจางตัวพา จะให้ฟลักซ์สูงกว่าใช้น้ำมันก๊าด ส่วนความเข้มข้นของไอออนของโลหะในสารละลายป้อนจะมีผลต่อฟลักซ์ คือเมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นมาก ฟลักซ์ก็จะมากขึ้น และความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อฟลักซ์เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวของเยื่อแผ่นมีค่ามากกว่าค่าความจุที่มากที่สุดของตัวพา และยังพบว่า SLM ที่ใช้มีความคงตัว (stability) ดี และสามารถทำการฝัง (impregnation) ด้วยสารละลายตัวพาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายอีกด้วย

Takeuchi, Takahashi และ Goto (1987) ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความคงตัวของ SLM ได้แก่ ชนิดของตัวพุง ตัวทำละลายอินทรีย์ ขนาดของรูพรุน และความแตกต่างของความดันไฮดรอลิก โดยพิจารณาผลจากการรั่วของน้ำจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง จากการทดลองพบว่า ตัวพุงชนิดต่าง ๆ มีความคงตัวตามลำดับดังนี้

พอลิเตตระฟลูออโรเอทธีลีน > พอลิคาร์บอเนต > พอลิโพรพิลีน

ส่วนตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความคงตัวดีควรมีแรงตึงระหว่างวิภาค (interfacial tension) สูง มีแรงตึงผิว (surface tension) ต่ำกว่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวพุง ซึ่งไฮโดรคาร์บอนชนิดอะลิฟาติกที่มีจุดเดือดสูง จะมีสมบัติเหมาะสม โดยสารต่าง ๆ จะมีความคงตัวตามลำดับดังนี้

อะลิฟาติก > ไอโซเมอร์ของอะลิฟาติก, แนพทีนส์ (naphthenes) >> อะโรมาติกส์

นอกจากนี้ ยังพบว่า เมื่อรูพรุนมีขนาดเล็กก็จะมีค่าคงตัวสูงขึ้น และถ้าความแตกต่างของความดันไฮดรอลิกมาก ก็จะทำให้ความคงตัวของ SLM ลดลง

O'Hara และ Bohrer (1989) ได้ศึกษาถึงการถ่ายเทมวลของทองแดง เพื่อนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (printed wiring board) โดยใช้ LIX54-100 ในน้ำมันก๊าด เป็นวิภาคเยื่อแผ่นของเหลว โดยมีตัวพุงเป็นแผ่นพอลิโพรพิลีน และศึกษาผลของอัตราการกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเอเคเวียสทั้งด้านสารละลายป้อนและสารละลายสตริป และความหนาของตัวพุง จากการทดลองพบว่า อัตราการกวนสารละลายเอเคเวียส ไม่มีผลต่อฟลักซ์มากนัก และพบว่าอัตราการกวนที่ให้ฟลักซ์สูงสุดคือ 120 รอบต่อนาที ส่วนความเข้มข้นของสารละลายเอเคเวียสทั้งสองด้านจะมีผลต่อฟลักซ์ เมื่อความเข้มข้นมีค่าน้อย ๆ คือความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงในด้านสารละลายป้อนประมาณ 0.1 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกในด้านสตริปประมาณ 0.4 โมลต่อลิตร ผลของความหนาของตัวพุงที่มีต่อฟลักซ์ คือ เมื่อตัวพุงมีความหนามากขึ้น ฟลักซ์จะยิ่งลดลง และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของตัว



และการใช้ ELM ในโมดูลแบบเส้นใยกลางยังเป็นการป้องกันการผสมกันของวัฏภาคสารละลาย  
ป้อนกับวัฏภาคของสารละลายสตรีปอีกด้วย และการใช้โมดูลแบบเส้นใยกลางยังทำให้ไม่ต้องมี  
ขั้นตอนของการแตกอิมัลชัน (demulsification) ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนนี้ไปได้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

กระบวนการเยื่อแผ่น (membrane processes) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นเพื่อแยกสาร เพื่อเพิ่มความเข้มข้น หรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้น สำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม กระบวนการเยื่อแผ่นสังเคราะห์ถูกค้นพบมานานกว่า 30 ปีแล้ว และมีการพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ จนปัจจุบันนี้มีการใช้กระบวนการเยื่อแผ่นหลายกระบวนการในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยอาจนำไปใช้แทนกระบวนการแยกอื่น ๆ หรือใช้เสริมในกระบวนการเดิม [รศ.ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543] ตัวอย่างของเทคนิคการแยกด้วยเยื่อแผ่น ได้แก่ รีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis) ในการทำน้ำจืดจากน้ำทะเล การแยกสารด้วยวิธีอิเล็กโตรไดอะไลซิส (electrodialysis) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การฟอกเลือดด้วยไตเทียม และการผลิตอาหารและยาด้วยวิธีอัลตราฟิวเตรชัน (ultrafiltration) เป็นต้น ข้อดีที่สำคัญประการหนึ่งของการแยกด้วยเยื่อแผ่น คือ สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิห้องได้ จึงใช้สารละลายที่ไวต่ออุณหภูมิได้ โดยไม่ทำให้องค์ประกอบหรือโครงสร้างทางเคมีเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตอาหารและยา [นภกร รัมพิพิธ, 2542]

#### 2.1 นิยามของเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่น ทำหน้าที่เป็นตัวกั้น (barrier) ซึ่งแบ่งสารละลายสองภูมิภาคออกจากกัน และจำกัดการถ่ายเทสารเคมีต่าง ๆ ให้มีความจำเพาะมาก ๆ โดยเยื่อแผ่นอาจเป็น homogeneous หรือ heterogeneous มีโครงสร้างแบบสมมาตรหรืออสมมาตร มีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลว อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ความหนาอาจแปรผันตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 100 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 1 เซนติเมตร ความต้านทานไฟฟ้าอาจแปรผันตั้งแต่หลายเมกกะโอห์ม จนถึงน้อยกว่า 1 โอห์ม การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นอาจเกิดขึ้นโดยการพา (convection) หรือการแพร่ (diffusion) ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้า หรือเกิดจากผลต่างของความเข้มข้น ความดัน และอุณหภูมิ

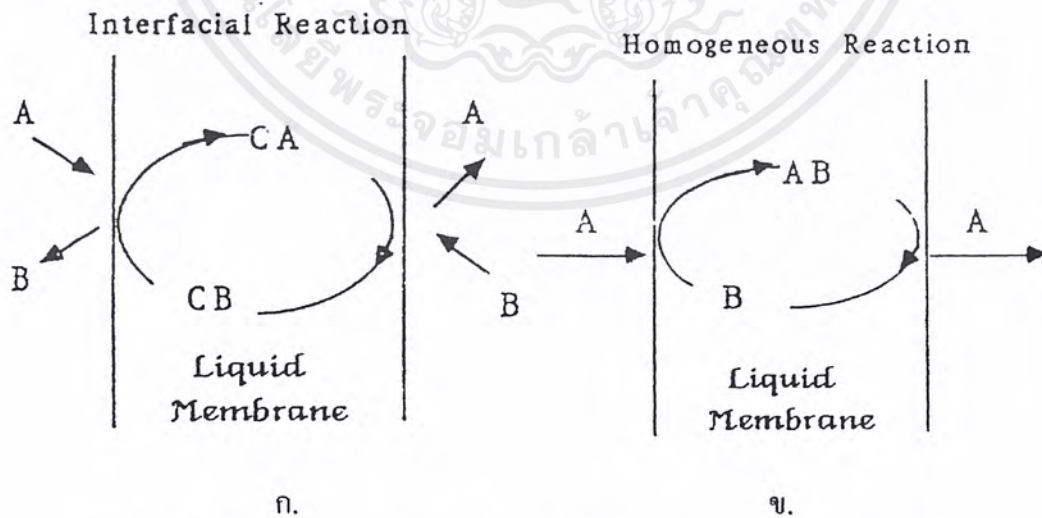
## 2.2 พลั๊กซ์ และ แรงขับเคลื่อน (driving forces) ในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น

การแยกในกระบวนการของเยื่อแผ่นเกิดขึ้นจากความแตกต่างของอัตราการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของสปีชีส์ต่าง ๆ การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นนี้ถูกกำหนดด้วยแรงขับเคลื่อนที่กระทำต่อสปีชีส์นั้น ๆ รวมทั้งการเคลื่อนที่และความเข้มข้นของสปีชีส์ภายในเยื่อแผ่น โดยพื้นฐานแล้ว การเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดด้วยขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายและ โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง ในขณะที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเยื่อแผ่นถูกกำหนดด้วยความเข้ากันได้ทางเคมีของตัวถูกละลายกับวัสดุตัวกลาง ขนาดของตัวถูกละลาย และ โครงสร้างของเยื่อแผ่น สำหรับแรงขับเคลื่อนที่เท่ากันที่ให้แก่ระบบการเคลื่อนที่ และความเข้มข้นของตัวถูกละลายนี้จะเป็นตัวกำหนดว่าพลั๊กซ์จะมีค่ามากหรือน้อย

### 2.2.1 การถ่ายมวลในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น

มี 3 รูปแบบพื้นฐาน โดยมีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีขององค์ประกอบต่าง ๆ เป็นแรงขับเคลื่อน ดังนี้

- 1) passive transport เยื่อแผ่นจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นทางกายภาพ โดยยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการเท่านั้นเคลื่อนที่ผ่านไปได้
- 2) การถ่ายเทมวลที่ต้องอาศัยตัวพาจำเพาะ (specific carrier) ถือเป็นรูปแบบพิเศษของ passive transport



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทมวลที่ต้องอาศัยตัวพาจำเพาะ [Noble, และ Koval, 1989]

ก. coupled transport ข. facilitated transport

### 2.1) coupled transport

เป็นปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนชนิดผันกลับได้ โดยจะใช้ตัวพาชนิดที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับสารที่ต้องการได้ โดยปฏิกิริยามักจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของของเหลว เนื่องจากไอออนไม่สามารถละลายได้ในวัฏภาคสารอินทรีย์

### 2.2) facilitated transport

เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ระหว่างตัวพาและสารที่ต้องการ โดยไม่เกิดการจับคู่ขององค์ประกอบอื่น ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดทั้งวัฏภาคของเยื่อแผ่นของเหลว

3) active transport พบในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเท่านั้น โดยองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวพา

### 2.2.2 แรงขับเคลื่อนที่ใช้ในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น

โดยทั่วไปมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

- 1) ความดัน ได้แก่ กระบวนการ microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), reverse osmosis (RO), pervaporation (PV) และ gas separation (GS)
- 2) กระแสไฟฟ้า ได้แก่ electrodialysis (ED)
- 3) ความเข้มข้น ได้แก่ liquid membrane (LM) โดยจะอยู่ในรูปของเยื่อแผ่นของเหลว

### 2.2.3 ความสามารถในการซึมผ่านของสปีชีส์ต่าง ๆ ผ่านเยื่อแผ่น

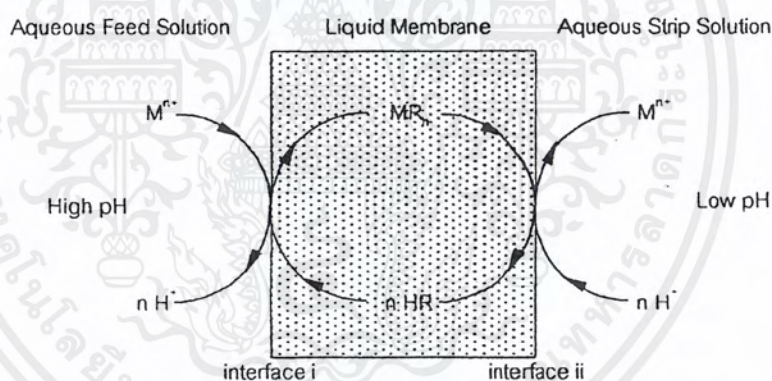
จะขึ้นกับกลไกการถ่ายเทของสปีชีส์นั้น ๆ เช่น สำหรับ homogeneous polymer membrane การถ่ายเทของสปีชีส์ต่าง ๆ จะถูกกำหนดด้วยการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นหรือความดัน ความสามารถในการซึมผ่านจึงขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และความเข้มข้นของสปีชีส์ต่าง ๆ ในเยื่อแผ่น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลต่ำมาก บางครั้งจึงเรียกว่า diffusion controlled membrane ในขณะที่สำหรับ porous membrane การถ่ายเทเกิดขึ้นโดยมีความแตกต่างของความดันเนื่องจากการไหลด้วยความหนืดเป็นแรงขับเคลื่อน ความสามารถในการซึมผ่านโดยทั่วไปจะสูงกว่าในกรณีแรกมาก ส่วนการแยกด้วยไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับ electrically charged membrane หรือ ion-exchange membrane โดยสปีชีส์ที่มีประจุเหมือนกับเยื่อแผ่นจะถูกกั้นไม่ให้แพร่ผ่านเยื่อแผ่นไปได้ อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น ฟลักซ์จะแปรผกผันกับความหนาของเยื่อแผ่น โดยความสำคัญของกระบวนการแยกคือ การทำให้สารที่ต้องการมีฟลักซ์สูงที่สุด ดังนั้นจึงควรเลือกเยื่อแผ่นที่บางที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

## 2.3 กระบวนการเยื่อแผ่นของเหลว (liquid membranes, LM)

กระบวนการเยื่อแผ่นของเหลวถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1968 โดย Li ซึ่งนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการสกัดด้วยตัวทำละลายที่กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น เช่น ในอุตสาหกรรมการแยกไฮโดรคาร์บอน การบำบัดน้ำเสีย การนำแร่กลับมาใช้ใหม่ (mineral recovery) และงานในด้านชีวเคมี รวมถึงการผลิตยาปฏิชีวนะ เป็นต้น

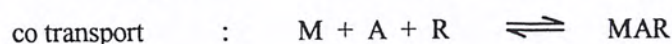
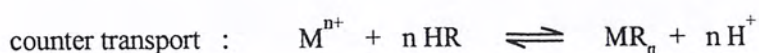
### 2.3.1 ลักษณะของกระบวนการเยื่อแผ่นของเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นของเหลวเป็นกระบวนการแยกสารที่ขั้นตอนของการสกัด (extraction step) และขั้นตอนของการสตริบ (stripping step) เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน โดยที่เยื่อแผ่นของเหลวทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งจะแยกวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายสตริบออกจากกัน และเลือกผ่านเฉพาะตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดเท่านั้น



รูปที่ 2.2 กลไกการแยกโลหะโดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวแบบ counter transport

[นภกร รั่มพิพิธ, 2542]



### 2.3.2 รูปแบบของเยื่อแผ่นของเหลว

รูปแบบของเยื่อแผ่นของเหลว สามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

1) mobilized liquid membranes เป็นเยื่อแผ่นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในวัฏภาค

ต่อเนื่อง ซึ่งได้แก่ emulsion liquid membranes (ELM)

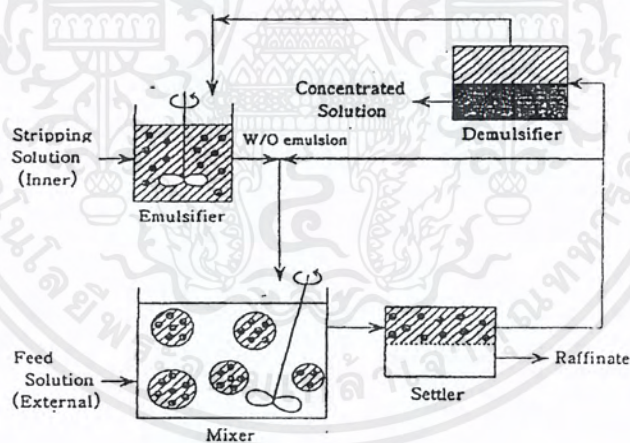
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) immobilized liquid membranes เป็นเยื่อแผ่นที่ถูกยึดติดกับที่ด้วยตัวพอง (support) บางครั้งจึงเรียกว่า supported liquid membranes (SLM) ได้แก่ flat-sheet membranes, hollow fiber supported liquid membranes (HFSLM) และ spiral-wound liquid membranes

3) electrostatic pseudo-liquid membranes (ESPLIM)

### 2.3.2.1 emulsion liquid membranes

เทคนิคนี้สามารถเตรียมเยื่อแผ่นให้บางลงได้โดยการเลือกใช้สารลดแรงดึงผิว (surfactant) ที่เหมาะสม การสกัดด้วยเทคนิคนี้มีการดำเนินการที่ย่างยากซับซ้อน เริ่มตั้งแต่การเตรียมอิมัลชันของเยื่อแผ่นของเหลวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic membrane) กับสารละลายสตริปในวัฏภาคเอเคเวียส โดยการปั่นด้วยความเร็วรอบที่สูงมาก (ประมาณ 8,000-12,000 รอบต่อนาที) เพื่อเตรียมอิมัลชันให้มีขนาดเล็กมาก ๆ เนื่องจากพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจะสูงขึ้นเมื่ออิมัลชันมีขนาดเล็กลง ตลอดจนการแตกอิมัลชัน (demulsification) ในกรณีที่ต้องการนำสารที่สกัดได้ในสารละลายสตริปกลับมาใช้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการแยกสารโดยใช้ emulsion liquid membranes [นภกร รัชพิพิธ, 2542]

### 2.3.2.2 electrostatic pseudo-liquid membranes (ESPLIM)

เป็นการรวมเทคนิคของไฟฟ้าสถิตย์เข้ากับหลักการของเยื่อแผ่นของเหลว โดยในกระบวนการนี้ เยื่อแผ่นของเหลวจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และสารละลายเอเคเวียสทั้งสอง (สารละลายป้อนและสารละลายสตริป) จะถูกพ่นเป็นละอองเข้าสู่แต่ละด้านของถังปฏิกรณ์ซึ่งถูกแยกด้วยตัวแบ่ง (divider) ที่ข้างถึงด้านในจะต่อกับสายที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง เพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับสารละลายเอเคเวียส ทำให้เกิดการกระจายตัวเป็นหยดเล็ก ๆ ภายในเยื่อแผ่นของเหลว ปฏิกริยาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดจะเกิดขึ้นที่รอบ ๆ หยอดของสารละลายป้อน จากนั้นสารประกอบของโลหะจะแพร่ไปสู่ด้านของสารละลายสตริปด้วยความแตกต่างของความเข้มข้น และปฏิกิริยาการดึงกลับจะเกิดขึ้นที่รอบ ๆ หยอดของสารละลายสตริป เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบจะมีผลต่อหยดน้ำเท่านั้น ดังนั้น เมื่อหยดน้ำไหลเข้าสู่ตัวแบ่งก็จะเกิดการรวมตัวเป็นหยดใหญ่ขึ้น แล้วตกลงสู่ด้านของมันด้วยแรงดึงดูดของโลก [นภกร รั่มพิพิธ, 2542]

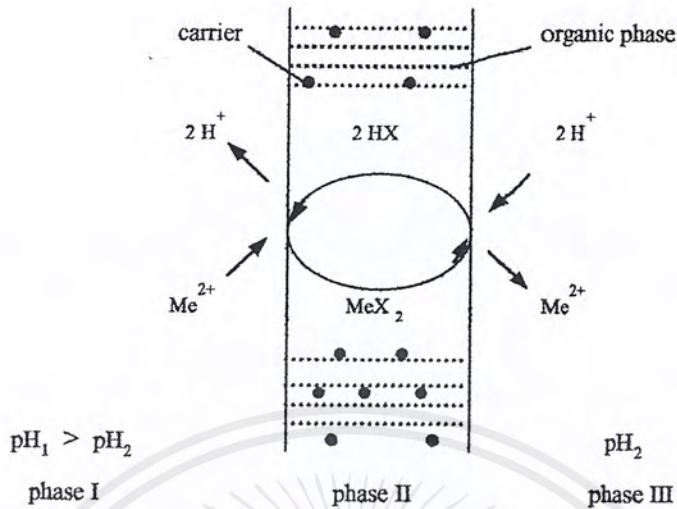
### 2.3.2.3 supported liquid membranes (SLM)

SLM มีลักษณะเป็นเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่มีรูพรุนซึ่งใช้หลักการพื้นฐานเหมือนกับการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดอื่น ๆ แต่ SLM จะดีกว่าตรงที่สามารถแยกองค์ประกอบที่ละลายในสารละลายป้อนออกมาได้ โดยจะใช้กระบวนการแยกและสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายป้อนแทนที่จะเป็นการจับองค์ประกอบที่ต้องการแล้วปล่อยให้สารละลายป้อนผ่านไป อย่างที่ใช้ในกลไกการกรอง ทำให้ SLM มีความเลือกจำเพาะในการสกัดธาตุและสารประกอบออกจากของผสมจากกระบวนการต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันปกติได้ [<http://www.commodore.com>]

## 2.4 เยื่อแผ่นของเหลวที่อาศัยตัวพอง (supported liquid membranes)

### 2.4.1 กลไกการแยกสารในกระบวนการ SLM

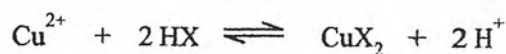
กลไกการแยกสารในกระบวนการ SLM ชนิดที่ต้องอาศัยตัวพองจำเพาะในการถ่ายเทมวล ประกอบด้วยสารละลายเอเควีลซึ่งมีไอออนทั้งหมดในตอนเริ่มต้นที่สามารถซึมผ่านเยื่อแผ่นของเหลวได้ จะถูกเรียกว่า สารละลายป้อน ส่วนสารละลายเอเควีลที่อยู่ด้านตรงข้ามของเยื่อแผ่นซึ่งไม่มีไอออนซึมผ่านในตอนเริ่มต้น จะถูกเรียกว่า สารละลายสตริป โดยหลักการแล้ว การซึมผ่านเยื่อแผ่นของเหลวเป็นกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ขึ้นตอนในการสกัดและการสตริปเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน โดยวัฏภาคเยื่อแผ่นของเหลวนี้จะแยกสารละลายป้อนและสารละลายสตริปออกจากกัน พร้อมกับทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน ตัวพองที่ละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นของเหลวจะเป็นตัวพาไอออนจากด้านสารละลายป้อนเคลื่อนที่โดยการแพร่มายังด้านของสารละลายสตริป โดยมีความแตกต่างของความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนกับตัวพองระหว่างด้านทั้งสองของเยื่อแผ่นเป็นแรงขับเคลื่อน



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นของเหลว [Schulz, 1988]

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงตัวอย่างในการแยกไอออนของโลหะออกจากสารละลายเอควิวส โดยการเคลื่อนที่แบบสวนทางกันกับไอออนของไฮโดรเจน (counter transport) ในภูมิภาค I ไอออนโลหะจะแพร่ผ่านผิวหน้าของเยื่อแผ่นโดยทำปฏิกิริยากับตัวพา แล้วแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของเหลว (ภูมิภาค II) โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้น ส่วนผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่สัมผัสกับภูมิภาค III สารประกอบเชิงซ้อนจะแตกตัวแล้วปล่อยไอออนของโลหะเข้าสู่สารละลายสตรีป ส่วนตัวพาจะรับโปรตรอน (ไอออนของไฮโดรเจน) แล้วแพร่กลับสู่ด้านของสารละลายป้อน จะเห็นว่า กระบวนการทั้งหมดจะประกอบด้วย การแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะกับโปรตรอน โดยมีตัวพาทำหน้าที่เสมือนตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะคงที่ (steady state) ขึ้นตอนการแพร่ทั้งสอง ได้แก่ การแพร่ของสารเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับตัวพาจากด้านสารละลายป้อนมายังด้านสารละลายสตรีป และการแพร่กลับของตัวพา กับโปรตรอน จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน โดยแรงขับเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสองคือ ค่าความเป็นกรด หรือ ค่าพีเอชที่แตกต่างกันของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป

ปฏิกิริยาที่สมดุลของไอออนทองแดง คือ



และค่าคงที่สมดุลเท่ากับ

$$K = \frac{[\text{CuX}_2][\text{H}^+]^2}{[\text{HX}]^2[\text{Cu}^{2+}]} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าคงที่สมดุลนี้จะเหมือนกันสำหรับทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น และสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\log \frac{[\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}}}{[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}}} = 2 \Delta\text{pH} \quad (2.2)$$

การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นของเหลว สามารถอธิบายได้โดยใช้ Fick's law ดังนี้

$$J_{\text{Cu}^{2+}} = \frac{DA_m}{S} ([\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}}) \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้ฟลักซ์เชิงโมล

$$N_{\text{Cu}^{2+}} = \frac{J_{\text{Cu}^{2+}}}{A_m} = \frac{D}{S} ([\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}}) \quad (2.4)$$

แทนค่า  $D/S$  ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $k_c$ ),  $k_c = D/S$

$$N_{\text{Cu}^{2+}} = k_c ([\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}}) \quad (2.5)$$

$$-V \frac{d[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}}}{dt} = k_c ([\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}}) \quad (2.6)$$

$$- \frac{d[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}}}{dt} = \frac{k_c A_m}{V} ([\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}}) \quad (2.7)$$

สมมติให้ทองแดงที่ถูกถ่ายเทโดยตัวพา สามารถข้ามไปยังด้านสารละลายสตรีปได้หมด ไม่มีติดค้างอยู่ในตัวพุงและตัวพา จะได้

$$[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} + [\text{Cu}^{2+}]_{\text{III}} = [\text{Cu}^{2+}]_0 \quad (2.8)$$

แทนค่าใน

$$- \frac{d[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}}}{dt} = \frac{k_c A_m}{V} (2[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_0) \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{(2[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} - [\text{Cu}^{2+}]_0)} \frac{d[\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}}}{dt} = -\frac{k_c A_m}{V} dt \quad (2.10)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้างของสมการ

โดยมีค่าขอบเขต ดังนี้

$$\text{ที่ } t = 0, \quad [\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} = [\text{Cu}^{2+}]_0$$

$$\text{ที่ } t = t, \quad [\text{Cu}^{2+}]_{\text{I}} = [\text{Cu}^{2+}]_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\ln \left[ \frac{2 [\text{Cu}^{2+}]_1 - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right] = -2 \frac{A_m k_C t}{V} \quad (2.11)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $k_C$ ) จะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการปั่นกวนที่ความเร็วรอบค่า ๆ และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการปั่นกวนให้สูงขึ้นจนถึงประมาณ 140 รอบต่อนาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารจะเริ่มคงที่ และไม่ขึ้นกับความเร็วรอบของการปั่นกวน [Ihm, และ Lee, 1988]

ดังนั้นถ้าระบบ 2 ระบบมีความเร็วรอบของการปั่นกวนสูงกว่า 140 รอบต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากัน เวลาที่ใช้ในการสกัดจะขึ้นกับอัตราส่วนพื้นที่ผิวของตัวพุงต่อปริมาตรสารละลายเท่านั้น โดยถ้าเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวของตัวพุงต่อปริมาตรสารละลายให้สูงขึ้น จะทำให้ใช้เวลาในการสกัดน้อยลง

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$D = nRT / 6\pi\eta r \quad (2.12)$$

จากสมการที่ได้กล่าวถึงข้างต้น แสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นของเหลวได้โดย

- 1) ลดความหนืดของเยื่อแผ่น เพื่อลดระยะทางในการแพร่
- 2) เพิ่มความเร็วรอบของการปั่นกวน
- 3) เพิ่มความเข้มข้นของตัวพาในวัฏภาคสารอินทรีย์
- 4) เพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินการ
- 5) ใช้เยื่อแผ่นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ
- 6) สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นต้องมีขนาดโมเลกุลเล็ก

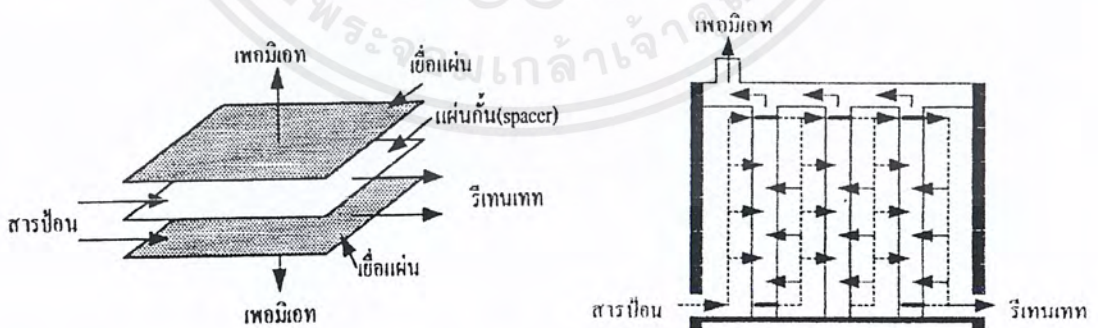
แต่ทั้งนี้ ต้องคำนึงถึงผลที่อาจเกิดในทางตรงข้ามด้วย เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มความเข้มข้นของตัวพาจะเป็นการเพิ่มความหนืดของเยื่อแผ่นของเหลว ซึ่งให้ผลในทางตรงข้าม หรือ การเพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินการจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ในสารละลายเอควิวสด้วย เหล่านี้เป็นต้น [Schulz, 1988]

## 2.4.2 ค้ำพุง (supports)

ค้ำพุง (supports) สำหรับกระบวนการ SLM ที่ผลิตขึ้นอาจมีรูปร่างต่างกัน เช่น เป็นเยื่อแผ่นเรียบ หรือเป็นท่อ ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเยื่อแผ่นให้มีพื้นที่เยื่อแผ่นตามต้องการ ซึ่งเรียกว่า โมดูล (module) ได้มีการออกแบบโมดูลที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ แบบแผ่นและกรอบ แบบท่อ แบบเส้นใยกลาง และแบบท่อม้วน หลักในการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งานคือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นกะทันหัน คือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของโมดูลสูง เป็นต้น

### 2.4.2.1 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module)

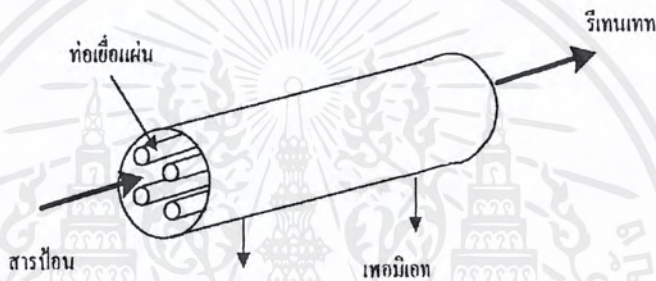
มีลักษณะเป็นเยื่อแผ่นสองแผ่นประกบกันเป็นคู่ มีสารละลายป้อนไหลผ่านระหว่างคู่ของเยื่อแผ่น แต่ละชุด โมดูลจึงประกอบด้วยคู่เยื่อแผ่นวางซ้อนกันหรือเรียงกันเป็นชั้น ๆ ในแนวตั้ง และมีอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของรีเทนเทท (retentate) เพอมิเอท (permeate) และเพื่อให้เป็นระบบที่ปิดสนิท เช่น แผ่นกั้น (spacer) โมดูลแบบนี้มีพื้นที่เยื่อแผ่นต่อปริมาตรอุปกรณ์ประมาณ 100-400 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และบางทีอาจเรียกโมดูลแบบนี้ว่า ช่องแคบ (thin channel) เพราะช่องระหว่างเยื่อแผ่นที่สารป้อนไหลผ่านแคบ (ประมาณ 5 มิลลิเมตร) [รศ.ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543] นอกจากนี้ เพื่อเป็นการลดความหนาของเยื่อแผ่นลง จะใช้แผ่นพอลิเมอร์เพียงแผ่นเดียวซึ่งมีสารละลายเยื่อแผ่นของเหลวเคลือบฝัง (impregnate) อยู่ภายในรูปทรงของพอลิเมอร์นั้น [นภกร รัมพิพิช, 2542]



รูปที่ 2.5 รูปแบบและทิศทางการไหลใน โมดูลแบบแผ่นและกรอบ โดยรูปด้านขวา เป็นการวางเยื่อแผ่นในแนวตั้ง [รศ.ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543]

2.4.2.2 โมดูลแบบท่อ (tubular module)

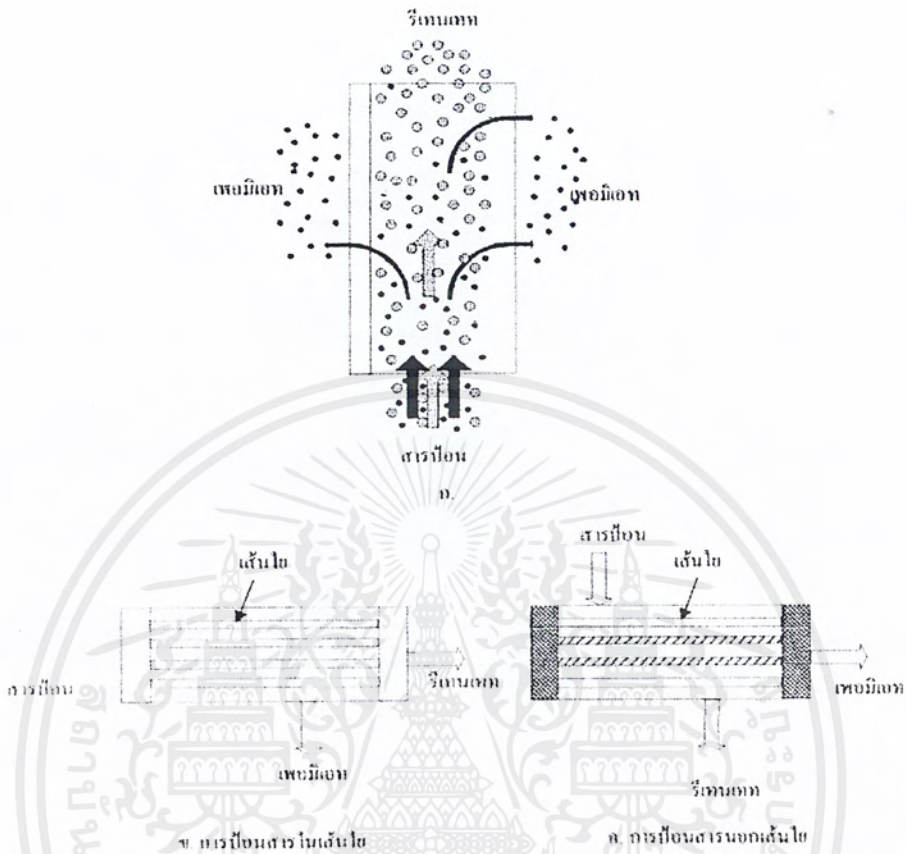
เยื่อแผ่นแบบท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแต่ละท่อเล็ก 5-15 มิลลิเมตร โดยในตัวบรรจุ (housing) จะประกอบด้วยท่อเยื่อแผ่นหลาย ๆ ท่อ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่เยื่อแผ่นที่ต้องการ) สารป้อนจะไหลเข้าด้านในท่อ ส่วนเพอมีเอทที่ไหลผ่านเยื่อแผ่นจะถูกเก็บมารวมกัน นอกจากตัวบรรจุแล้วก็ต้องมีอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ด้วย ชุดโมดูลแบบนี้มีพื้นที่เยื่อแผ่นต่อหน่วยปริมาตรต่ำกว่าแบบแผ่นและกรอบ นอกจากเยื่อแผ่นพอลิเมอร์แล้วยังนิยมเยื่อแผ่นเซรามิกส์แบบท่อหรืออาจเป็นแบบโมโนลิท



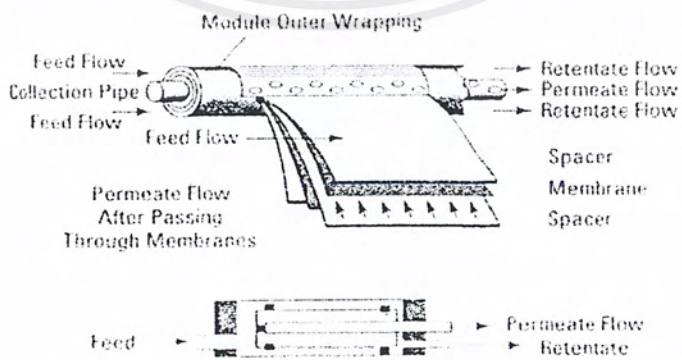
รูปที่ 2.6 ลักษณะ โมดูลแบบท่อซึ่งประกอบด้วยท่อเยื่อแผ่นเล็ก ๆ รวมกันในตัวบรรจุ (housing) สารป้อนเข้าในท่อเล็ก [รศ.ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543]

2.4.2.3 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (hollow-fiber module)

มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในรูกลวงเพียง 0.1-0.5 มิลลิเมตร และความหนาของเส้นใยอยู่ระหว่าง 1-2 มิลลิเมตร จึงไม่มีชั้นรองรับ ปลายของเส้นใยสองด้านฝังอยู่ในพื้นฐานซึ่งอาจเป็นเรซิน โพลียูรีเทน หรือยางซิลิโคน แล้วบรรจุเส้นใยในตัวบรรจุซึ่งอาจจะเป็นอะโครติก หรือเหล็กกล้าไร้สนิม เยื่อแผ่นแบบนี้ส่วนมากมีชั้นผิวอยู่ด้านใน ทำให้ต้องป้อนสารด้านในเส้นใย และเก็บเพอมีเอทจากด้านนอกเส้นใย ถ้าผลิตให้มีชั้นผิวอยู่ด้านนอกต้องป้อนสารละลายด้านนอก และเก็บเพอมีเอทจากด้านในเส้นใย โมดูลแบบนี้มีพื้นที่เยื่อแผ่นต่อหน่วยปริมาตรสูง โดยอาจสูงถึง 30,000 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าใช้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น คือมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5-10 มิลลิเมตร จะเรียกว่า แบบแคปิลลารี (capillary)



รูปที่ 2.7 ก) ภาพขยายของการไหลผ่านเส้นใยกลวง ข) การป้อนสารในเส้นใย (tube side feed) และ ค) การป้อนสารนอกเส้นใย (shell side feed) [รศ.ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543]



รูปที่ 2.8 ลักษณะ โมดูลแบบทอี่ม้วน [Koros, 1995]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2.4 โมดูลแบบท่อม้วน (spiral-wound module)

เป็นการนำเยื่อแผ่นเรียบมาม้วนรอบแกนโดยต้องมีแผ่นกั้น มีลักษณะค่อนข้างซับซ้อน และเป็นโมดูลที่มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตร 300-1,000 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าแบบแผ่นและกรอบ

การพิจารณาเลือกแบบโมดูล มักจะใช้เหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบ แต่ก็ต้องพิจารณาว่าต้องการประยุกต์ใช้กับสารละลายอะไร ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะ ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละโมดูล ซึ่งพอสรุปได้ว่า แบบท่อม้วนเหมาะสมกับสารละลายที่เกิดฟาวลิง (fouling) ได้ง่าย เพราะทำความสะอาดง่ายกว่าแบบอื่น ๆ แบบเส้นใยกลวงมีราคาถูก แต่เกิดฟาวลิงง่ายและทำความสะอาดยาก จึงต้องการการบำบัดสารละลายก่อน [รศ.ดร.รัตนจิระรัตนานนท์, 2543] ส่วนแบบแผ่นและกรอบจะเกิดฟาวลิงได้บ้าง แต่ก็ง่ายต่อการทำความสะอาด นอกจากนี้ยังง่ายต่อการดำเนินการอีกด้วย [Koros, 1995]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบโมดูลเยื่อแผ่นแบบต่างๆ [รศ.ดร.รัตนจิระรัตนานนท์, 2543]

ข้อมูล	แผ่นเรียบ	ท่อม้วน	ท่อ	เส้นใยกลวง
พื้นที่ / ปริมาตร ( $m^2/m^3$ )	100-400	300-1000	150-300	9000-30000
ฟลักซ์ ( $l/m^2.h$ )	10-50	10-50	10-50	0.5-5.0
ความกว้างของช่องสารละลาย (mm)	~5	~1.5	>10-13	0.1-0.5
การเปลี่ยนเยื่อแผ่น	เป็นแผ่น	ทั้งชุด	เป็นท่อ	ทั้งชุด
การเกิด fouling	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
การทำความสะอาด	ปานกลาง	ปานกลาง	ง่าย	ยาก
ราคา	ปานกลาง	ถูก	แพง	ถูกมาก

ตัวพุง (supports) ที่ใช้สำหรับ SLM จะมีโครงสร้างแบบ microporous hydrophobic polymer สำหรับตัวพุงที่อยู่ในภูมิภาคของสารอินทรีย์ ซึ่งจะอยู่ภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นด้วยแรงแคปิลลารี โดยสามารถคำนวณ wetting pressure สำหรับเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำได้จาก

$$\Delta P = \frac{4\sigma \cos \theta}{d_p} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของ porous supports ซึ่งเป็นที่ต้องการ [Schulz, 1988] คือ

- 1) มีความพรุน (porosity) สูง
- 2) รูพรุนมีขนาดเล็ก
- 3) มีความหนาน้อย
- 4) ทนทานต่อสารเคมี
- 5) มีราคาถูก

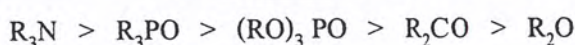
### 2.4.3 สารสกัด (extractants)

ในกระบวนการแยกสาร โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวชนิดที่ต้องอาศัยสารสกัดเป็นตัวพา หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพจะต้องใช้ความเข้มข้นของสารสกัดสูง ๆ แต่แนะนำว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสกัดในวัฏภาคสารอินทรีย์ควรอยู่ระหว่าง 10-30% โดยปริมาตร [Schulz, 1988] เพราะความเข้มข้นที่มากเกินไปจะทำให้วัฏภาคสารอินทรีย์มีความหนืดสูง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลสารลดลง โดยสารสกัดที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการแยก ซึ่งสามารถแบ่งสารสกัดได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ [Bailes, Hanson, และ Bitghes, 1976]

#### 1) solvating extractants

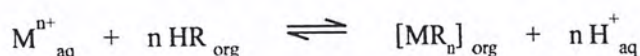
คือ สารสกัดที่เป็นเบสตามนิยามของ Lewis กล่าวคือ เป็นสารที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่สารอื่น โดยจะให้อิเล็กตรอนแก่ไอออนของโลหะที่ต้องการแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแยกออกจากของผสม สารสกัดที่อยู่ในกลุ่มนี้ เช่น ไตรบิวทิลฟอสเฟต (tributyl phosphate, TBP), เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน (methyl isobutyl ketone, MIBK) เป็นต้น

ความเป็นเบส (basicity) ของสารสกัดเรียงลำดับตามโครงสร้าง ได้ดังนี้



#### 2) acidic extractants

คือ สารสกัดที่จะแลกเปลี่ยนไอออนของไฮโดรเจนกับไอออนของโลหะ แล้วเกิดเป็นเกลือของโลหะแยกออกจากของผสม ถ้าแทนโมเลกุลของสารสกัดด้วย HR จะเกิดการสกัดดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการสกัดจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย และค่าคงที่การละลายของสารเชิงซ้อน  $MR_n$  ด้วย สารสกัดที่อยู่ในกลุ่มนี้ เช่น กรดได-2เอทริลเฮกซิลฟอสฟอริก (D2EHPA), กรดแนฟเทนิก (naphthenic acid) เป็นต้น

### 3) chelating extractants

คือ สารสกัดที่เมื่อสร้างพันธะกับโลหะในลักษณะดิแกนด์แล้วจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบวงแหวนซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง โดยสารสกัดประเภทนี้จะมีความเลือกจำเพาะสูงสำหรับโลหะทรานซิชัน โดยเฉพาะทองแดงและนิกเกิล สารสกัดที่อยู่ในกลุ่มนี้ เช่น LIX65N, Kelex100, polyol เป็นต้น

### 4) ionic extractants

คือ สารสกัดที่มีประจุ โดยจะมีไอออนที่มีประจุตรงข้ามเคลื่อนที่ไปด้วย และจะแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะที่เหมาะสมในวัฏภาคเอเคเวียส สารสกัดที่อยู่ในกลุ่มนี้ เช่น เอมีน(amine), กรดซัลโฟนิค (sulfonic acid) เป็นต้น

#### 2.4.4 สารเจือจางตัวพา (diluent or carrier solvent)

เป็นตัวกลางที่ใช้ในการลดความหนืดของวัฏภาคสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นวัฏภาคที่สัมผัสกับวัฏภาคเอเคเวียสทั้งสอง (สารละลายป้อนและสารละลายสตริป) โดยสารสำหรับเจือจางตัวพาควรมีสมบัติ ดังนี้

- 1) สามารถรักษาสภาพของสารละลายได้ ทั้งในสภาพที่ตัวพาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนและไม่เกิดเป็นสารเชิงซ้อน
- 2) ความสามารถในการละลายต่ำในวัฏภาคเอเคเวียส
- 3) จุดวาบไฟ (flash point) สูง และมีอัตราการระเหยต่ำ
- 4) มีความทนทานต่อสารเคมีสูง (มีเสถียรภาพดี) ในช่วงสภาวะที่ใช้งาน

จากการวิจัยพบว่า โครงสร้างของสารเจือจางตัวพาที่เลือกใช้ จะมีผลต่อการสกัดแยกสารด้วย ตัวอย่างเช่น ในการสกัดแยกทองแดงด้วยออกไซม์ พบว่าเมื่อเพิ่มโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก จะทำให้ทองแดงที่สกัดแยกได้ที่สมดุลมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มโครงสร้างที่เป็นอะลิฟาติก จะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น

#### 2.4.5 ข้อดีและข้อเสียของ SLM

ข้อดีของ SLM [<http://www.commodore.com>]

- 1) เงินลงทุนครั้งแรก รวมถึงต้นทุนในการดำเนินการต่ำกว่าเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ใช้กลไกการกรอง
- 2) มีประสิทธิภาพสูงในการแยกธาตุหรือสารประกอบจากของผสม และใช้ได้กับสารปนเปื้อนหลากหลายความเข้มข้น
- 3) ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่เกิดสลัดจ์ (sludges) ที่เป็นอันตราย ซึ่งจะต้องเติมสารเคมีเพื่อบำบัด (post-treatment) ก่อนทำการกำจัดต่อไป
- 4) มีความเลือกจำเพาะสูงสำหรับสารสกัดที่ต้องการ
- 5) สามารถดำเนินการได้ในสถานที่ปฏิบัติงาน เพราะระบบ SLM ทำงานได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ
- 6) สามารถสกัดโลหะ สารอินทรีย์ ธาตุ และสารประกอบอื่น ๆ ได้บริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ นำไปขายสำหรับโลหะมีค่า หรือทำให้ง่ายต่อการกำจัดมากขึ้น
- 7) สามารถแยกสารที่ต้องการได้มากกว่า 1 ชนิด เมื่อต่อ SLM แบบอนุกรม
- 8) ใช้พลังงานในการแยกต่ำ

ข้อด้อยที่สำคัญของระบบ SLM คือ ช่วงชีวิตที่จำกัดของเยื่อแผ่นของเหลว เนื่องจากการละลายของสารอินทรีย์เข้าสู่สารละลายออสโมติก และเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เทคโนโลยีนี้ไม่แพร่หลายเท่าที่ควรในระดับอุตสาหกรรม [Schulz, 1988]

## บทที่ 3

### วิธีการทดลองและขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) คอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- 2) กรดได-2 เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก ( $\text{C}_{16}\text{H}_{35}\text{O}_4\text{P}$ ) เข้มข้น 95 % โดยน้ำหนัก
- 3) กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 96 % โดยน้ำหนัก
- 4) น้ำมันก๊าด (จำนวนอะตอมของธาตุคาร์บอน อยู่ระหว่าง 10-14 อะตอม)
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
- 6) กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA)
- 7) กรดซिटริกมอนอไฮเดรต ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )
- 8) อะซิโตน ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ )
- 9) น้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ชุดเครื่องปั่นกววนสำหรับการสกัดแบบกะ ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ขนาดเล็ก 2 ตัว และถังกววน
- 2) ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 250 และ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 3) บีกเกอร์ขนาด 50 100 250 และ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) ปิเปตขนาด 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร พร้อมจุกยาง
- 5) กระจกตวงขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 6) หลอดทดลอง
- 7) หลอดหยด
- 8) แท่งแก้วคน
- 9) เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH-meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 10) เครื่องชั่ง (ทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง)
- 11) นาฬิกาจับเวลา
- 12) ตัวพวยแบบแผ่น spectra/mesh ของ Spectrum Laboratories, Inc. ซึ่งมีลักษณะเฉพาะ ดังนี้
- ชนิดของเส้นใย : พอลิโพรพิลีน
  - ขนาดของช่องเปิด : 105 ไมโครเมตร
  - เปอร์เซนต์พื้นที่ช่องเปิด : 26
  - ความหนา : 212 ไมโครเมตร
- 13) ถาดสำหรับแช่ตัวพวยในเยื่อแผ่นของเหลว
- 14) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บสารตัวอย่าง
- 15) ถูมมือยาง

### 3.2 การดำเนินการทดลอง

#### 3.2.1 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน

ในการทดลองนี้ จะทำการศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารละลายป้อน และจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 2 ลิตร โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน คือ

- สารละลายสตริป ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร (ค่าพีเอชเท่ากับ 0.5) ปริมาตร 2 ลิตร
- วัฏภาคสารอินทรีย์ ใช้สารละลาย D2EHPA เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในน้ำมันก๊าด
- ความเร็วรอบของการปั่นกววน 250 รอบต่อนาที
- พื้นที่ผิวของตัวพวยต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 0.0536 เซนติเมตร<sup>-1</sup>

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

- 1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นและปริมาตรตามต้องการ

1.1) เตรียมสารละลายป้อนเข้มข้น 500, 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน โดยการละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต 3.9291, 7.8582 และ 19.6455 กรัม ตามลำดับ ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส แล้วปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตร

1.2) เตรียมสารละลายสตริปเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร โดยการละลายกรดซัลฟิวริก 96% โดยน้ำหนัก 63.33 กรัม ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส แล้วปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตร

1.3) เตรียมวัตถุดิบสารอินทรีย์ ที่มีสารสกัดเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยการละลาย D2EHPA 42.42 กรัม ในน้ำมันก๊าด แล้วปรับปริมาตรเป็น 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) เตรียมวัตถุดิบสารอินทรีย์ โดยแช่ตัวพุงในเยื่อแผ่นของเหลวเพื่อเติมเต็มรูพรุนของตัวพุง โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวประมาณ 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปประกอบเข้ากับชุดเครื่องปั่นกวน

3) ปรับความเร็วรอบใบกวนของชุดเครื่องปั่นกวนให้คงที่

4) เทสารละลายป้อนและสารละลายสตริปลงในชุดเครื่องปั่นกวนพร้อม ๆ กัน แล้วเริ่มจับเวลา

5) เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ครั้งละ 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในขวดเก็บสารตัวอย่างตามเวลาที่ต้องการ จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายทั้งสองเริ่มคงที่

6) วัดค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่าง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนไฮโดรเจน สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการปรับค่าพีเอชของสารละลาย เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ

7) วิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายตัวอย่างจากการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก) แล้วบันทึกผลการทดลอง เพื่อศึกษาผลของการสกัดและประสิทธิภาพของการสกัดต่อไป

### 3.2.2 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดงที่เข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวพุงต่อปริมาตรสารละลาย

จากการทดลองที่ 1 พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดยาวนานมาก โดยจากสมการที่ (2.11) ในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่ผิวของตัวพุงต่อปริมาตรสารละลาย ( $A_m/V$ ) เพียงอย่างเดียว ถ้าควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ในระบบให้คงที่ ดังนั้น

ในการทดลองนี้จึงดำเนินการ โดยใช้ถังกวนที่ซึ่งตัวพุงแบบแผ่นภายนอกถัง เพื่อให้พื้นที่ผิวของตัว

พวงแบบแผ่นสัมผัสกับสารละลายภายในถังกวนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวของตัวพวงต่อปริมาตรสารละลาย และน่าจะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดลดลง นอกจากนี้ ยังได้ออกแบบให้ถังกวนมีขนาดเล็กลง เพื่อลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และทำให้สะดวกในการดำเนินการมากขึ้นด้วย ในการทดลองนี้จะใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารละลายป้อน และจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ

- สารละลายสตริป ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร (ค่าพีเอช เท่ากับ 0.5) ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ภูมิภาคสารอินทรีย์ ใช้สารละลาย D2EHPA เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในน้ำมันก๊าด
- ความเร็วรอบของการปั่นกวน 1,800 รอบต่อนาที
- พื้นที่ผิวของตัวพวงต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 0.276 เซนติเมตร<sup>-1</sup>

มีขั้นตอนในการทดลอง ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีให้มีความเข้มข้นและปริมาตรตามต้องการ

1.1) สารละลายป้อนเข้มข้น 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายสตริปเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร จะใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 และตรวจมาใช้ครั้งละ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.2) ภูมิภาคสารอินทรีย์ มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

2) เตรียมภูมิภาคสารอินทรีย์ โดยแช่ตัวพวงในเยื่อแผ่นของเหลวเพื่อเคาะน้ำออกจากตัวพวง โดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปประกอบเข้ากับชุดเครื่องปั่นกวน

3) ปรับความเร็วรอบใบกวนของชุดเครื่องปั่นกวนให้คงที่

4) เทสารละลายป้อนและสารละลายสตริปลงในชุดเครื่องปั่นกวนพร้อม ๆ กัน แล้วเริ่มจับเวลา

5) เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ครั้งละ 2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในขวดเก็บตัวอย่างตามเวลาที่ต้องการ จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายทั้งสองเริ่มคงที่

6) วัดค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่าง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนไฮโดรเจน สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการปรับค่าพีเอชของสารละลาย เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) วิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายตัวอย่างจากการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก) แล้วบันทึกผลการทดลอง เพื่อศึกษาผลของการสกัดและประสิทธิภาพของการสกัดต่อไป

### 3.2.3 การศึกษาข้อจำกัดของการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ

จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2 พบว่าแม้จะทำการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรสารละลายให้มากขึ้น แต่หากทำการสกัดไอออนทองแดงโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนทองแดง และความแตกต่างของปริมาณไอออนไฮโดรเจน (ค่าพีเอช) ในสารละลายเอเคเวียสทั้งสอง เท่านั้น จะได้อัตราของการสกัดไม่สูงเท่าที่ควร จากปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปที่เกิดขึ้น (ดูรายละเอียดได้จากบทที่ 2) แสดงให้เห็นว่าหากปริมาณไอออนไฮโดรเจนในสารละลายเอเคเวียสทั้งสอง แตกต่างกันมากขึ้น แรงขับเคลื่อนของระบบก็จะถูกทำให้เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนทองแดงได้เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้สูงขึ้น พบว่า เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วค่าจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกแม้จะเติมสารละลายเบสลงในสารละลายป้อนมากเท่าใด ในขณะที่สารละลายป้อนกลับขุ่นขึ้นเรื่อย ๆ ในการทดลองนี้ จะทำการศึกษาถึงข้อจำกัดของการปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย ดังนี้

#### 3.2.3.1 การวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่สารละลายป้อนขุ่น เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชโดยการเติมสารละลายเบส

การทดลองนี้ จะดำเนินการในหลอดทดลอง โดยจะใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน แทนสารละลายป้อน ใช้สารละลาย D2EHPA เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในน้ำมันก๊าด เป็นวัฏภาคสารอินทรีย์ และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายสตริป โดยจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ในการปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ โดยการเตรียมสารละลายป้อน เข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน สารละลายสตริป เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร และวัฏภาคสารอินทรีย์ที่มีสารสกัดเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่

#### 3.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ดำเนินการทดลอง โดยการจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น เมื่อทำการทดลองในชุดเครื่องปั้นกวน แล้วทำให้สารละลายป้อนจุ่ม ซึ่งสภาวะที่ใช้ในแต่ละหลอดทดลองเป็นดังนี้

2.1) หลอดทดลองที่ 1 ใส่สารละลายป้อนประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเติมวัตถุภาคสารอินทรีย์ลงไปประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่า แล้วบันทึกผลที่เกิดขึ้น

2.2) หลอดทดลองที่ 2 ใส่สารละลายสตริปประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมวัตถุภาคสารอินทรีย์ที่ถูกแยกออกจากหลอดทดลองที่ 1 (หลังเขย่า) จากนั้นเขย่า แล้วบันทึกผลที่เกิดขึ้น

2.3) หลอดทดลองที่ 3 ใส่สารละลายป้อนประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมวัตถุภาคสารอินทรีย์ลงไปประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงไปประมาณ 3-4 หยด เขย่า แล้วบันทึกผลที่เกิดขึ้น

2.4) หลอดทดลองที่ 4 ใส่สารละลายสตริปประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมวัตถุภาคสารอินทรีย์ที่ถูกแยกออกจากหลอดทดลองที่ 3 (หลังเขย่า) จากนั้นเขย่า แล้วบันทึกผลที่เกิดขึ้น

3) วิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในทุกหลอดทดลอง เพื่อสรุปหาสาเหตุที่สารละลายป้อนจุ่ม เมื่อทำการเติมสารละลายเบส เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอช

3.2.3.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอช

จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.3.1 พบว่า เมื่อทำการเติมสารละลายเบส เพื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน จะเกิดตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ขึ้น ทำให้สารละลายจุ่ม ในการทดลองนี้ จะทำการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เพื่อหาค่าพีเอชสูงสุดสำหรับใช้ในการปรับสารละลายป้อน ก่อนที่จะเกิดตะกอนดังกล่าว

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ โดยการเตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งใช้เป็นสารละลายป้อน และสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร ซึ่งใช้ในการปรับลดค่าพีเอช สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตรวจสอบสารละลายป้อนประมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในบีกเกอร์ วัดค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย สังเกตลักษณะของสารละลายเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ และบันทึกผล

3) ค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ลงในสารละลายป้อน จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายเริ่มเปลี่ยนแปลง หรือจนกระทั่งลักษณะของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากตอนเริ่มต้น บันทึกผลค่าพีเอช และลักษณะของสารละลายที่สังเกตเห็น

4) ทำการทดลองเช่นเดียวกับในข้อ 3 เรื่อยไป จนเริ่มสังเกตเห็นตะกอนสีขาวเกิดขึ้น บันทึกผลค่าพีเอช

5) ค่อย ๆ หยดสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร ลงไปจนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายเริ่มเปลี่ยนแปลง สังเกตลักษณะของสารละลาย แล้วบันทึกผล

6) กำหนดค่าพีเอชสูงสุดของสารละลายป้อนที่เป็นไปได้เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอช ก่อนเกิดตะกอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์

### 3.2.4 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม

ในการทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดงแบบอนุกรม (แบ่งออกเป็น 3 ชั้น) โดยการปรับเพิ่มค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนให้สูงที่สุด ก่อนเกิดตะกอนโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งค่าพีเอชดังกล่าวได้มาจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.3.2 และเมื่อสิ้นสุดการสกัดไอออนทองแดงในชั้นที่ 1 แล้ว จะทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนอีกครั้ง ก่อนที่จะถูกแยกไอออนทองแดงออกด้วยสารละลายสตรีป ในชั้นที่ 2 และเมื่อสิ้นสุดการสกัดไอออนทองแดงในชั้นที่ 2 แล้วก็จะทำในลักษณะเดียวกันอีกครั้งในชั้นที่ 3 โดยในการทดลองนี้ จะใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เป็นสารละลายป้อน และทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน คือ

- สารละลายสตรีป ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร (ค่าพีเอชเท่ากับ 0.5)
- ภูมิภาคสารอินทรีย์ ใช้สารละลาย D2EHPA เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในน้ำมันก๊าด
- ความเร็วรอบของการปั่นกววน 1,800 รอบต่อนาที
- พื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ  $0.276 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นและปริมาตรตามต้องการ

1.1) สารละลายป้อนเข้มข้น 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน และ สารละลายสตริปเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร จะใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 และดวงมาใช้ครั้งละ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.2) ภูมิภาคสารอินทรีย์ มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

1.3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 35% โดยน้ำหนัก สำหรับปรับค่าพีเอช โดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 35 กรัม ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ปริมาณ 65 กรัม

2) ค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงในสารละลายป้อน เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.4

3) ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.2 สำหรับการสกัดขั้นที่ 1

4) สำหรับการสกัดขั้นที่ 2 จะใช้สารละลายป้อนจากการสกัดในขั้นที่ 1 โดยนำมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.4 แล้วดำเนินการทดลองเช่นเดิม โดยใช้สารละลายสตริปที่เตรียมขึ้นใหม่ในการสกัดไอออนทองแดง ในขั้นที่ 2

5) สำหรับการสกัดขั้นที่ 3 จะใช้สารละลายป้อนจากการสกัดในขั้นที่ 2 โดยนำมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.4 แล้วดำเนินการทดลองเช่นเดิม โดยใช้สารละลายสตริปที่เตรียมขึ้นใหม่ในการสกัดไอออนทองแดง ในขั้นที่ 3

### 3.2.5 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวส เป็นระยะ ตลอดการทดลอง

จากปฏิบัติการสกัดและการสตริปที่เกิดขึ้น (ดูรายละเอียดได้จากบทที่ 2) แสดงให้เห็นว่า หากปริมาณไอออนไฮโดรเจนในสารละลายเอควิวสทั้งสอง แตกต่างกันมากขึ้น แรงขับเคลื่อนของระบบก็就会被ทำให้เพิ่มขึ้น น่าจะทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนทองแดงได้เพิ่มมากขึ้น ในการทดลองนี้ เลือกที่จะศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน โดยจะทำการปรับค่าพีเอชของ

สารละลายเอเคเวียส เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ ทุก ๆ 10 นาที ตลอดการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย ดังนี้

3.2.5.1 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน โดยการเติมสารละลายเบสเป็นระยะ ตลอดการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดง โดยการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ โดยจะทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ทุก ๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นและปริมาณตามต้องการ

1.1) สารละลายป้อนเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายสตริปเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร จะใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 และดวงมาใช้ครั้งละ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.2) วัฏภาคสารอินทรีย์ มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

1.3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลต่อลิตร สำหรับปรับค่าพีเอช โดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 กรัม ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสแล้วปรับปริมาตรเป็น 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในสารละลายป้อน ทุก ๆ 10 นาที

3.2.5.2 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายเอเคเวียสทั้งสองเพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ เป็นระยะตลอดการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดง และเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ โดยการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 38.54 % โดยน้ำหนัก ร่วมกับการปรับลดค่าพีเอชของสารละลายสตริป โดยการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 25 % โดยน้ำหนัก ซึ่งการปรับค่าพีเอชนี้จะทำทุก ๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นและปริมาตรตามต้องการ

1.1) สารละลายป้อนเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายสตริปเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร จะใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 และดวงมาใช้ครั้งละ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.2) วิทยาการสารอินทรีย์ มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.2.1

1.3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 38.54% โดยน้ำหนัก สำหรับปรับค่าพีเอช โดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 38.54 กรัม ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ปริมาณ 61.46 กรัม

1.4) เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 25 % โดยน้ำหนัก สำหรับปรับค่าพีเอช โดยละลายกรดซัลฟิวริก 25 กรัม ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ปริมาณ 75 กรัม

2) ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ประมาณ 2 กรัม ลงในสารละลายป้อน และเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก ประมาณ 2 กรัมลงในสารละลายสตริป ทุก ๆ 10 นาที ตลอดการทดลอง

### 3.2.6 การศึกษาผลและประสิทธิภาพของการสกัดไอออนทองแดง เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวส เป็นระยะตลอดการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม

การทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดงแบบอนุกรม และมีการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน ก่อนเริ่มขั้นการสกัดใหม่ทุกครั้ง และในระหว่างการสกัดในแต่ละขั้น จะทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 35 % โดยน้ำหนัก ร่วมกับการปรับลดค่าพีเอชของสารละลายสตริป โดยการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 96 % โดยน้ำหนัก ซึ่งการปรับค่าพีเอชนี้จะทำทุก ๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง โดยในการทดลองนี้ จะใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารละลายป้อน และทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน เป็น 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน คือ

- สารละลายสตริปใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร (ค่าพีเอชเท่ากับ 0.5)

- วิทยาการสารอินทรีย์ ใช้สารละลาย D2EHPA เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในน้ำมันก๊าด

- ความเร็วรอบของการปั่นกวน 1,800 รอบต่อนาที
- พื้นที่ผิวของตัวพวยงต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ  $0.276 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$

มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีให้ได้ความเข้มข้นและปริมาตรตามต้องการ

1.1) สารละลายป้อนเข้มข้น 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายสตริปเข้มข้น 0.316 โมลต่อลิตร จะใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.1 และดวงมาใช้ครั้งละ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.2) ภูมิภาคสารอินทรีย์ มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.1

1.3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 35% โดยน้ำหนัก สำหรับปรับค่าพีเอช โดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 35 กรัม ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ปริมาณ 65 กรัม

2) ค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงในสารละลายป้อน เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.4

3) ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.2 สำหรับการสกัดขั้นที่ 1 โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 2 กรัม ลงในสารละลายป้อน และเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกประมาณ 2 กรัม ลงในสารละลายสตริป ทุก ๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง

4) สำหรับการสกัดขั้นที่ 2 จะใช้สารละลายป้อนจากการสกัดในขั้นที่ 1 โดยนำมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.4 แล้วดำเนินการทดลองเช่นเดิม โดยใช้สารละลายสตริปที่เตรียมขึ้นใหม่ในการสกัด ไอออนทองแดง ในขั้นที่ 2

5) สำหรับการสกัดขั้นที่ 3 จะใช้สารละลายป้อนจากการสกัดในขั้นที่ 2 โดยนำมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.4 แล้วดำเนินการทดลองเช่นเดิม โดยใช้สารละลายสตริปที่เตรียมขึ้นใหม่ในการสกัด ไอออนทองแดง ในขั้นที่ 3

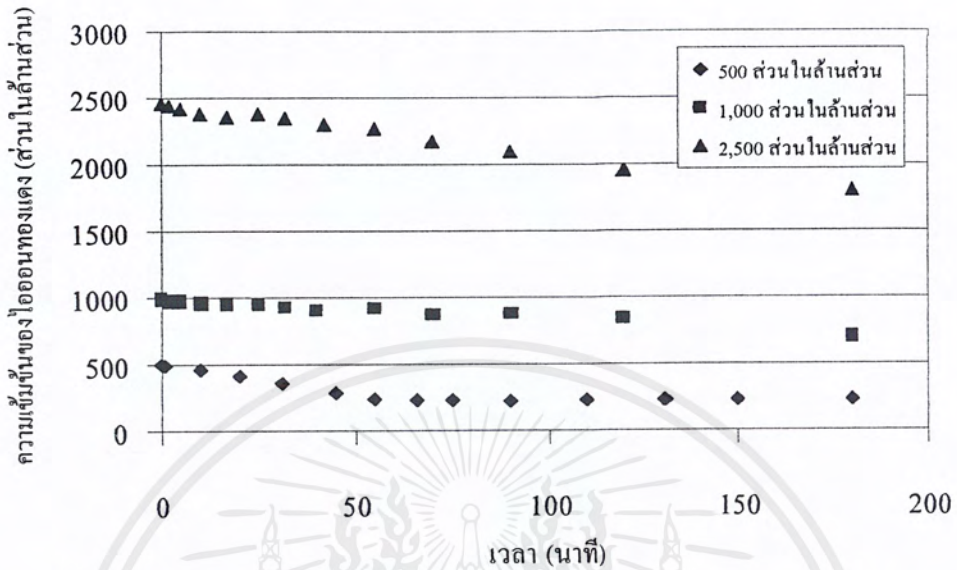
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

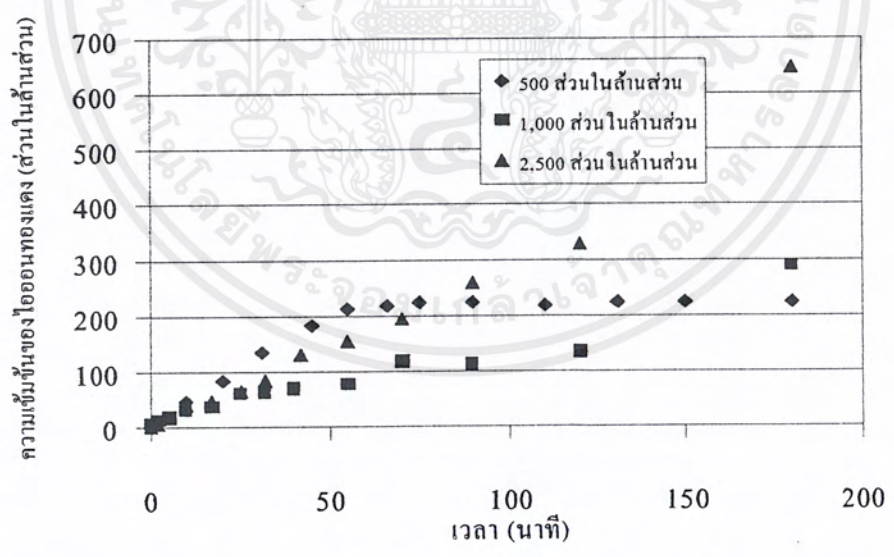
#### 4.1 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1

การทดลองนี้ จะทำการสกัด ไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 2 ลิตร โดยมีพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรของสารละลาย เท่ากับ 0.0536 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และได้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายเอเควียส ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ตามเวลา แสดงว่า มีปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปเกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณร้อยละของการสกัดได้เท่ากับ 53 28.6 และ 26.4 เมื่อคำนวณการทดลองเป็นเวลา 180 นาที สำหรับสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ ในทางทฤษฎี เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน จะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ ทำให้ร้อยละของการสกัดสูงขึ้น และจากการคำนวณความเข้มข้นของ D2EHPA (โมลต่อลิตร) ในวัฏภาคสารอินทรีย์มีค่ามากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงที่ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ในสารละลายป้อน ซึ่งดูเหมือนว่าความเข้มข้นของ D2EHPA ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารอินทรีย์และวัฏภาคสารละลายเอเควียส ทั้งสองด้าน น่าจะเพียงพอในการส่งผ่านไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจน ไปมา อย่างไรก็ดี จากการทดลองพบว่า เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน จะให้ร้อยละของการสกัดสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก D2EHPA ต้องแพร่ผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกที่เชิงช้า ในขณะที่ไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจนในวัฏภาคสารละลายเอเควียสทั้งสองด้านสามารถจะเคลื่อนที่โดยการพา จากสารละลายบัลค์ (bulk solution) มาที่ผิวสัมผัสได้อย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราที่ D2EHPA อีตระจะเข้ามาที่ผิวสัมผัสมีช้ากว่าอัตราการเข้ามาของไอออนทั้งสองดังกล่าว ยังผลให้ที่เวลาใด ๆ หลังจากเวลาเริ่มต้นความเข้มข้นของ D2EHPA (โมลต่อตารางเซนติเมตร) ที่ผิวสัมผัสอาจมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจน โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงมีค่าสูง เช่น 2,500 ส่วนในล้านส่วน



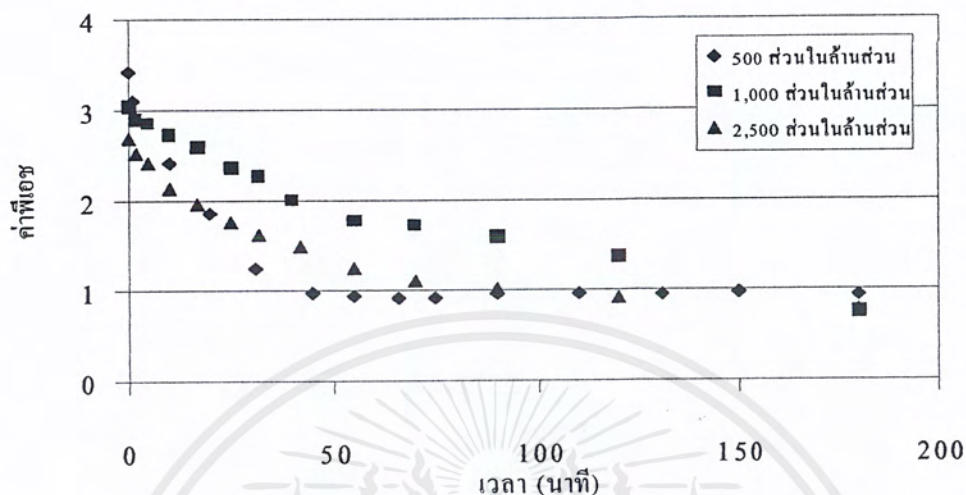
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)



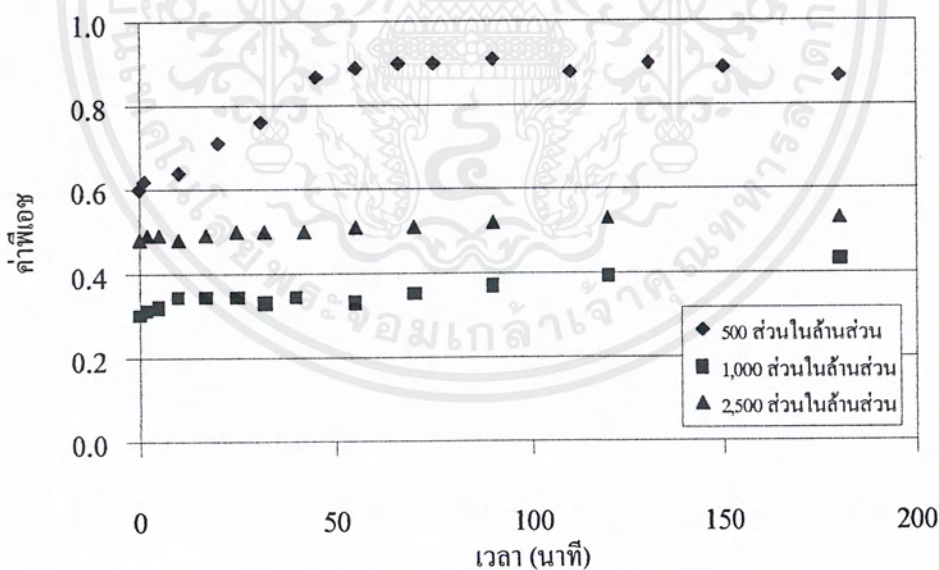
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายสตรีปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายเอเควียส ได้ผลดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)



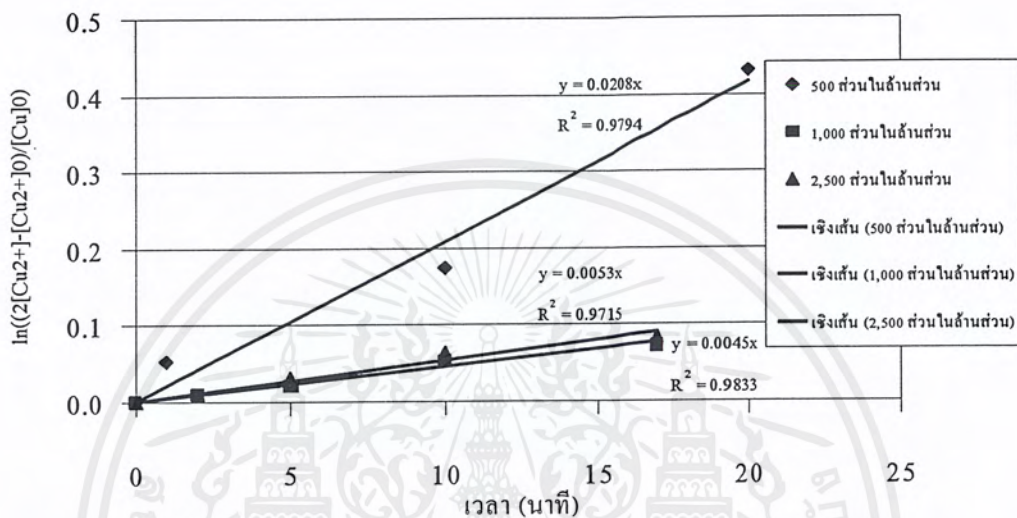
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสกริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

นอกจากนี้ ยังอาจแสดงความสามารถในการสกดของระบบ ได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การ-

ถ่ายเทมวล ( $k_c$ ) ซึ่งจากสมการที่ (2.11) จะสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \left[ \frac{2 [\text{Cu}^{2+}]_I - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right] \text{ และ } t \text{ ดังแสดงในรูปที่ 4.5}$$



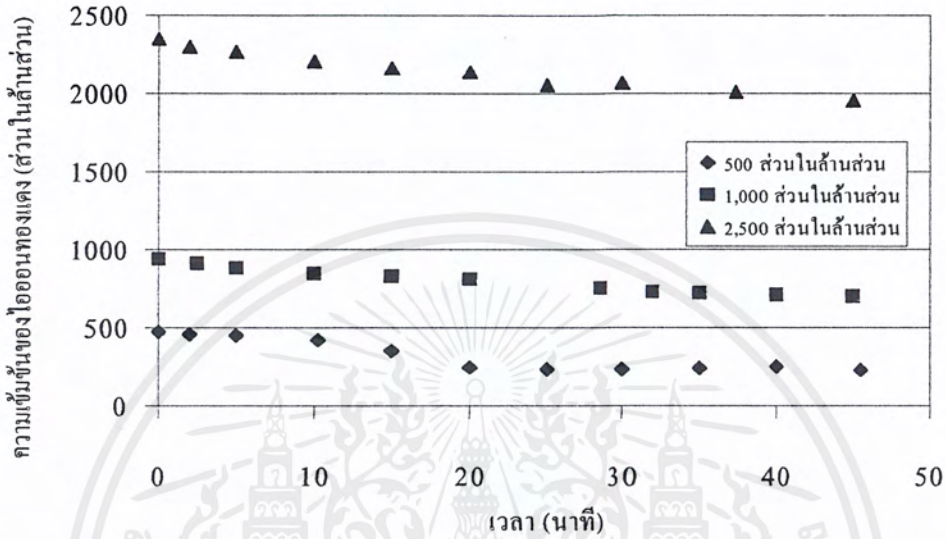
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left[ \frac{2 [\text{Cu}^{2+}]_I - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right]$  และ  $t$  ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.0536$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

จากรูปที่ 4.5 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลได้เท่ากับ  $3.23 \times 10^{-3}$  ถึง  $7 \times 10^{-4}$  และ  $8.24 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) จาก สมการ  $k_c = D/S$  ได้เท่ากับ  $6.85 \times 10^{-5}$   $1.48 \times 10^{-5}$  และ  $1.75 \times 10^{-5}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

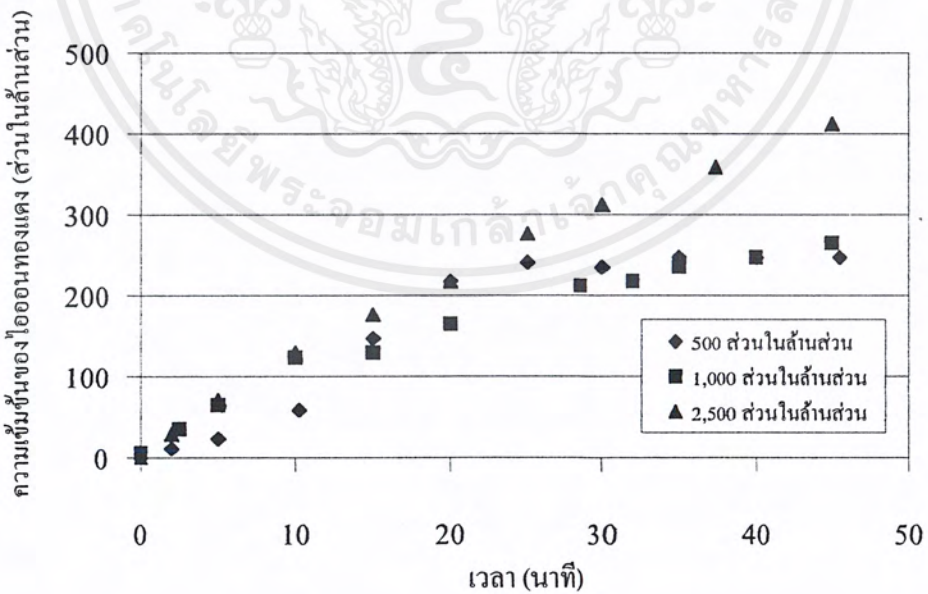
### 4.2 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2

การทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรของสารละลาย เท่ากับ 0.276 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ

ได้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายเอควิวส ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



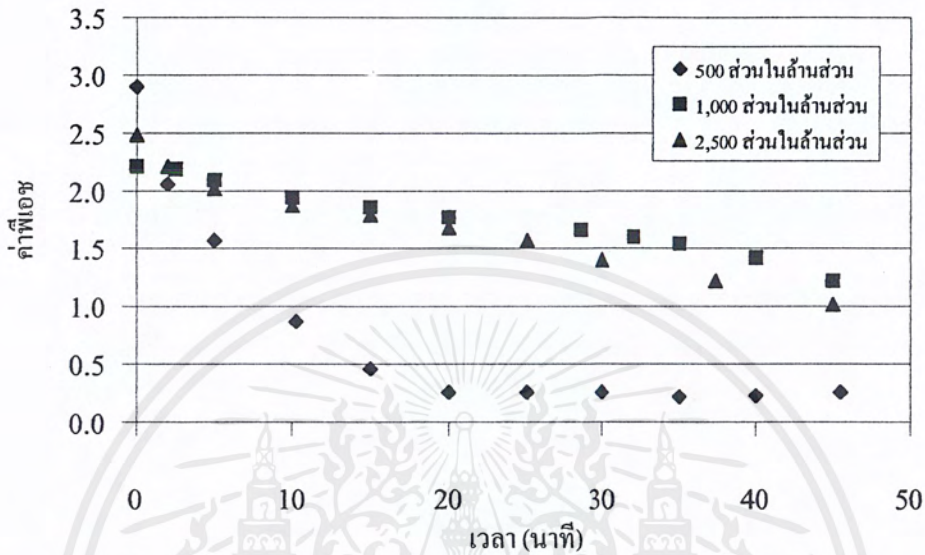
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)



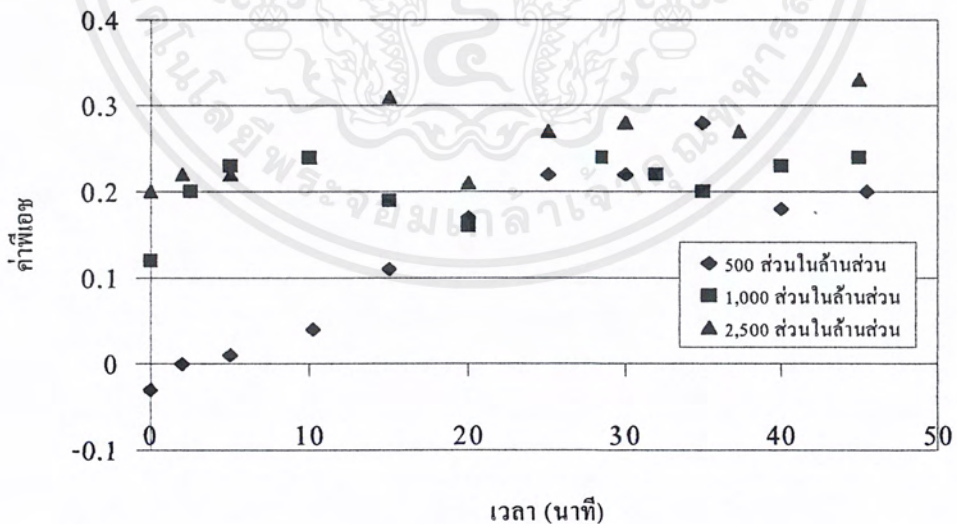
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายเอควิวส ได้ผลดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

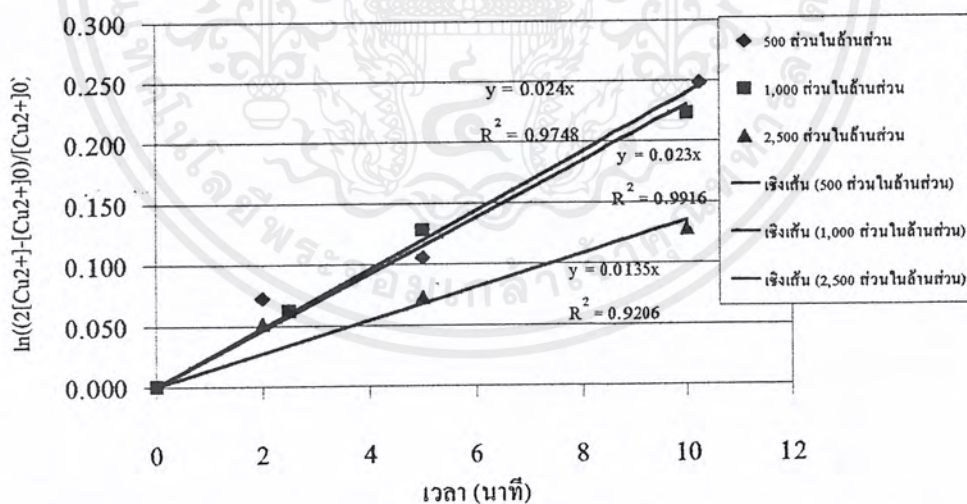


รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ตามเวลา แสดงว่า มีปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปเกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณร้อยละของการสกัดได้เท่ากับ 46.9 25.6 และ 16.8 เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 45 นาที สำหรับสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ โดยสาเหตุที่สารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน ให้ร้อยละของการสกัดสูงที่สุดนั้น ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1 หากทำการเปรียบเทียบร้อยละของการสกัดของการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 และการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 45 นาที เท่ากัน การทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 จะให้ร้อยละของการสกัดเพียง 43.5 8.9 และ 6.2 สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า การสกัดที่ได้ปรับเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรสารละลายในหัวข้อที่ 3.2.2

นอกจากนี้ ยังอาจแสดงความสามารถในการสกัดของระบบ ได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $k_c$ ) ซึ่งคำนวณได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left[ \frac{2[\text{Cu}^{2+}]_I - [\text{Cu}^{2+}]_0}{[\text{Cu}^{2+}]_0} \right]$  และ  $t$  ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

จากรูปที่ 4.10 สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ได้เท่ากับ  $7.24 \times 10^{-4}$   $6.93 \times 10^{-4}$  และ  $4.07 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 500, 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ได้เท่ากับ  $1.53 \times 10^{-5}$   $1.47 \times 10^{-5}$  และ  $8.63 \times 10^{-6}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล จะมีแนวโน้มในทางเดียวกับ ค่าร้อยละของการสกัดที่คำนวณได้

### 4.3 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.3

การทดลองนี้ จะศึกษาถึงข้อจำกัดของการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ ซึ่งสามารถแสดงผลของทั้ง 2 การทดลองย่อย ได้ดังนี้

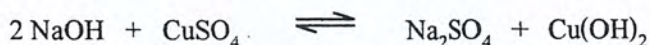
#### 4.3.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่สารละลายป้อนพุ่ง เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชโดยการเติมสารละลายเบส

การทดลองนี้ จะวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้สารละลายป้อนพุ่ง เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชโดยการเติมสารละลายเบส โดยจะทำการทดลองในหลอดทดลอง ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ผลที่สังเกตได้หลังจากเขย่าหลอดทดลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาการสกัดเกิดขึ้น โดยไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA และเข้าไปอยู่ในชั้นของวัฏภาคสารอินทรีย์ในรูปของสารเชิงซ้อน และผลที่สังเกตได้หลังเขย่าหลอดทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นว่า มีปฏิกิริยาการสตริบเกิดขึ้น โดยไอออนทองแดงในรูปของสารเชิงซ้อนที่อยู่ในวัฏภาคสารอินทรีย์ จะถูกสตริบโดยการเปลี่ยนไอออนกับไอออนของไฮโดรเจน และเข้าไปอยู่ในชั้นของสารละลายสตริบในรูปของไอออนทองแดง ส่วนในหลอดทดลองที่ 3 นั้น จะมีองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นจากหลอดทดลองที่ 1 คือ มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งก็ให้ผลที่แตกต่างไปคือ สารละลายจะพุ่งขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้สารละลายพุ่งขึ้น โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์น่าจะทำปฏิกิริยากับทั้งไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สารละลายป้อน และสารสกัด D2EHPA เนื่องจากทำให้สารละลายทั้งสองวัฏภาคพุ่งขึ้น นอกจากนี้ คราบน้ำมันที่เกาะข้างหลอดทดลอง ยังอาจทำให้สันนิษฐานได้ว่า D2EHPA ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์บางส่วน สามารถละลายในสารละลายเอควิวสได้ดีขึ้น และลงไปอยู่ในชั้นสารละลายป้อน ส่วนผลการทดลองที่สังเกตได้หลังจากเขย่าหลอดทดลองที่ 4 แสดงให้เห็นว่า

ปฏิกิริยาการสตริบยังสามารถเกิดขึ้นได้ แม้ว่าจะมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในชั้นสารละลายเอควิวสเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทรีย์ เนื่องจากสีฟ้าของไอออนทองแดงหายไปจากวัฏภาคสารอินทรีย์ และผลการทดลองที่สังเกตได้จากหลอดทดลองที่ 5 แสดงให้เห็นว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงในสารละลายป้อน เกิดเป็นตะกอนสีฟ้า ซึ่งอาจเขียนสมการแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ



ตารางที่ 4.1 ลักษณะของสารละลายในหลอดทดลองที่มีองค์ประกอบต่างกัน

หลอดทดลองที่	องค์ประกอบ	ลักษณะของสารละลาย หลังเขย่า
1	- สารละลายป้อน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร - วัฏภาคสารอินทรีย์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร	- วัฏภาคสารอินทรีย์มีสีฟ้าเกิดขึ้น - สารละลายป้อนมีสีฟ้าอ่อนลง - สารละลายใสทั้งสองวัฏภาค
2	- สารละลายสตริป 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร - วัฏภาคสารอินทรีย์จากหลอดทดลองที่ 1 (หลังเขย่า)	- สีฟ้าในวัฏภาคสารอินทรีย์หายไป - สารละลายสตริปมีสีฟ้าจาง ๆ - สารละลายใสทั้งสองวัฏภาค
3	- สารละลายป้อน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร - วัฏภาคสารอินทรีย์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร - สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร 3-4 หยด	- วัฏภาคสารอินทรีย์มีสีฟ้าเกิดขึ้น - สารละลายขุ่น ทั้งสองวัฏภาค - ข้างหลอดทดลอง มีลักษณะ คล้ายหยดน้ำมันเกาะอยู่
4	- สารละลายสตริป 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร - วัฏภาคสารอินทรีย์จากหลอดทดลองที่ 3 (หลังเขย่า)	- สีฟ้าในวัฏภาคสารอินทรีย์หายไป - สารละลายสตริปมีสีฟ้าใสจาง ๆ - วัฏภาคสารอินทรีย์ขุ่น
5	- สารละลายป้อน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร - สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร 3-4 หยด	- สารละลายป้อนขุ่น - เกิดตะกอนสีฟ้าในสารละลายป้อน

โดยตะกอนสีฟ้าที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ เนื่องจากโซเดียมซัลเฟตที่เกิดขึ้น เป็นเกลือของโลหะหมู่ IA ซึ่งสามารถละลายน้ำได้

#### 4.3.2 ผลการทดลองการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอช

การทดลองนี้ จะทำการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าพีเอช เพื่อหาค่าพีเอชสูงสุดสำหรับการปรับสารถละลายป้อนก่อนที่จะเกิดตะกอนดังกล่าว ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เมื่อค่าพีเอชของสารถละลายป้อนสูงกว่า 3.54 ตะกอนสีฟ้าของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์จะเริ่มไม่ละลายน้ำ และเมื่อเติม

#### ตารางที่ 4.2 ลักษณะของสารถละลายที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อทำการเติมสารถละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ค่าพีเอชของสารถละลาย	ลักษณะของสารถละลาย
3.54 (สารถละลายป้อนเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน)	สารถละลายมีสีฟ้าใส
4.97	สารถละลายเริ่มขุ่น และเริ่มเกิดตะกอนสีฟ้า
5.08	สารถละลายขุ่นขึ้น และเกิดตะกอนสีฟ้าเพิ่มขึ้น
5.19	สารถละลายขุ่น และเกิดตะกอนสีฟ้าเพิ่มขึ้น

#### ตารางที่ 4.3 ลักษณะของสารถละลายที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อเติมสารถละลายกรดซัลฟิวริก

ค่าพีเอชของสารถละลาย	ลักษณะของสารถละลาย
5.19 (ค่าจากตารางที่ 4.2 ก่อนเติมกรดซัลฟิวริก)	สารถละลายขุ่น และเกิดตะกอนสีฟ้า
5.00	สารถละลายขุ่น แต่ปริมาณตะกอนลดลง
3.52	สารถละลายใส ตะกอนสีฟ้าหายไป
2.74	สารถละลายใส ไม่เกิดตะกอน
2.46	สารถละลายใส ไม่เกิดตะกอน

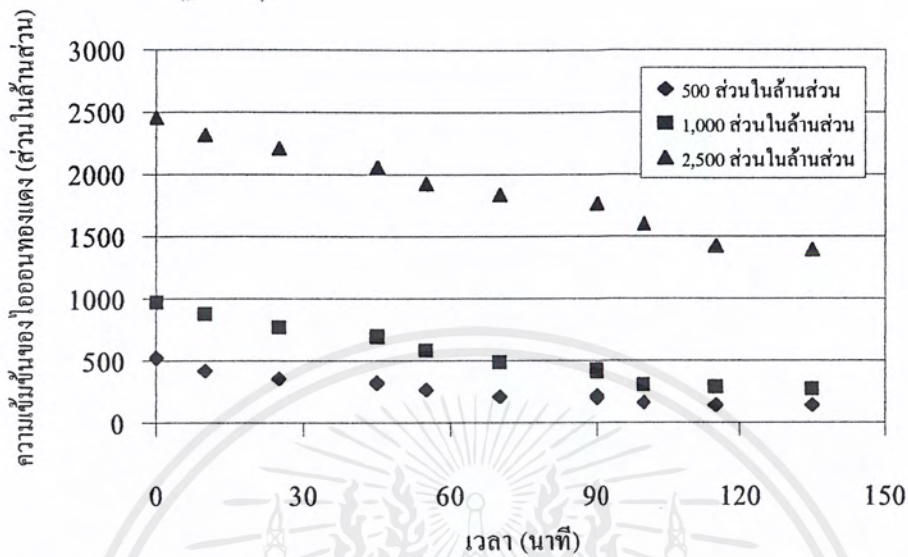
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปอีก ค่าพีเอชก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน ไม่แตกตัว แต่กลับ ไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอนขึ้น และหากมีตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น แล้วทำการปรับค่าพีเอช ตะกอนดังกล่าวก็จะสามารถละลายน้ำได้อีกครั้ง เมื่อสารละลายมีค่าพีเอช เท่ากับ 3.52 ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า ค่าพีเอชที่สูงที่สุดของสารละลายที่จะไม่ทำให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ คือค่าพีเอชประมาณ 3.50 โดยในการดำเนินการทดลองจะเลือกปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้ได้ประมาณ 3.40 เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการปรับค่าพีเอชจนเกินค่าสูงสุดที่กำหนดไว้

#### 4.4 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4

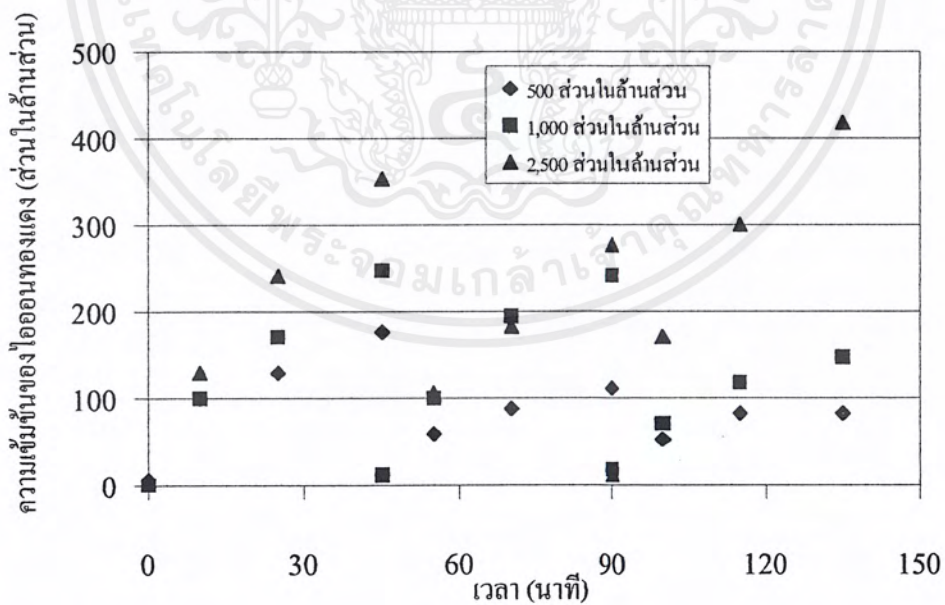
การทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดงโดยการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน ก่อนเริ่มการสกัดในแต่ละชั้น ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม ซึ่งจะทำการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรสารละลาย เท่ากับ 0.276 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และได้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายเอเคเวียส ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริปจะเพิ่มขึ้น ตามเวลา แสดงว่ามีปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปเกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณร้อยละของการสกัดได้เท่ากับ 73.72.1 และ 43.2 เมื่อดำเนินการทดลองโดยปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ก่อนเริ่มการสกัดในแต่ละชั้น ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม (3 ชั้นการสกัด) โดยดำเนินการทดลอง 45 นาที ในแต่ละชั้น สำหรับสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ โดยสาเหตุที่สารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน ให้ร้อยละของการสกัดสูงที่สุดนั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1 จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ โดยการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม จะให้ค่าร้อยละของการสกัดสูงขึ้นจากการสกัดโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนเริ่มต้นของระบบเพียงอย่างเดียว ในการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เนื่องจากการดำเนินการในลักษณะข้างต้น นอกจากจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบเนื่องจากการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนแล้ว การดำเนินการแบบอนุกรม ซึ่งจะเปลี่ยนสารละลายสตริปในทุก ๆ ชั้นของการสกัด จะทำให้ความแตกต่างของปริมาณไอออนไฮโดรเจนในสารละลายเอเคเวียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม

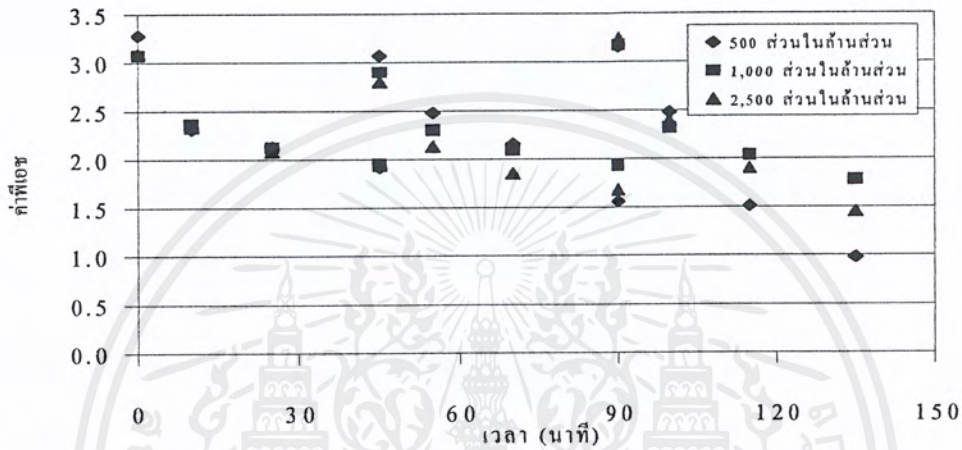


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม

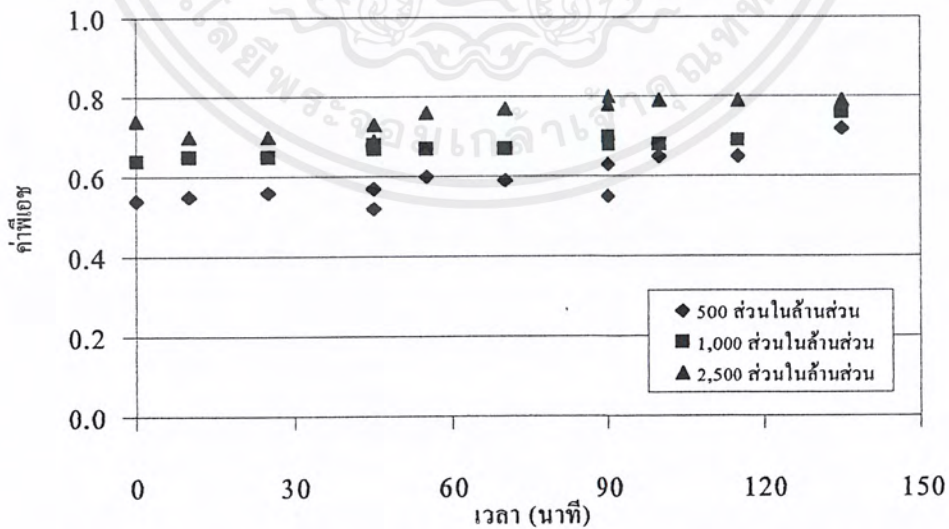
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชั้นการสกัด และการเปลี่ยนไปใช้สารละลายสตริปที่ไม่มีปริมาณไฮดรอกไซด์อยู่เลย จะทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชั้นการสกัดด้วย

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายเอควิวส ได้ผลดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



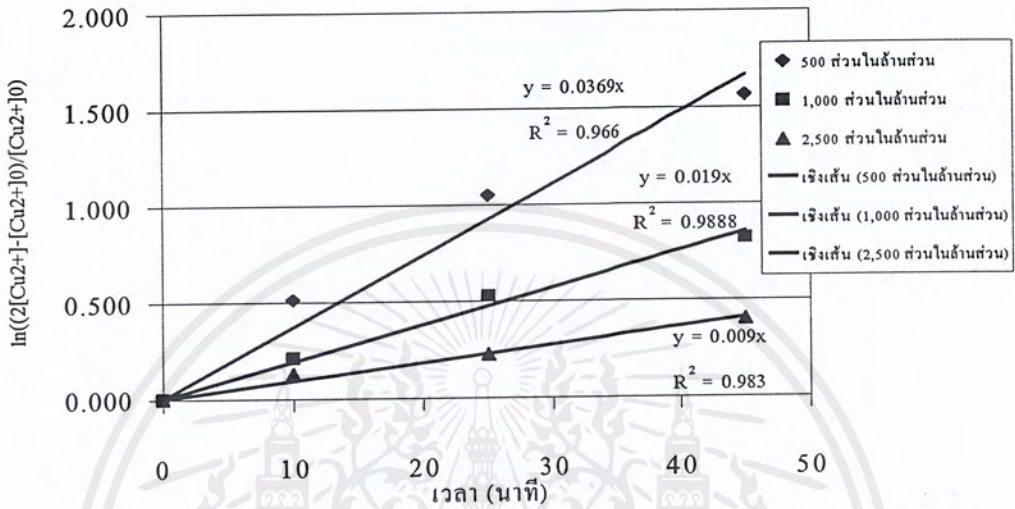
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_{\text{m}}/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_{\text{m}}/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ยังอาจแสดงความสามารถในการสกัดของระบบ ได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $k_c$ ) ซึ่งคำนวณได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.15

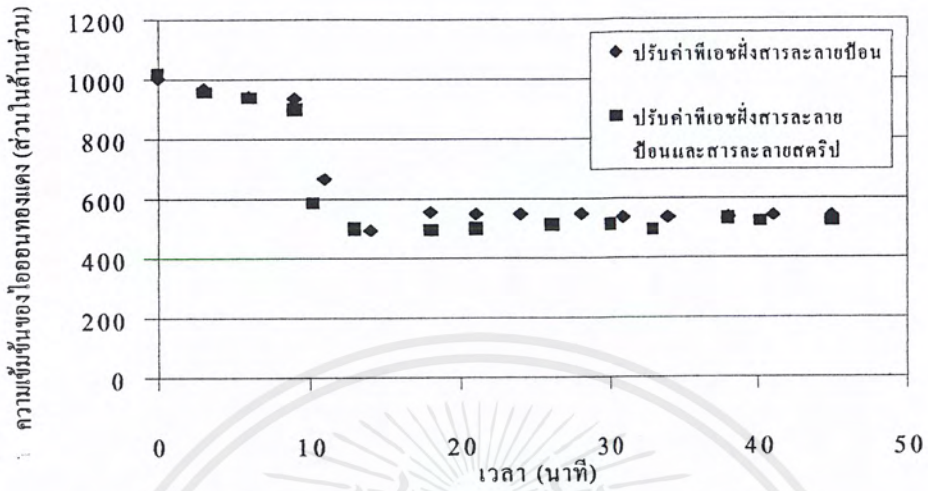


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left[ \frac{2 [Cu^{2+}]_t - [Cu^{2+}]_0}{[Cu^{2+}]_0} \right]$  และ  $t$  ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

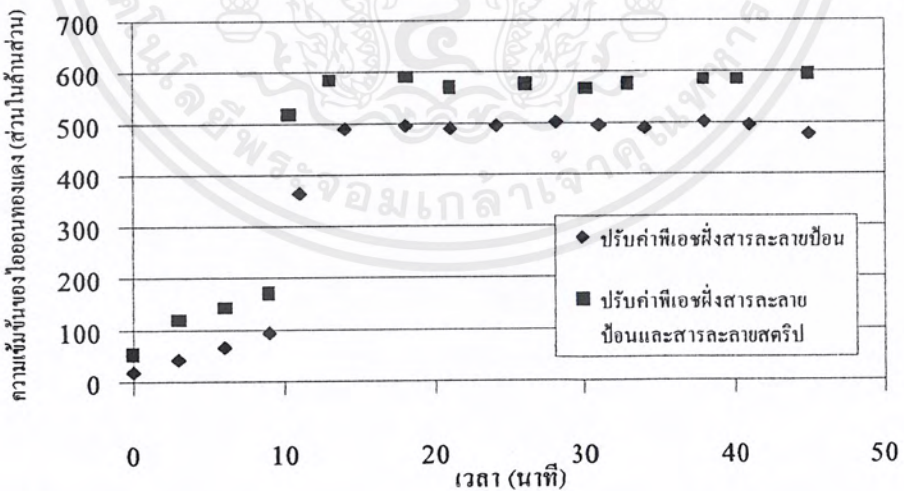
จากรูปที่ 4.15 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ได้เท่ากับ  $1.11 \times 10^{-3}$ ,  $5.73 \times 10^{-4}$  และ  $2.71 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 500, 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ได้เท่ากับ  $2.35 \times 10^{-5}$ ,  $1.21 \times 10^{-5}$  และ  $5.75 \times 10^{-6}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล จะมีแนวโน้มในทางเดียวกับ ค่าร้อยละของการสกัดที่คำนวณได้

#### 4.5 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5

การทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดงโดยจะปรับเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ โดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ซึ่งในที่นี้จะดำเนินการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสทุก ๆ 10 นาที เพื่อควบคุมค่าพีเอชของระบบให้คงที่เท่ากับ 3.4 ในสารละลายป้อน และเท่ากับ 0.5 ในสารละลายสตริป อันจะเป็นการรักษาแรงขับเคลื่อนของระบบ



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวสเป็นระยะ ตลอดการทดลอง



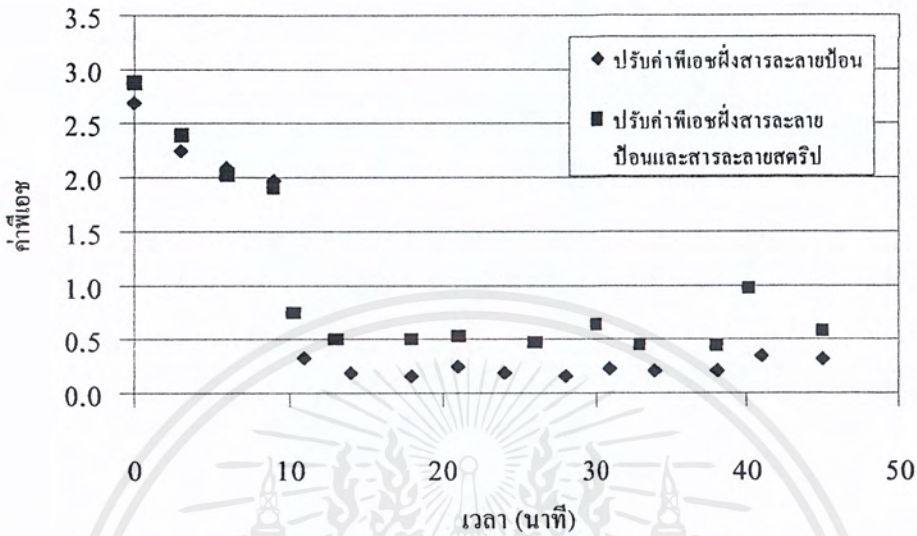
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายศรียิป ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวสเป็นระยะ ตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

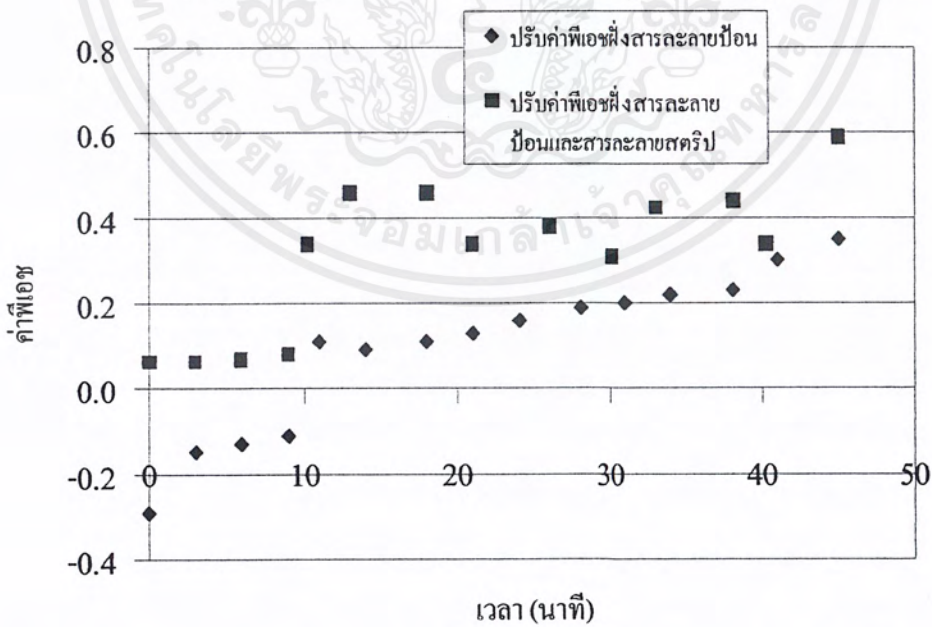
ให้คงที่ด้วย ในการทดลองนี้จะเลือกทำที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน เท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรสารละลาย เท่ากับ 0.276 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจะทำ 2 การทดลองย่อย โดยในการทดลองแรกจะทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนทุก ๆ 10 นาที ตลอดการทดลอง และในการทดลองที่สองจะทำการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน พร้อม ๆ กับการปรับลดค่าพีเอชของสารละลายสตริป ทุก ๆ 10 นาที ตลอดการทดลอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงให้เห็นว่า มีปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปเกิดขึ้น โดยจะสามารถคำนวณค่าร้อยละของการสกัดได้ เท่ากับ 45.9 เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 45 นาที ในกรณีที่ดำเนินการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนทุก ๆ 10 นาที และคำนวณได้ เท่ากับ 49.1 เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 45 นาที ในกรณีที่ดำเนินการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน พร้อม ๆ กับการปรับลดค่าพีเอชของสารละลายสตริป ทุก ๆ 10 นาที จะเห็นว่า หากดำเนินการปรับค่าพีเอชของสารละลาย-ป้อน ร่วมกับการปรับลดค่าพีเอชของสารละลายสตริป จะให้ร้อยละของการสกัดสูงกว่าการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจาก การปรับลดค่าพีเอชของสาร-ละลายสตริป จะเป็นการเพิ่มจำนวนของไอออนไฮโดรเจนในด้านสารละลายสตริป ซึ่งถ้าดูจากปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปที่เกิดขึ้น (รายละเอียดในบทที่ 2) การเพิ่มจำนวนของไอออนไฮโดรเจนดังกล่าว จะทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนทองแดงในด้านสารละลายป้อน ได้ดีขึ้น

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายเอควิวส ได้ผลดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 โดยเมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.16 – 4.19 ประกอบกัน จะเห็นว่า การเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายป้อน พร้อม ๆ กับการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตริป ในครั้งแรก (นาทีที่ 10 ของการทดลอง) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายเอควิวสทั้งสองอย่างมาก แต่ไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมากนัก เมื่อเติมสารละลายทั้งสองในครั้งต่อ ๆ มา ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริกที่จะเติมลงในสารละลายเอควิวสทั้งสองได้มาจากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 10 นาทีแรกของการทดลองที่ไม่ได้ปรับเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ ซึ่งจำนวนโมลของไอออนไฮโดรเจนที่คำนวณได้มีค่าประมาณ  $10^{-2}$  โมล ดังนั้นเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริก ในครั้งแรกที่นาทีที่ 10 ของการทดลอง จะเห็นว่า ไอออนทองแดงในด้านสารละลายป้อน ถูกสกัดไปยังด้านสารละลายสตริปจำนวนมาก พร้อม ๆ กับที่ไอออนไฮโดรเจนถูกแลกเปลี่ยนมายัง



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>1</sup>) เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวส เป็นระยะ ตลอดการทดลอง



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายศตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>1</sup>) เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวส เป็นระยะ ตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

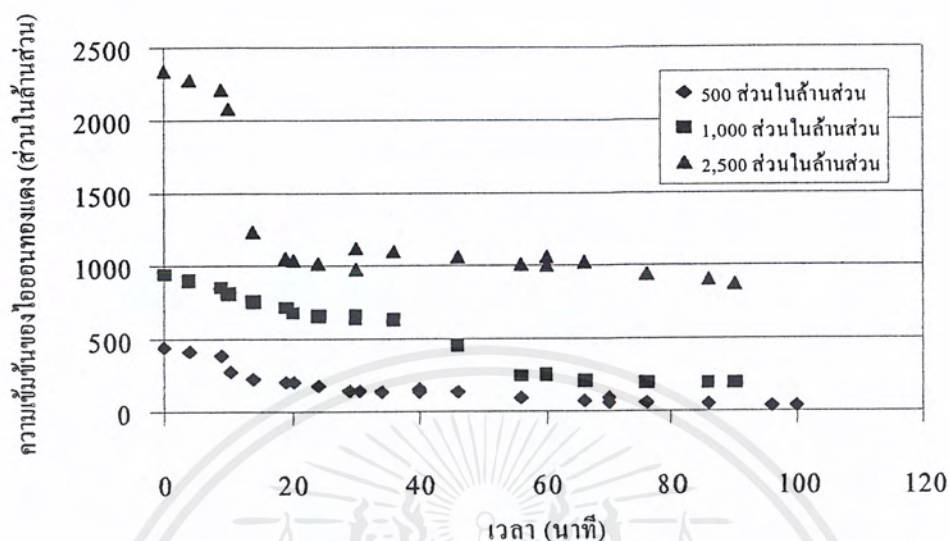
ด้านสารละลายป้อนจำนวนมาก เช่นกัน ส่งผลให้การเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในครั้งต่อ ๆ มา เพื่อควบคุมค่าพีเอชของสารละลายป้อนให้คงที่ที่ 3.4 จะต้องใช้ปริมาณสูงถึง  $10^{-0.5}$  โมล ดังนั้นการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณที่คำนวณได้ข้างต้น จึงไม่สามารถเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนได้ แต่จะเป็นเพียงการรักษาความเข้มข้นของไอออนทองแดงทั้งสองด้านให้คงที่ หรือทำให้เกิดการสกัดและการสตริปได้อีกเพียงเล็กน้อย เท่านั้น

#### 4.6 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6

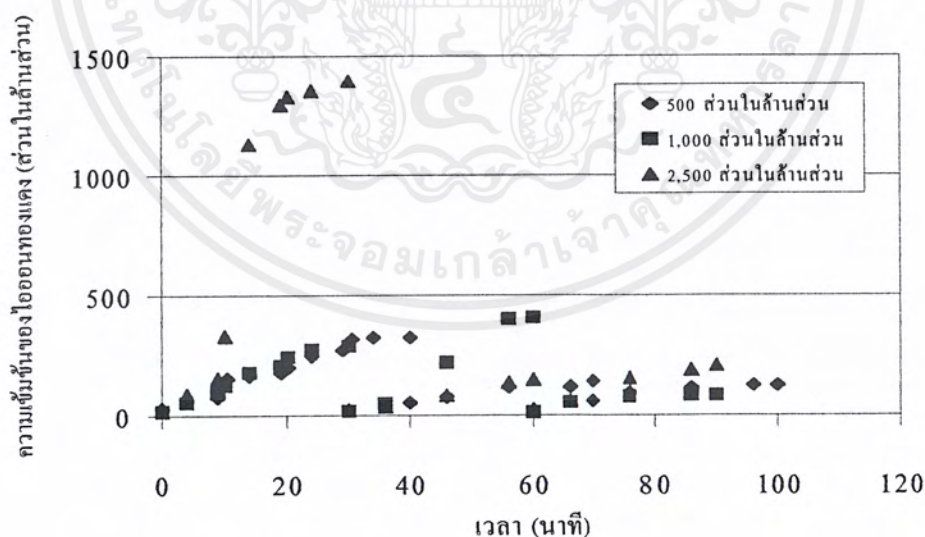
การทดลองนี้ จะทำการสกัดไอออนทองแดงโดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควีเอสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม (3 ขั้นตอนการสกัด) ซึ่งจะทำการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีพื้นที่ผิวของตัวพองต่อปริมาตรสารละลาย เท่ากับ 0.276 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และได้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายเอเควีเอส ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงให้เห็นว่า มีปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปเกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณร้อยละของการสกัดได้เท่ากับ 92 80 และ 62.8 เมื่อดำเนินการทดลองโดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควีเอสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม (3 ขั้นตอนการสกัด) โดยดำเนินการทดลอง 30 นาที ในแต่ละขั้น สำหรับสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ โดยสาเหตุที่สารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน ให้ร้อยละของการสกัดสูงที่สุดนั้น ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1

จากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ โดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควีเอสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรม (3 ขั้นตอนการสกัด) จะให้ค่าร้อยละของการสกัดสูงขึ้นจากการสกัดโดยอาศัยเฉพาะแรงขับเคลื่อนเริ่มต้นของระบบเพียงอย่างเดียว ในหัวข้อที่ 3.2.2 และสูงขึ้นจากการสกัดโดยการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อนก่อนเริ่มการสกัดในแต่ละขั้น ร่วมกับการดำเนินการทดลองแบบอนุกรมในหัวข้อที่ 3.2.4 ทั้งนี้เนื่องจากการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควีเอสเป็นระยะ จะสามารถควบคุมค่าพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลให้การรักษาแรงขับเคลื่อนของระบบให้คงที่ได้ดีกว่า นอกจากนี้ การดำเนินการแบบอนุกรม ซึ่งจะเปลี่ยนสาร-



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคเวียสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม

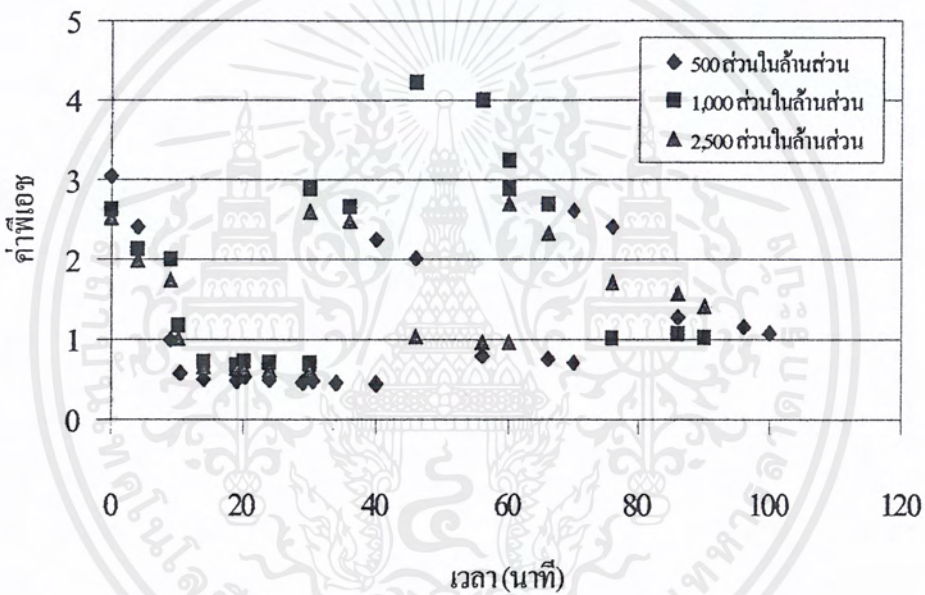


รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตรีป ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเคเวียสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม

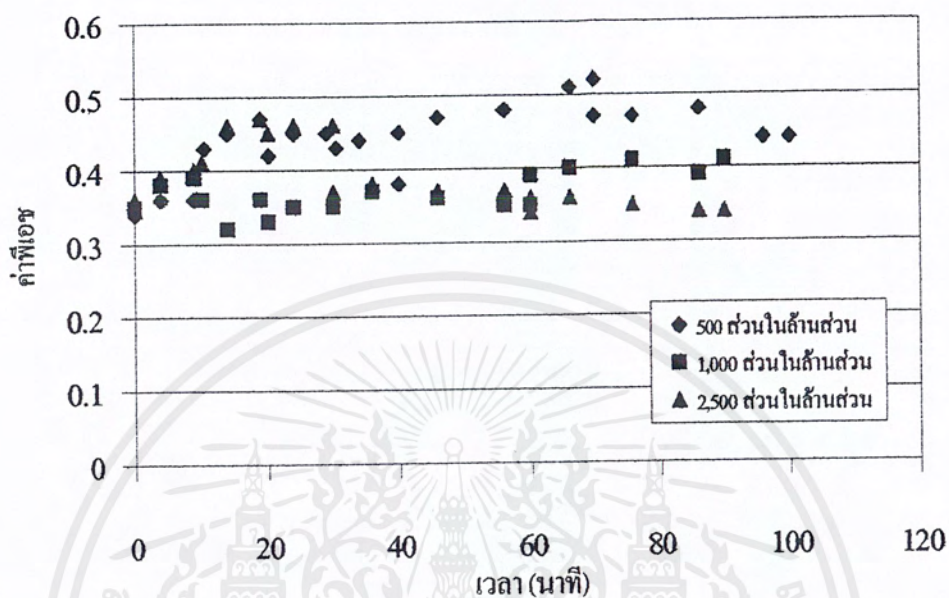
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายสตริปในทุก ๆ ชั้นของการสกัด จะทำให้ความแตกต่างของปริมาณ ไอออนไฮโดรเจนในสารละลายเอควิวสเพิ่มขึ้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชั้นการสกัด และการเปลี่ยนไปใช้สารละลายสตริปที่ไม่มีปริมาณ ไอออนทองแดงอยู่เลย จะทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนทองแดงเพิ่มขึ้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชั้นการสกัด อีกด้วย

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายเอควิวส ได้ผลดังรูปที่ 4.22 และ 4.23 ซึ่งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.5



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_{\text{Cu}}/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอควิวสเป็นระยะ ตลอดการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลายสตริปที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนต่าง ๆ ( $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>) เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสเป็นระยะ ตลอดจนการทดลอง ร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 ปฏิริยาการสกัดเกิดขึ้น ดังสมการ



โดยเมื่อคิดเป็นร้อยละของการสกัดแล้วพบว่าเมื่อความเข้มข้นของทองแดงน้อยจะทำให้ร้อยละของการสกัดสูงกว่าที่ความเข้มข้นของทองแดงสูง

5.1.2 ในทางทฤษฎี การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ ซึ่งจะทำให้ได้ร้อยละของการสกัดสูงขึ้น แต่จากการทดลองซึ่งดำเนินการที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อน 3 ค่าคือ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน จะให้ค่าร้อยละของการสกัดสูงที่สุด เนื่องจากสารสกัด D2EHPA ต้องแพร่ผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกที่ช้า ในขณะที่ไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจนในวัฏภาคสารละลายเอเควียทั้งสองด้านสามารถเคลื่อนที่โดยการพาจากสารละลายบัลค์มาที่ผิวสัมผัสได้อย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราที่ D2EHPA อิศระจะเข้ามาที่ผิวสัมผัสมีช้ากว่าอัตราการเข้ามาของไอออนทั้งสองดังกล่าว ยังผลให้ที่เวลาใด ๆ หลังจากเวลาเริ่มต้น ความเข้มข้นของ D2EHPA (โมลต่อตารางเซนติเมตร) ที่ผิวสัมผัส อาจมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจน โดยเฉพาะเมื่อ ความเข้มข้นของไอออนทองแดงมีค่าสูง เช่น 2,500 ส่วนในล้านส่วน

5.1.3 ในการดำเนินการสกัดไอออนทองแดง เมื่อควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ในระบบให้คงที่ จากสมการที่ (2.11) ถ้าเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า  $A_m/V$  เพื่อดูผลที่มีต่อระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดสารปริมาณเท่ากัน จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ถังกวนที่มีค่า  $A_m/V = 0.276$  เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะใช้เวลาในการสกัดน้อยกว่าเมื่อใช้ถังกวนที่มีค่า  $A_m/V = 0.0536$  เซนติเมตร<sup>-1</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 การปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายป้อน เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น จะสามารถปรับเพิ่มค่าพีเอชได้สูงสุด เท่ากับ 3.50 เนื่องจากที่ค่าพีเอชสูงกว่านี้ ไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามสมการ



ได้เป็นตะกอนสีฟ้าของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ

5.1.5 การเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบ โดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียส จะให้ร้อยละของการสกัดสูงสุด เมื่อการปรับค่าพีเอชนั้นทำให้ปริมาณไฮโดรเจนไอออนและปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายเอเควียสทั้งสอง แตกต่างกันอย่างมากที่สุด โดยการทดลองพบว่า การปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นระยะตลอดการทดลองร่วมกับการดำเนินการแบบอนุกรม จะให้ร้อยละของการสกัดสูงสุด เท่ากับ 92 80 และ 62 เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 45 นาที สำหรับสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของตัวพุงต่อปริมาตรสารละลาย เท่ากับ 0.276 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ รูปที่ 4.20 ยังแสดงถึงความเข้มข้นที่ได้ที่จะลดปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 2,300 ส่วนในล้านส่วน ให้มีปริมาณน้อยกว่า 50 ส่วนในล้านส่วนได้ โดยการสกัดด้วยวิธีการดังกล่าว

5.1.6 ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับช่วงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลว [Middleman, 1998] จึงอาจกล่าวได้ว่า ปฏิกิริยาการสกัดและการสตริปที่เกิดขึ้นถูกจำกัดในขั้นตอนการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่างสารสกัดและไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการศึกษาระบบนี้ต่อไป มีดังนี้

5.2.1 ควรดำเนินการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้สารสกัดประเภท chelating extractants ในกลุ่มของ LIX เช่น LIX64N, LIX54-100 หรือ LIX84 เป็นต้น ซึ่งสารสกัดดังกล่าวได้มีการแนะนำไว้ในหลายงานวิจัย และจากผลการทดลองของบางงานวิจัยพบว่าให้ร้อยละของการสกัด

เอกสารไอออนทองแดงสูง [Loiacono, Drioli และ Molinari, 1986] ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารตัวอย่าง หากใช้วิธีการทำให้เกิดสารเชิงซ้อนของไอออนทองแดง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ควรใช้วิธีที่สามารถวิเคราะห์ได้ครอบคลุมค่าพีเอชในช่วงกว้าง เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนของสารเชิงซ้อนที่ค่าพีเอชต่ำ หรือสูงมาก ๆ แต่วิธีที่จะให้ผลถูกต้องที่สุด และไม่เกิดปัญหาการวัดความเข้มข้น คือ การวัดความเข้มข้นของไอออนทองแดงโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอพซอร์พชัน (AA)

5.2.3 จากผลการทดลอง ในส่วนของการดำเนินการสกัดไอออนทองแดงแบบอนุกรมในงานวิจัยนี้ ควรนำไปประยุกต์สำหรับการดำเนินการสกัดแบบต่อเนื่อง ซึ่งนอกจากจะให้ร้อยละของการสกัดสูงแล้วยังสะดวกต่อการดำเนินงาน และอาจนำไปปรับปรุงให้สามารถใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรมอีกด้วย



## รายการอ้างอิง

จันทร์ภา ชัยมงคล, ผศ. อนินทรีชเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2525.

ธีระ อนุกุลประเสริฐ, ชูมาวดี สิงหนิยม, และพรทิพย์ จักรวิชัยธำรง. การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการสกัดแยกไอออนโคบอลต์ออกจากไอออนนิกเกิลในสารละลายกรดเกลือเจือจางโดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

นภกร ชัมพิพิช. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Membrane technology. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.

รัตนา จิระรัตนานนท์, รศ.ดร. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ไทยเล็ง, 2543.

ไวยวิทย์ อัครเรศวิมาน, สมนึก ศรีเสริมสิน, และเอกสิทธิ์ เรืองรัตน์. การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการสกัดแบบกะของไอออนโคบอลต์ในสารละลายกรดเกลือด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทยและ World Environment Center. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. (ม.ป.ท.), 2535.

Bailes, P.J.; Hanson, C.; and Bitghes, M.A. **Liquid-liquid extraction : metals**. University of Bradford, England, 1976.

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Biswas, R.K.; Habib, M.A.; and Islam, M.N. Some physicochemical properties of (D2EHPA).1.distribution, dimerization, and acid dissociation constants of D2EHPA in a kerosene/0.10 kmol m<sup>-3</sup> (Na<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>)Cl<sup>-</sup> system and the extraction of Mn(II). Industrial Engineering and Chemical Research 39 (2000) : 155-160.
- de Gyves, J.; and de San Miguel, E.R. Metal ion separations by supported liquid membranes. Industrial Engineering and Chemical Research 38 (1999) : 2182-2202.
- de Haan, A.B.; Bartels, P.V.; and de Graauw, J. Extraction of metal ions from waste water : Modelling of the mass transfer in a supported liquid-membrane process. Journal of Membrane Science 45 (1989) : 281-297.
- Hu, S.B.; and Wiencek, J.M. Emulsion-liquid-membrane extraction of copper using a hollow-fiber contactor. AIChE Journal 44 (March 1998) : 570-581.
- Ihm, S.; Lee, H.; and Lee, D. Kinetic study of the extraction of copper(II) by di(2-ethylhexyl) phosphoric acid in a lewis-type cell. Journal of Membrane Science 37 (1988) : 181-191.
- Koros, W.J. Membranes : Learning a lesson from nature. Chemical Engineering Progress (October 1995) : 68-81.
- Kumar, A.; and Sastre, A.M. Hollow fiber supported liquid membrane for the separation/concentration of Gold(I) from aqueous cyanide media : modeling and mass transfer evaluation. Industrial Engineering and Chemical Research 39 (2000) : 146-154.

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

Lanoutte, K.H. **Heavy metals removal.** in Primary treatment methods, pp.116-123. Industrial Pollution Control, Inc., 1977.

Loiacono, O.; Drioli, E.; and Molinari, R. **Metal ion separation and concentration with supported liquid membranes.** Journal of Membrane Science 28 (1986) : 123-138.

Middleman, S. An introduction to mass and heat transfer : principle of analysis and design. the United States of America : John Wiley and Sons, Inc.,1998.

Noble, R.D.; and Koval, C.A. **Facilitated transport membrane systems.** Chemical Engineering Progress (March 1989) : 58-70.

O'Hara, P.A.; and Bohrer, M.P. **Supported liquid membranes for copper transport.** Journal of Membrane Science 44 (1989) : 273-287.

Plucinski, P.; and Nitsch, W. **The calculation of permeation rates through supported liquid membranes based on the kinetic of liquid-liquid extraction.** Journal of Membrane Science 39 (1988) : 43-59.

Schulz, G. **Separation techniques with supported liquid membranes.** Desalination 68 (1988) : 191-202.

Takeuchi, H.; Takahashi, K.; and Goto, W. **Some observations on the stability of supported liquid membranes.** Journal of Membrane Science 34 (1987) : 19-31.

<http://www.commodore.com>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

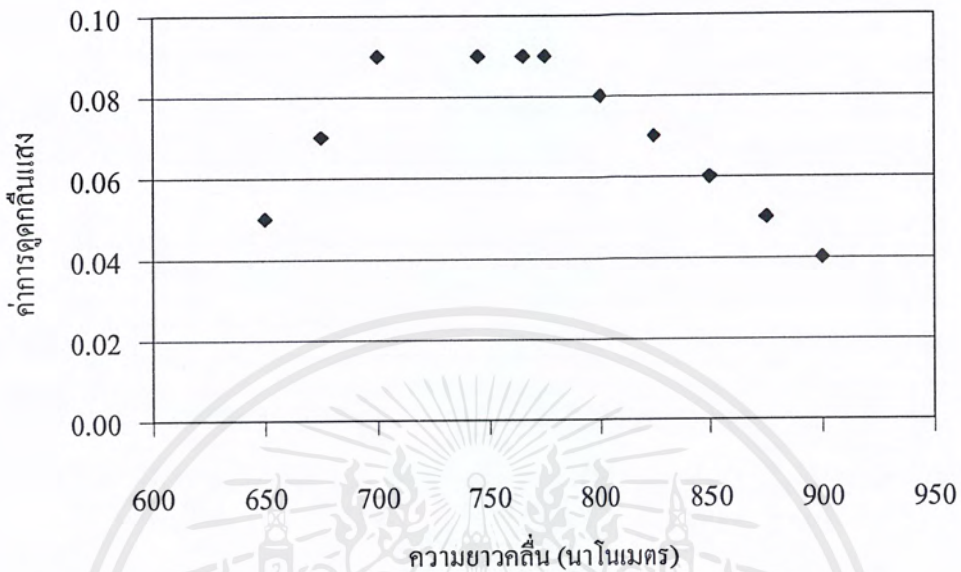
การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนทองแดง โดยใช้  
เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

1. การทดลองหาค่าความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด  
เพื่อให้การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนทองแดงมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยได้ผลดัง  
ตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ ไอออนทองแดงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

ความยาวคลื่น(นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
650	0.05
675	0.07
700	0.09
745	0.09
765	0.09
775	0.09
800	0.08
825	0.07
850	0.06
875	0.05
900	0.04

และแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ก.1 .



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น และค่าการดูดกลืนแสง

จากกราฟพบว่าค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 745 นาโนเมตร ดังนั้นจึงใช้ความยาวคลื่นที่ค่านี้

## 2. การเตรียมสารมาตรฐาน ในการสร้างกราฟสอบเทียบมาตรฐาน (calibration curve)

ต้องใช้สารต่าง ๆ ดังนี้

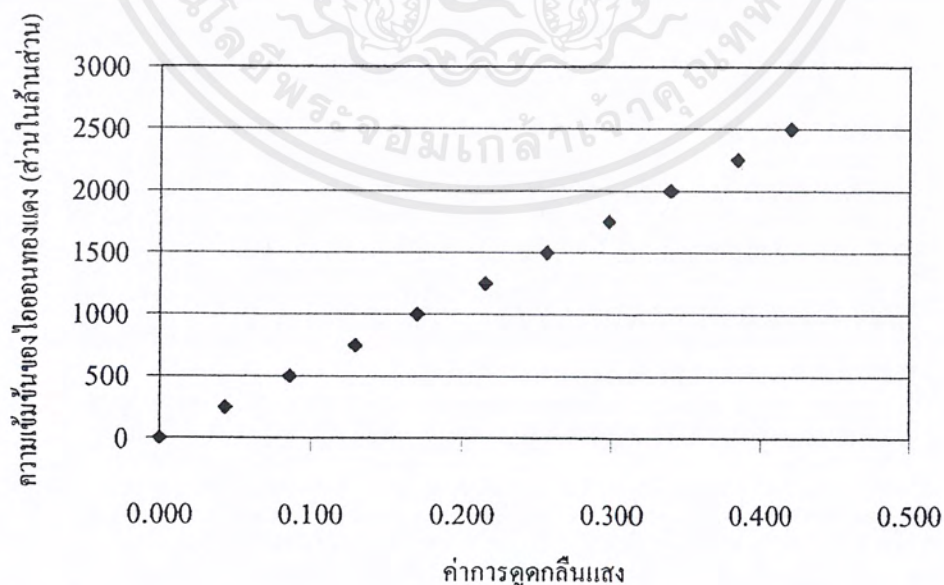
- 1) สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) น้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 3) สารละลายบัฟเฟอร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 5) 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) สารละลาย EDTA เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร 4 ลูกบาศก์เซนติเมตร

โดยผสมให้เข้ากันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 745 นาโนเมตร ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของไอออนทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
250	0.043
500	0.086
750	0.129
1000	0.170
1250	0.215
1500	0.256
1750	0.298
2000	0.340
2250	0.384
2500	0.420

และแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ก.2

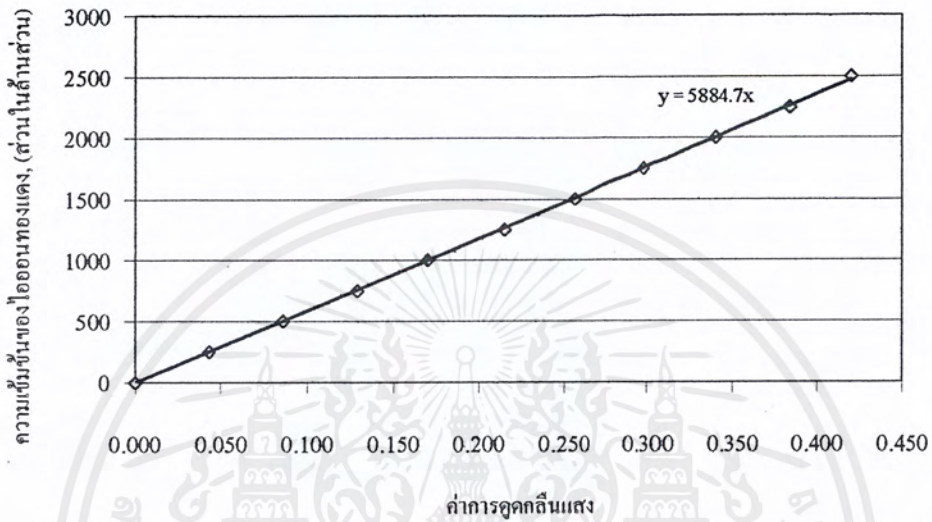


รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดง และค่าการดูดกลืน

แสงเพิ่มเติมเส้นแนวโน้มเพื่อหาสมการเส้นตรงที่จะนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้กราฟเส้นตรงพร้อมสมการดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 กราฟสอบเทียบมาตรฐานของไอออนทองแดง และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของไอออนทองแดง

3. การเตรียมสารตัวอย่างในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนทองแดงจากการทดลอง  
ต้องใช้สารต่าง ๆ ดังนี้

- 1) สารตัวอย่าง (จากการทดลอง) 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) น้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 3) สารละลายบัฟเฟอร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 5) 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) สารละลาย EDTA เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร 4 ลูกบาศก์เซนติเมตร

โดยผสมให้เข้ากันแล้วนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 745 นาโนเมตร

## ภาคผนวก ข

### การวัดค่าพีเอชโดยใช้เครื่องวัดพีเอช

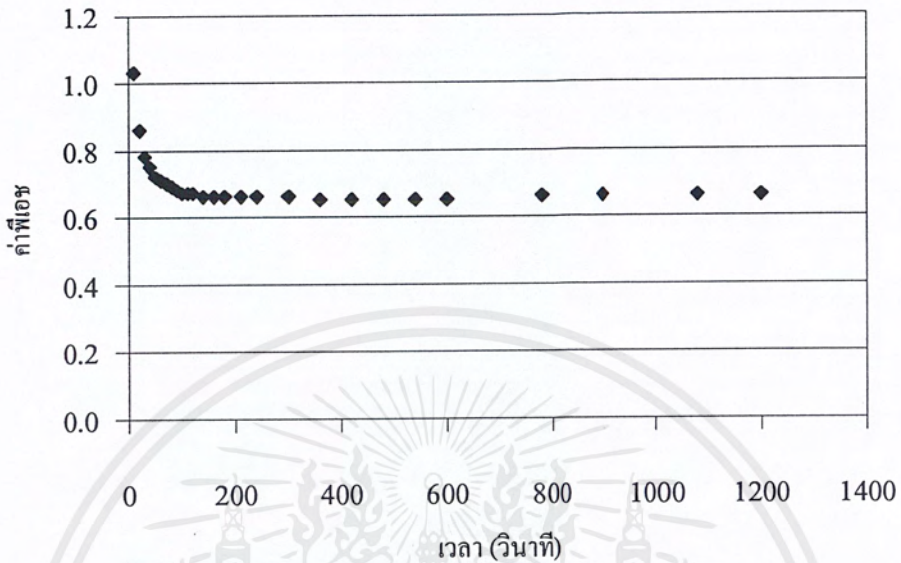
เนื่องจากเครื่องวัดค่าพีเอชที่ใช้ ในช่วงแรกจะให้ค่าพีเอชที่ไม่คงที่ ทำให้ต้องรอนานและให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก จึงทำการทดลองหาเวลาในการวัดที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าพีเอชที่วัดได้คงที่ และถูกต้องเพียงพอ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่อ่านได้จากเครื่องวัดค่าพีเอช

เวลา(นาท)	ค่าพีเอช	เวลา(นาท)	ค่าพีเอช
10	1.03	180	0.66
20	0.86	210	0.66
30	0.78	240	0.66
40	0.75	300	0.66
50	0.72	360	0.65
60	0.71	420	0.65
70	0.7	480	0.65
80	0.69	540	0.65
90	0.68	600	0.65
100	0.67	780	0.66
110	0.67	900	0.66
120	0.67	1080	0.66
140	0.66	1200	0.66
160	0.66		

และแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ข.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่อ่านได้ และเวลา

จากกราฟพบว่าในช่วงแรกค่าพีเอชจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเริ่มคงที่ที่เวลา 150 วินาที จึงใช้เวลาในการวัดค่าพีเอชทั้งหมด 150 วินาที และมีการสอบเทียบมาตรฐานโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 4.00 และ 7.01 ก่อนทำการวัดด้วย เพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่ถูกต้อง

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

1. การทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ได้ผลดังตารางที่ ค.1 ค.2 และค.3 สำหรับการทดลองที่สารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0	3.42	0.085	500.20	0.60	0.001	5.88
1	3.09	0.083	488.43	0.62	0.002	11.77
10	2.41	0.078	459.01	0.64	0.008	47.08
20	1.85	0.070	411.93	0.71	0.014	82.39
31	1.24	0.060	353.08	0.76	0.023	135.35
45	0.97	0.048	282.47	0.87	0.031	182.43
55	0.94	0.040	235.39	0.89	0.036	211.85
66	0.92	0.039	229.50	0.90	0.037	217.73
75	0.92	0.039	229.50	0.90	0.038	223.62
90	0.96	0.038	223.62	0.91	0.038	223.62
110	0.96	0.039	229.50	0.88	0.037	217.73
131	0.95	0.039	229.50	0.90	0.038	223.62
150	0.97	0.039	229.50	0.89	0.038	223.62
180	0.94	0.039	229.50	0.87	0.038	223.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้น  
เริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0	304	0.169	994.51	030	0001	5.88
2	290	0.167	982.74	031	0002	11.77
5	285	0.166	976.86	032	0003	17.65
10	273	0.164	965.09	034	0005	29.42
17	259	0.162	953.32	034	0006	35.31
25	237	0.161	947.44	034	0010	58.85
32	227	0.157	923.90	033	0011	64.73
40	199	0.153	900.36	034	0012	70.62
55	1.77	0.155	912.13	033	0013	76.50
70	1.71	0.148	870.94	035	0020	117.69
90	1.59	0.149	876.82	037	0019	111.81
120	1.37	0.142	835.63	039	0023	135.35
180	0.75	0.120	706.16	043	0049	288.35

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้น  
เริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน

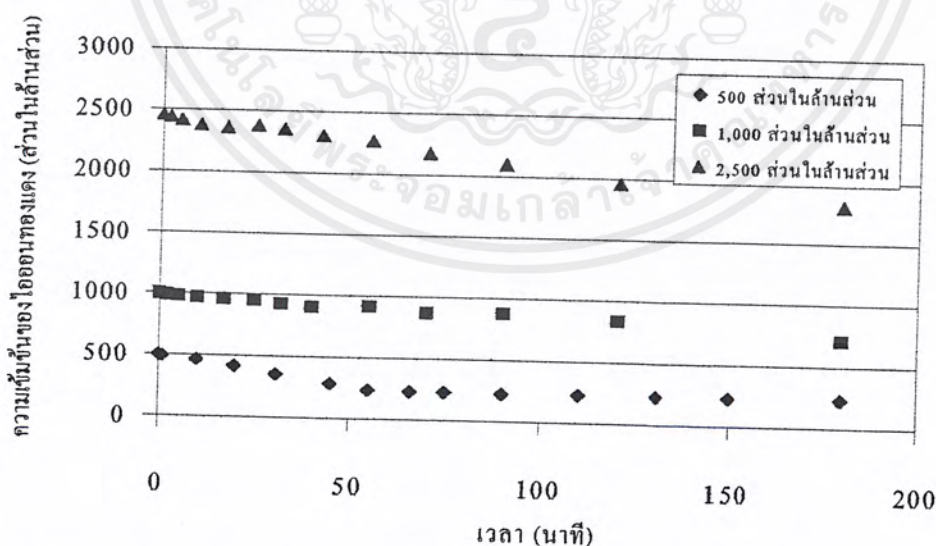
เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0	2.68	0.417	2453.92	0.48	0.000	0.00
2	2.52	0.414	2436.27	0.49	0.001	5.88
5	2.41	0.410	2412.73	0.49	0.003	17.65
10	2.13	0.404	2377.42	0.48	0.007	41.19
17	1.95	0.400	2353.88	0.49	0.008	47.08
25	1.75	0.404	2377.42	0.50	0.011	64.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน

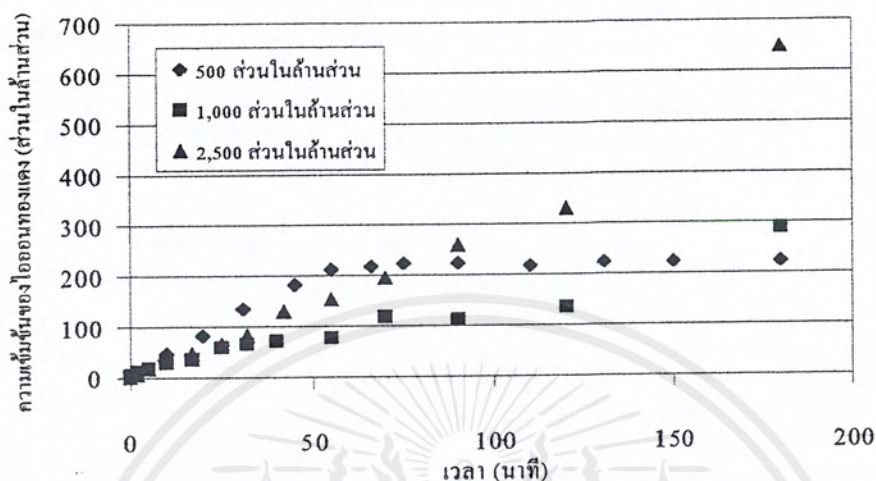
เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
32	1.61	0.399	2348.00	0.50	0.014	82.39
42	1.48	0.391	2300.92	0.50	0.022	129.46
55	1.24	0.385	2265.61	0.51	0.026	153.00
70	1.10	0.369	2171.45	0.51	0.033	194.20
90	1.01	0.356	2094.95	0.52	0.044	258.93
120	0.92	0.332	1953.72	0.53	0.056	329.54
180	0.77	0.306	1800.72	0.53	0.110	647.32

โดยความเข้มข้นของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.1 และ ค.2 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายศรีย ตามลำดับ



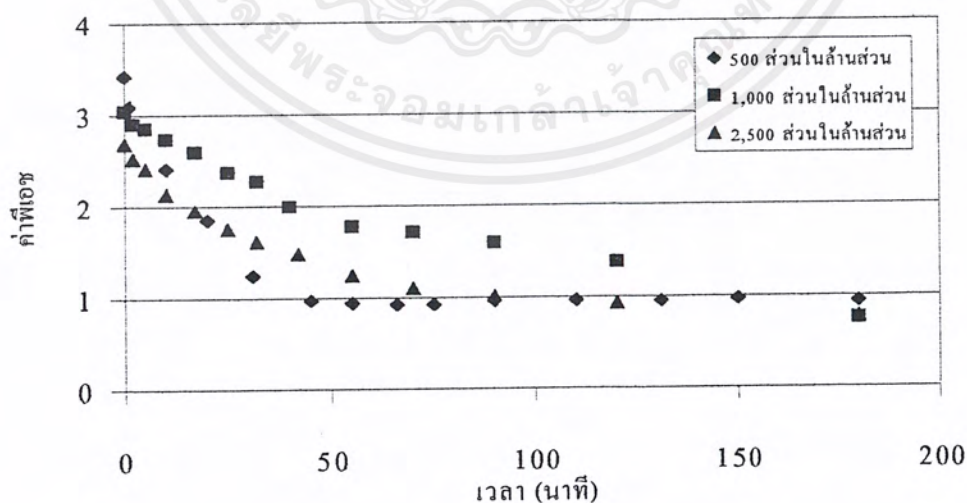
รูปที่ ค.1 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



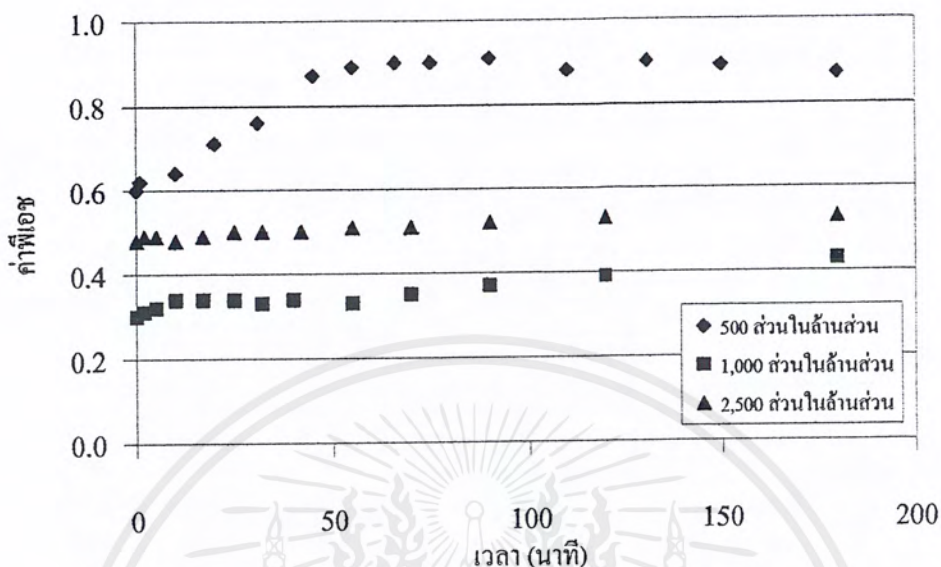
รูปที่ ค.2 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

และค่าพีเอชแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.3 และ ค.4 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ตามลำดับ



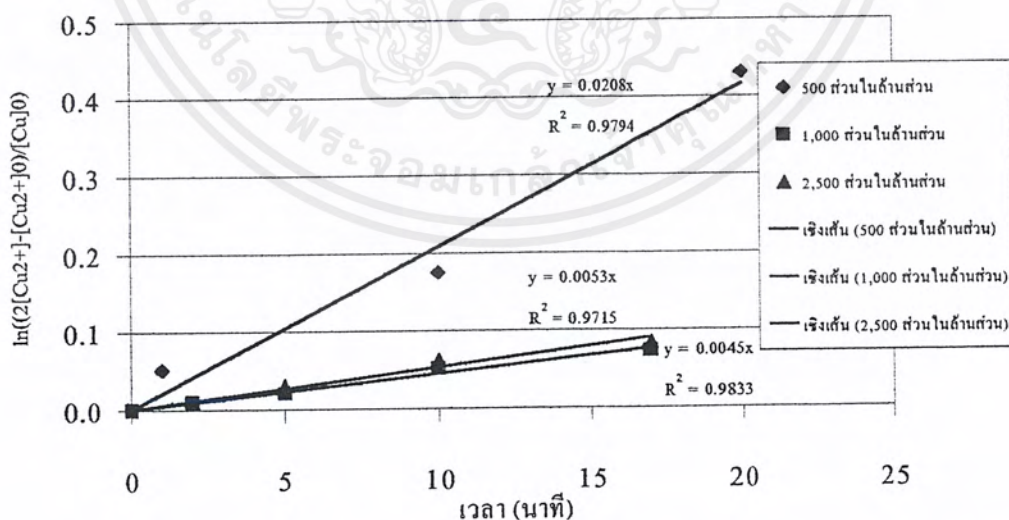
รูปที่ ค.3 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ได้ผลดังตารางที่ ค.4 ค.5 และ ค.6 สำหรับการทดลองที่สารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
000	290	0081	47666	-003	0000	000
200	206	0078	45901	000	0002	11.77
500	157	0077	453.12	001	0004	23.54
1025	087	0072	423.70	004	0010	58.85
15.00	046	0060	353.08	011	0025	147.12
20.00	026	0042	247.16	017	0037	217.73
25.00	026	0040	235.39	022	0041	241.27
30.00	026	0040	235.39	022	0040	235.39
35.00	022	0041	241.27	028	0042	247.16
40.00	023	0043	253.04	018	0042	247.16
45.50	026	0039	229.50	020	0042	247.16

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.00	2.21	0.160	941.55	0.12	0.001	5.88
2.50	2.19	0.155	912.13	0.20	0.006	35.31
5.00	2.09	0.150	882.71	0.23	0.011	64.73
10.00	1.94	0.144	847.40	0.24	0.021	123.58
15.00	1.86	0.141	829.74	0.19	0.022	129.46
20.00	1.77	0.138	812.09	0.16	0.028	164.77

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

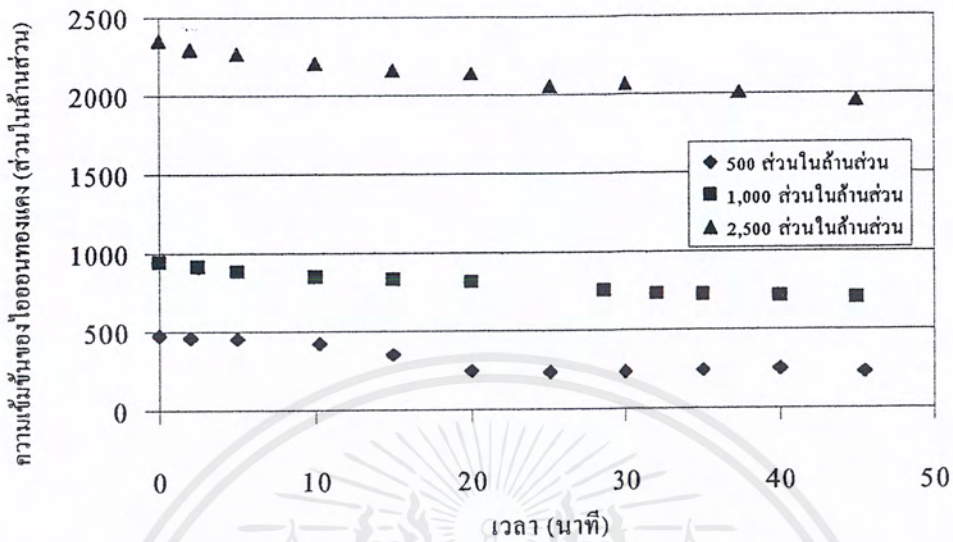
เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
28.50	1.66	0.128	753.24	0.24	0.036	211.85
32.00	1.60	0.124	729.70	0.22	0.037	217.73
35.00	1.54	0.123	723.82	0.20	0.040	235.39
40.00	1.42	0.121	712.05	0.23	0.042	247.16
45.00	1.22	0.119	700.28	0.24	0.045	264.81

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน

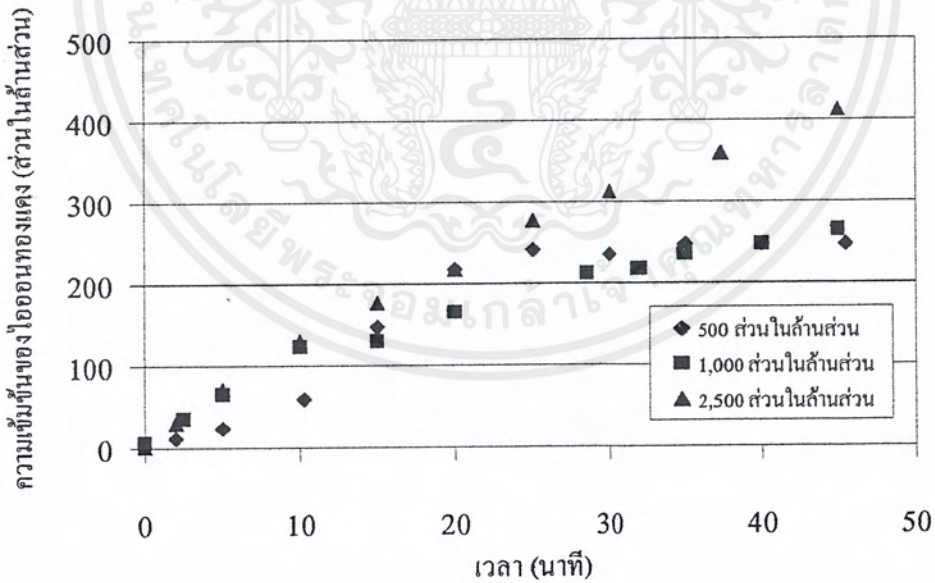
เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.00	2.48	0.399	2348.00	0.20	0.000	0.00
2.00	2.21	0.390	2295.03	0.22	0.005	29.42
5.00	2.02	0.385	2265.61	0.22	0.012	70.62
10.00	1.87	0.375	2206.76	0.24	0.022	129.46
15.00	1.79	0.367	2159.68	0.31	0.030	176.54
20.00	1.68	0.363	2136.15	0.21	0.037	217.73
25.00	1.57	0.349	2053.76	0.27	0.047	276.58
30.00	1.40	0.351	2065.53	0.28	0.053	311.89
37.33	1.22	0.341	2006.68	0.27	0.061	358.97
45.00	1.02	0.332	1953.72	0.33	0.070	411.93

โดยความเข้มข้นของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.6 และ ค.7 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายศรีย ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

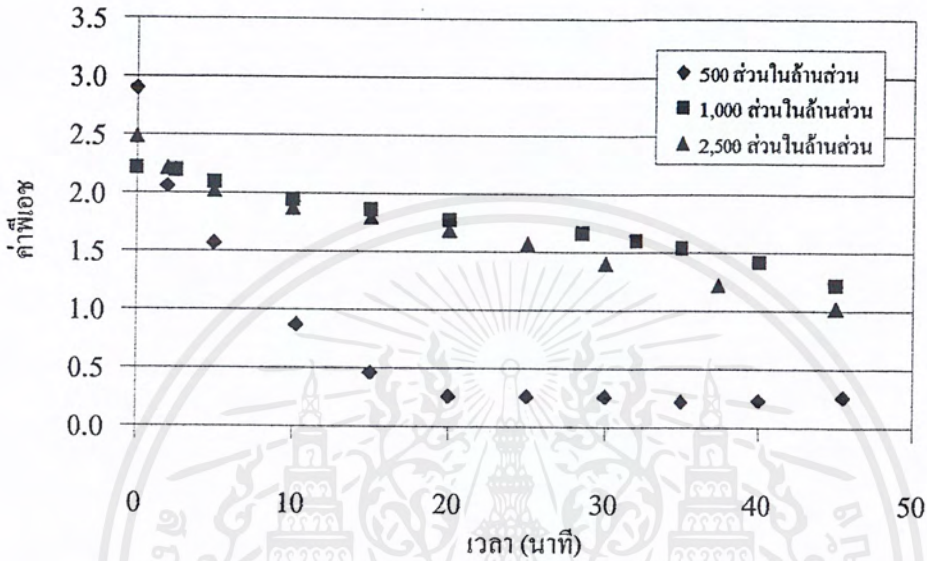


รูปที่ ๓.๖ กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

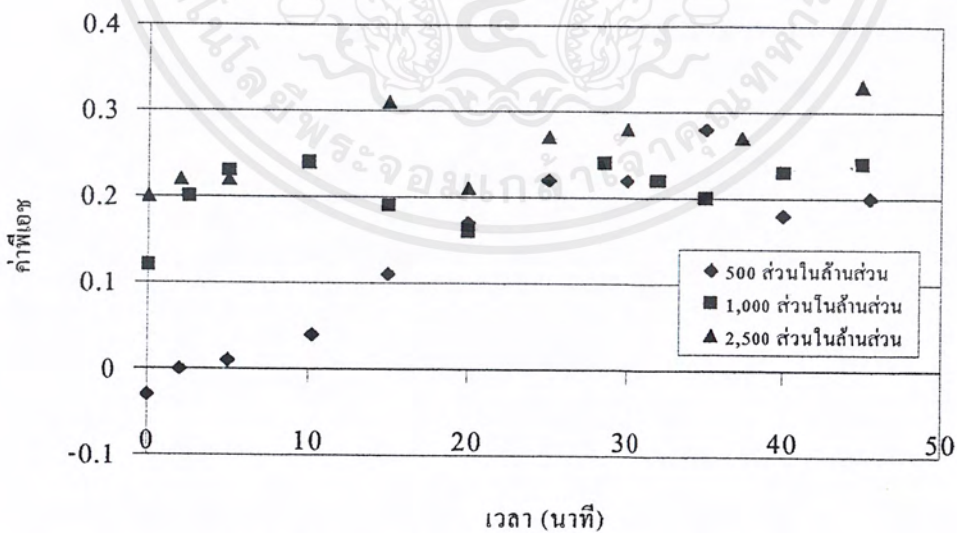


รูปที่ ๓.๗ กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

และ ค่าพีเอชแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.8 และ ค.9 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ตามลำดับ



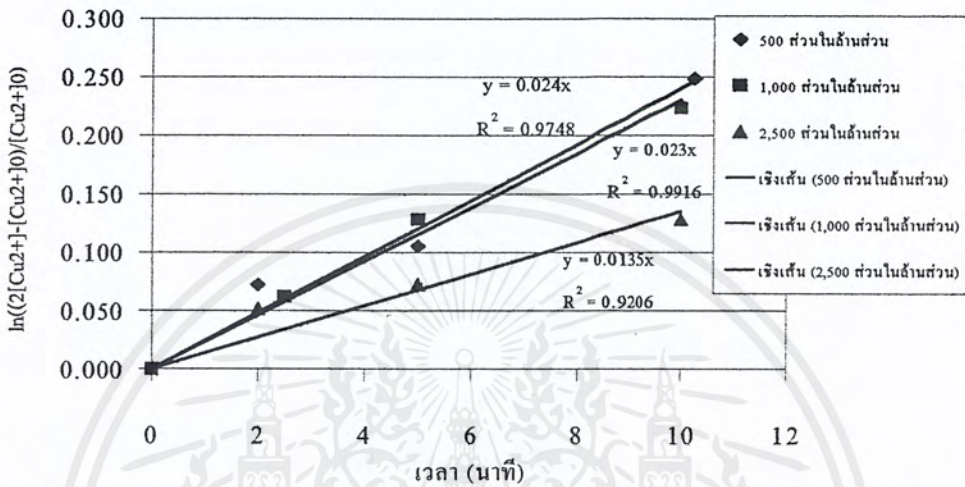
รูปที่ ค.8 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ ค.9 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตรีป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.10 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายศตริป ตามลำดับ



รูปที่ ค.10 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

3. การทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ได้ผลดังตารางที่ ค.7 ค.8 และ ค.9 สำหรับการทดลองที่สารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศตริป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
00	3.28	0.089	523.74	0.54	0.001	588
100	2.31	0.071	417.81	0.55	0.017	100.04
250	2.13	0.060	353.08	0.56	0.022	129.46
450	1.92	0.054	317.77	0.57	0.030	176.54
450	3.07	0.055	323.66	0.52	0.002	11.77
550	2.48	0.045	264.81	0.60	0.010	58.85

ตารางที่ ค.7 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
700	216	0086	211.85	059	0015	8827
900	156	0084	200.08	055	0019	111.81
900	3.15	0087	217.73	063	0008	1765
1000	248	0028	164.77	065	0009	5296
1150	151	0024	141.23	065	0014	8239
1350	098	0024	141.23	072	0014	8239

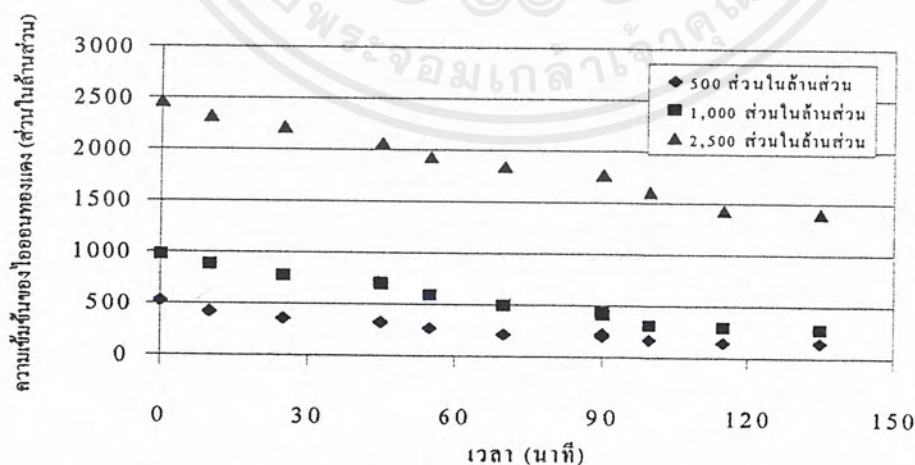
ตารางที่ ค.8 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0	3.07	0.165	970.98	0.64	0	0.00
10	236	0.149	876.82	0.65	0017	100.04
25	212	0.131	770.90	0.65	0029	170.66
45	195	0.119	700.28	0.68	0042	247.16
45.1	29	0.117	688.51	0.67	0002	11.77
55	23	0.099	582.59	0.67	0017	100.04
70	209	0.083	488.43	0.67	0033	194.20
90	193	0.073	429.58	0.7	0041	241.27
90.1	3.17	0.069	406.04	0.68	0003	17.65
100	232	0.052	306.00	0.68	0012	70.62
115	203	0.049	288.35	0.69	002	117.69
135	1.78	0.046	270.70	0.76	0025	147.12

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน

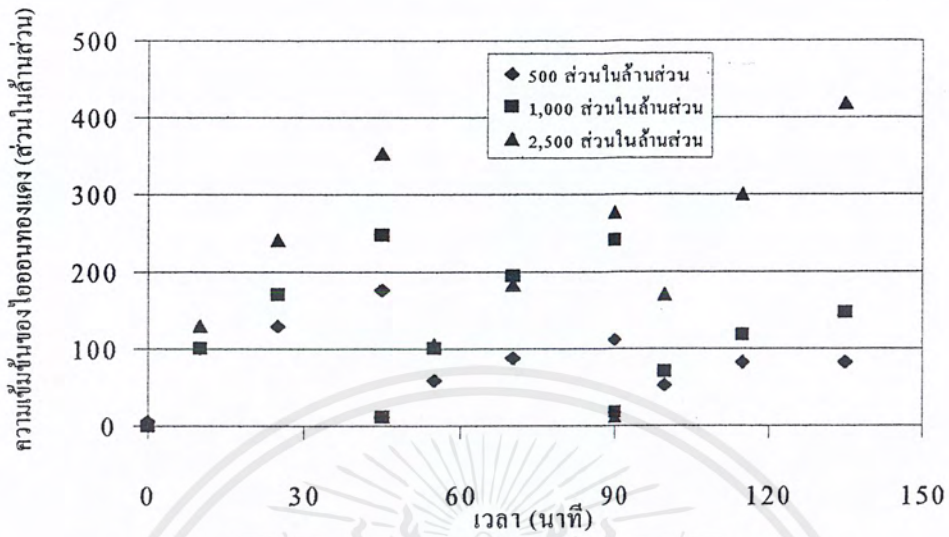
เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรียป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.0	3.09	0.417	2453.92	0.74	0.001	5.88
10.0	2.33	0.393	2312.69	0.70	0.022	129.46
25.0	2.08	0.375	2206.76	0.70	0.041	241.27
45.0	1.94	0.349	2053.76	0.69	0.060	353.08
45.1	2.80	0.349	2053.76	0.73	0.002	11.77
55.0	2.13	0.327	1924.30	0.76	0.018	105.92
70.0	1.85	0.312	1836.03	0.77	0.031	182.43
90.0	1.68	0.300	1765.41	0.78	0.047	276.58
90.1	3.24	0.300	1765.41	0.80	0.002	11.77
100.0	2.39	0.272	1600.64	0.79	0.029	170.66
115.0	1.90	0.242	1424.10	0.79	0.051	300.12
135.0	1.45	0.237	1394.67	0.79	0.071	417.81

โดยความเข้มข้นของไอออนทองแดง แสดงในรูปภาพ ได้ดังรูปที่ ก.11 และ ก.12 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายศรียป ตามลำดับ



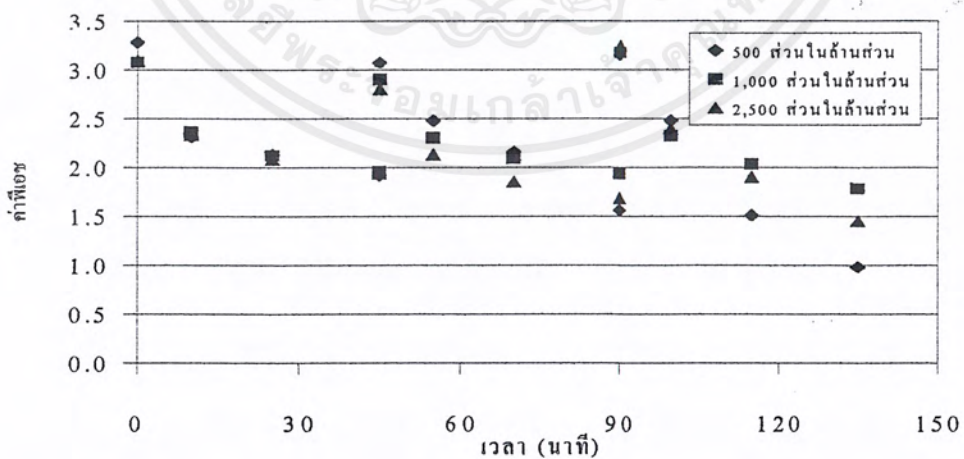
รูปที่ ก.11 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



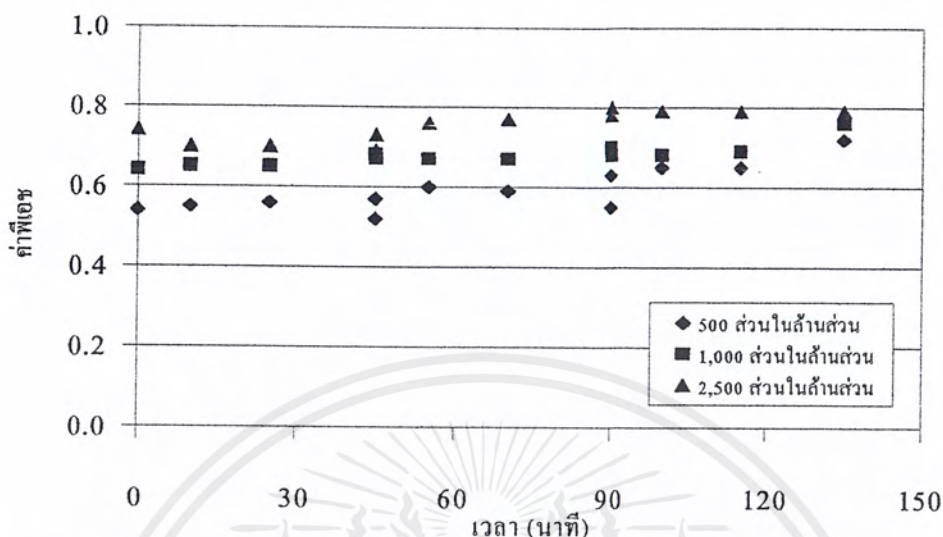
รูปที่ ค.12 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

และค่าพีเอชแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.13 และ ค.14 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ตามลำดับ



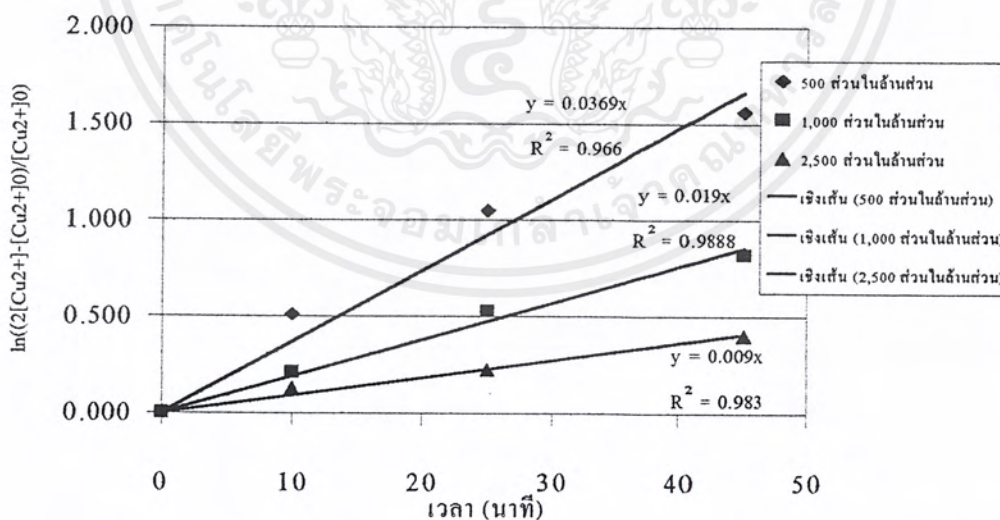
รูปที่ ค.13 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.14 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่างๆ

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.15



รูปที่ ค.15 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่างๆ

4. การทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5 ได้ผลดังตารางที่ ค.10 และ ค.11 สำหรับการทดลองที่ทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน และทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสทั้งสองฝั่งตามลำดับ

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5 เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายป้อน

เวลา (นาท)	สารละลายป้อน			สารละลายสตริป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0	2.69	0.170	1000.40	-0.29	0.003	17.65
3	2.25	0.164	965.09	-0.15	0.007	41.19
6	2.09	0.160	941.55	-0.13	0.011	64.73
9	1.97	0.159	935.67	-0.11	0.016	94.16
11	0.33	0.113	664.97	0.11	0.062	364.85
14	0.19	0.084	494.31	0.09	0.083	488.43
18	0.16	0.094	553.16	0.11	0.084	494.31
21	0.25	0.093	547.28	0.13	0.083	488.43
24	0.19	0.093	547.28	0.16	0.084	494.31
28	0.16	0.093	547.28	0.19	0.085	500.20
31	0.23	0.091	535.51	0.20	0.084	494.31
34	0.21	0.091	535.51	0.22	0.083	488.43
38	0.21	0.091	535.51	0.23	0.085	500.20
41	0.35	0.092	541.39	0.30	0.084	494.31
45	0.32	0.092	541.39	0.35	0.081	476.66

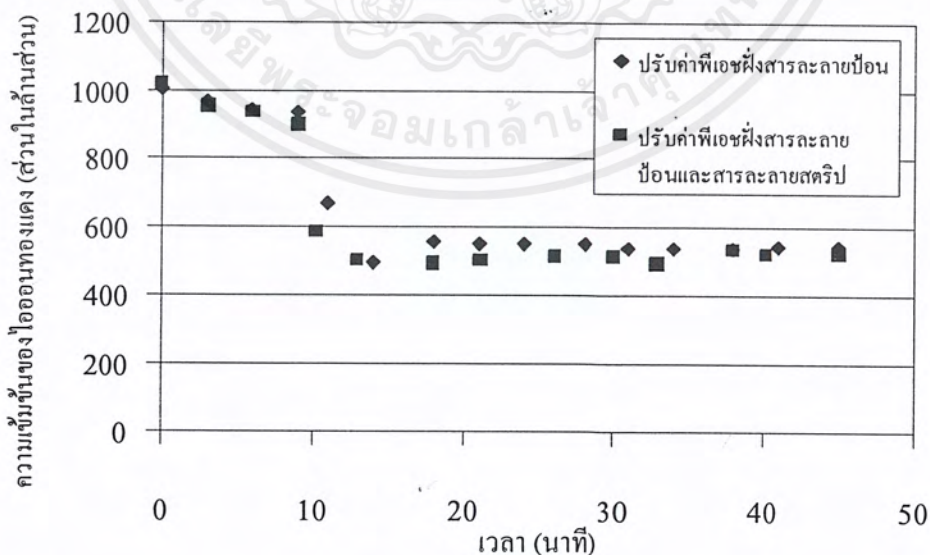
ตารางที่ ค.11 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5 เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเอเควียสทั้งสองด้าน

เวลา (นาท)	สารละลายป้อน			สารละลายสตริป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.00	2.88	0.173	1018.05	0.06	0.009	52.96
3.00	2.40	0.162	953.32	0.06	0.020	117.69
6.00	2.03	0.159	935.67	0.07	0.024	141.23
9.00	1.91	0.153	900.36	0.08	0.029	170.66
10.25	0.74	0.099	582.59	0.34	0.088	517.85

ตารางที่ ค.11 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5 เมื่อทำการปรับค่าพีเอชของ สารละลายเอควิวสทั้งสองด้าน

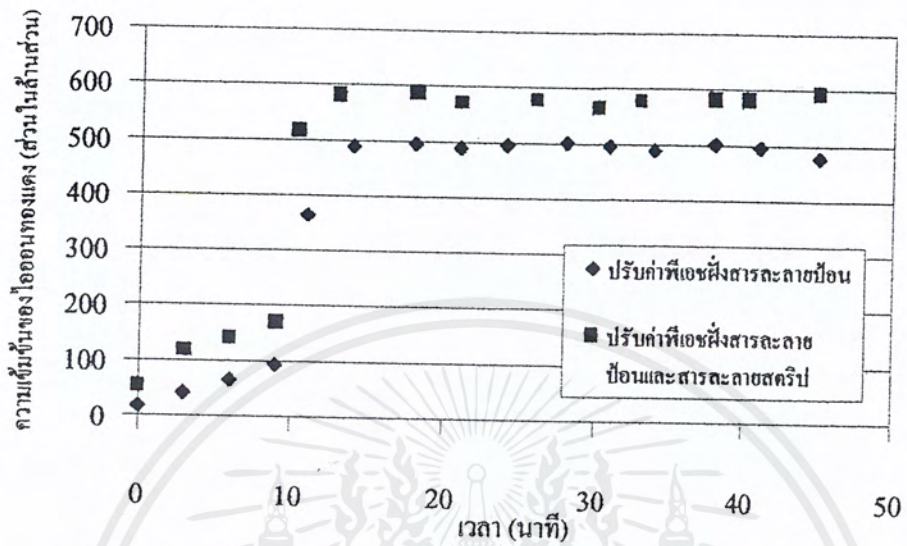
เวลา (นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายสตรีป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
13.00	0.49	0.085	500.20	0.46	0.099	582.59
18.00	0.49	0.084	494.31	0.46	0.100	588.47
21.00	0.52	0.085	500.20	0.34	0.097	570.82
26.00	0.46	0.087	511.97	0.38	0.098	576.70
30.08	0.63	0.087	511.97	0.31	0.096	564.93
33.00	0.44	0.084	494.31	0.42	0.098	576.70
38.00	0.43	0.090	529.62	0.44	0.099	582.59
40.20	0.97	0.088	517.85	0.34	0.099	582.59
45.00	0.57	0.088	517.85	0.59	0.101	594.35

โดยความเข้มข้นของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.16 และ ค.17 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ตามลำดับ



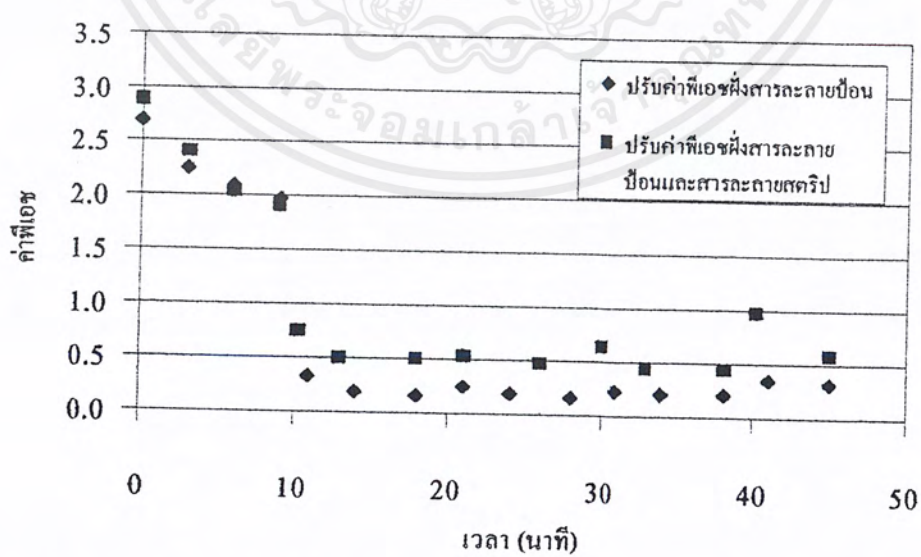
รูปที่ ค.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



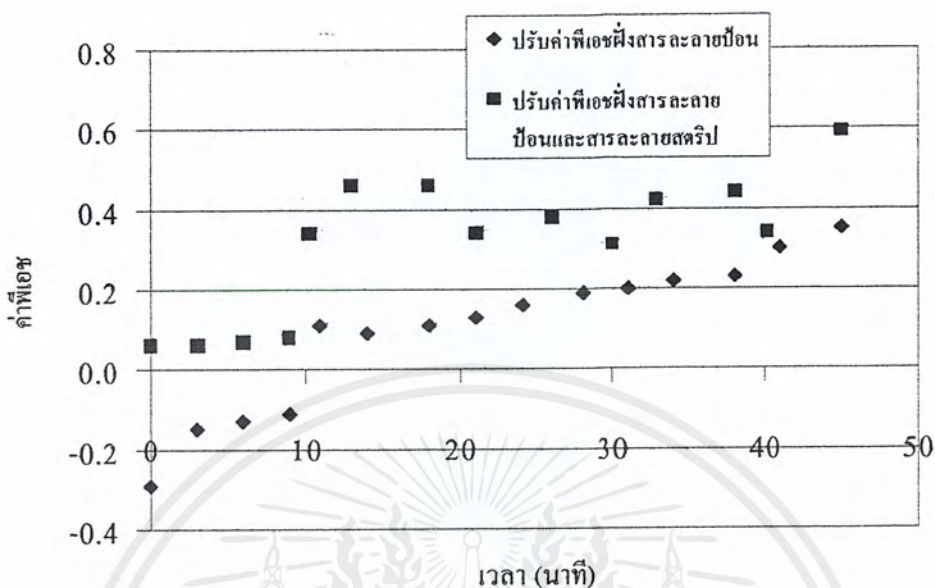
รูปที่ ค.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5

และค่าพีเอชแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.18 และ ค.19 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ตามลำดับ



รูปที่ ค.18 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.19 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตรีป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.5

5. การทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ได้ผลดังตารางที่ ค.12 ค.13 และ ค.14 สำหรับการทดลองที่ สารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 1,000 และ 2,500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ตารางที่ ค.12 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้น เริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายสตรีป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.00	3.05	0.075	441.35	0.34	0.005	29.42
4.00	2.41	0.070	411.93	0.36	0.011	64.73
9.00	0.99	0.065	382.51	0.36	0.013	76.50
10.50	0.57	0.046	270.70	0.43	0.026	153.00
14.00	0.50	0.038	223.62	0.45	0.028	164.77
19.00	0.48	0.035	205.96	0.47	0.030	176.54
20.25	0.53	0.034	200.08	0.42	0.034	200.08
24.00	0.49	0.030	176.54	0.45	0.042	247.16
29.00	0.46	0.024	141.23	0.45	0.046	270.70
30.50	0.48	0.024	141.23	0.43	0.054	317.77

ตารางที่ ก.12 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
34.00	0.45	0.023	135.35	0.44	0.055	323.66
40.00	0.44	0.023	135.35	0.45	0.055	323.66
40.00	2.25	0.026	153.00	0.38	0.009	52.96
46.00	2.01	0.023	135.35	0.47	0.013	76.50
56.00	0.79	0.015	88.27	0.48	0.020	117.69
66.00	0.75	0.012	70.62	0.51	0.020	117.69
70.00	0.70	0.010	58.85	0.52	0.024	141.23
70.00	2.61	0.016	94.16	0.47	0.010	58.85
76.00	2.41	0.010	58.85	0.47	0.016	94.16
86.00	1.27	0.008	47.08	0.48	0.019	111.81
96.00	1.15	0.006	35.31	0.44	0.021	123.58
100.00	1.07	0.006	35.31	0.44	0.021	123.58

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศรีย		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.00	2.62	0.160	941.55	0.35	0.003	17.65
4.00	2.13	0.154	906.24	0.38	0.009	52.96
9.00	2.00	0.144	847.40	0.39	0.016	94.16
10.17	1.17	0.138	812.09	0.36	0.021	123.58
14.00	0.71	0.128	753.24	0.32	0.030	176.54
19.00	0.67	0.120	706.16	0.36	0.035	205.96
20.17	0.72	0.114	670.86	0.33	0.041	241.27
24.00	0.70	0.112	659.09	0.35	0.046	270.70
30.00	0.69	0.109	641.43	0.35	0.049	288.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศตริป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
30.00	2.88	0.112	659.09	0.35	0.003	17.65
36.00	2.66	0.107	629.66	0.37	0.008	47.08
46.00	4.22	0.076	447.24	0.36	0.037	217.73
56.00	3.99	0.041	241.27	0.35	0.068	400.16
60.00	2.88	0.041	241.27	0.35	0.069	406.04
60.00	3.24	0.043	253.04	0.39	0.002	11.77
66.00	2.69	0.036	211.85	0.40	0.009	52.96
76.00	1.01	0.033	194.20	0.41	0.013	76.50
86.00	1.06	0.032	188.31	0.39	0.014	82.39
90.00	1.02	0.032	188.31	0.41	0.014	82.39

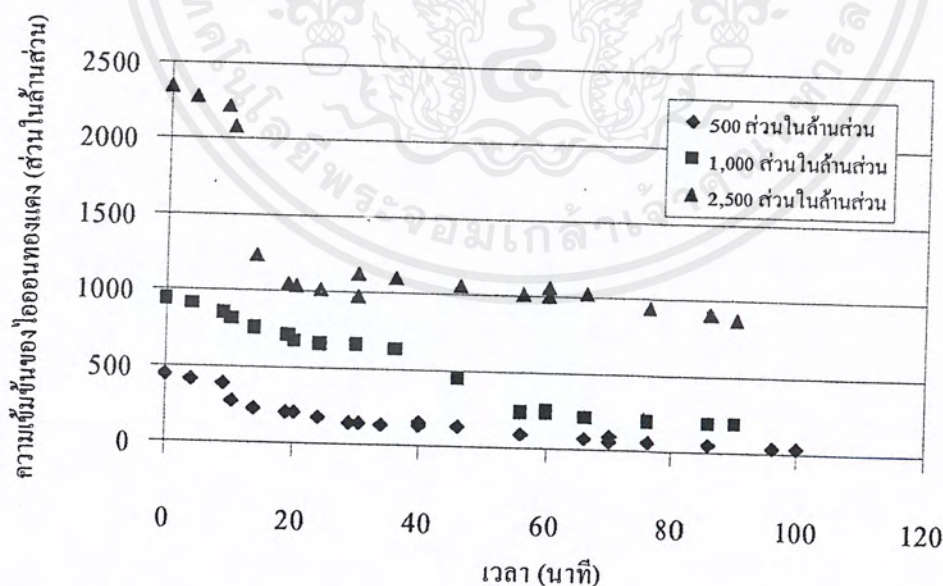
ตารางที่ ค.14 ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน

เวลา(นาที)	สารละลายป้อน			สารละลายศตริป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
0.00	2.52	0.398	2342.11	0.36	0.003	17.65
4.00	1.99	0.387	2277.38	0.39	0.015	88.27
9.00	1.74	0.376	2212.65	0.40	0.026	153.00
10.17	1.01	0.354	2083.18	0.41	0.056	329.54
14.00	0.65	0.210	1235.79	0.46	0.192	1129.86
19.00	0.63	0.179	1053.36	0.47	0.220	1294.63
20.17	0.62	0.176	1035.71	0.45	0.226	1329.94
24.00	0.61	0.172	1012.17	0.46	0.230	1353.48
30.00	0.61	0.165	970.98	0.46	0.237	1394.67
30.00	2.60	0.190	1118.09	0.37	0.004	23.54
36.00	2.48	0.187	1100.44	0.38	0.006	35.31

ตารางที่ ค.14 (ต่อ) ข้อมูลของผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 เมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2,500 ส่วนในล้านส่วน

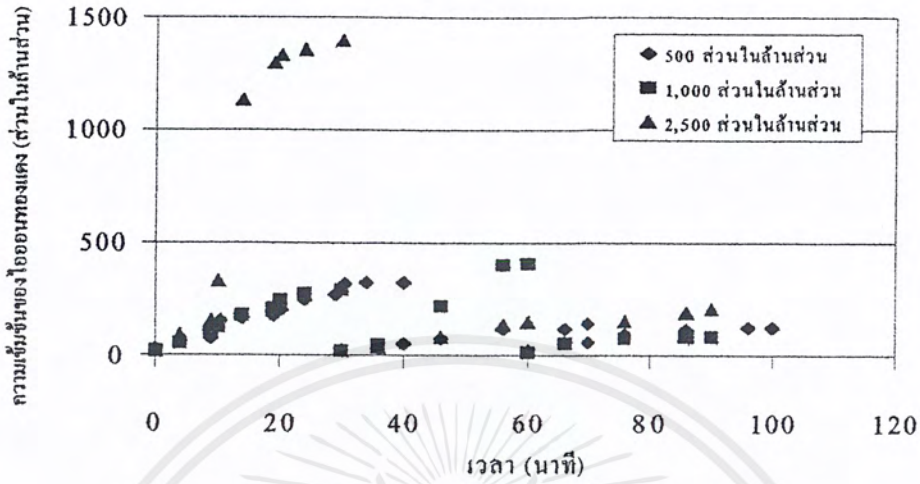
เวลา (นาทีก)	สารละลายป้อน			สารละลายสตรีป		
	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าพีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)
46.00	1.03	0.180	1059.25	0.37	0.014	82.39
56.00	0.96	0.171	1006.28	0.37	0.023	135.35
60.00	0.96	0.170	1000.40	0.36	0.025	147.12
60.00	2.70	0.180	1059.25	0.34	0.004	23.54
66.00	2.33	0.174	1023.94	0.36	0.010	58.85
76.00	1.71	0.159	935.67	0.35	0.026	153.00
86.00	1.57	0.153	900.36	0.34	0.032	188.31
90.00	1.41	0.148	870.94	0.34	0.035	205.96

โดยความเข้มข้นของไอออนทองแดง แสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.20 และ ค.21 สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ตามลำดับ



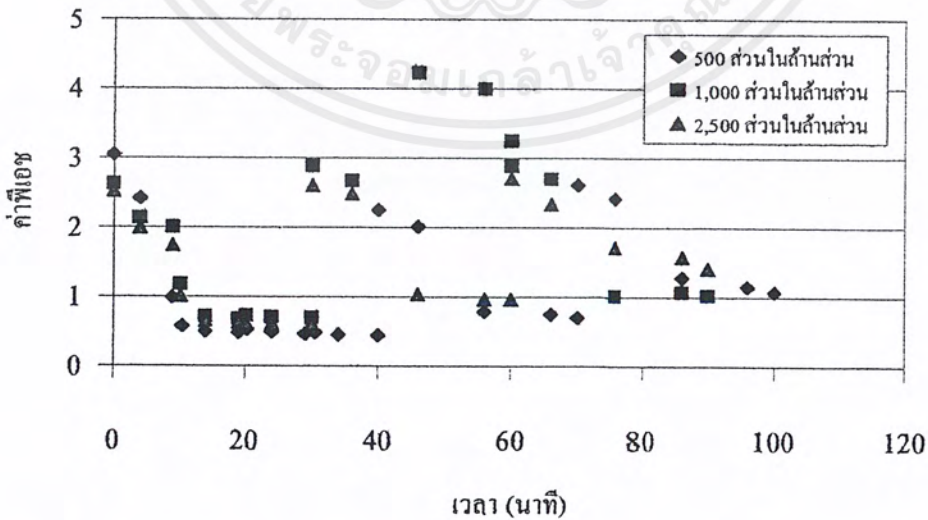
รูปที่ ค.20 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



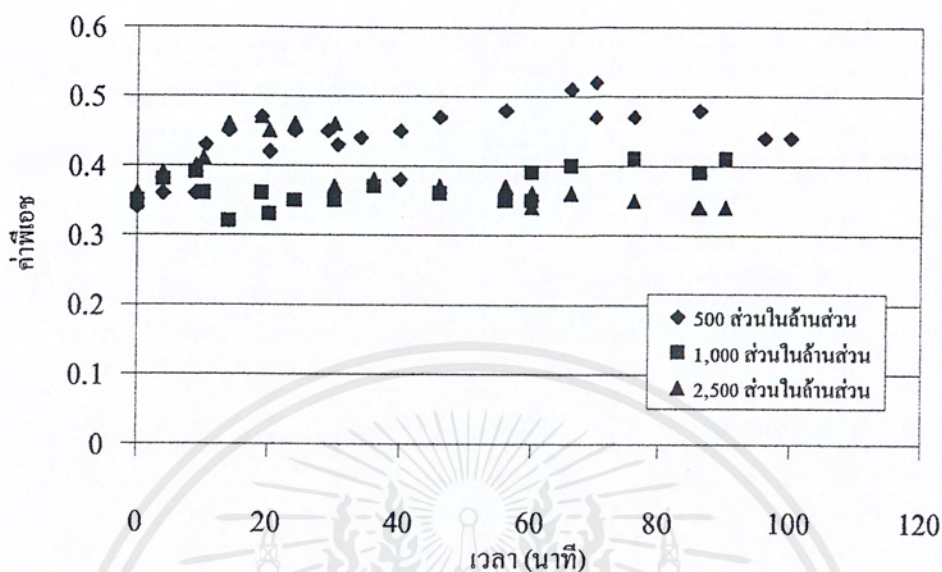
รูปที่ ค.21 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ไอออนทองแดงในสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

และค่าพีเอชแสดงในรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ ค.22 และ ค.23 สำหรับการละลายป้อนและสารละลายสตริป ตามลำดับ



รูปที่ ค.22 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายป้อน สำหรับการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.23 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชของสารละลายสตริป สำหรับการทดลองในหัวข้อที่

3.2.6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### รูปอุปกรณ์การทดลอง

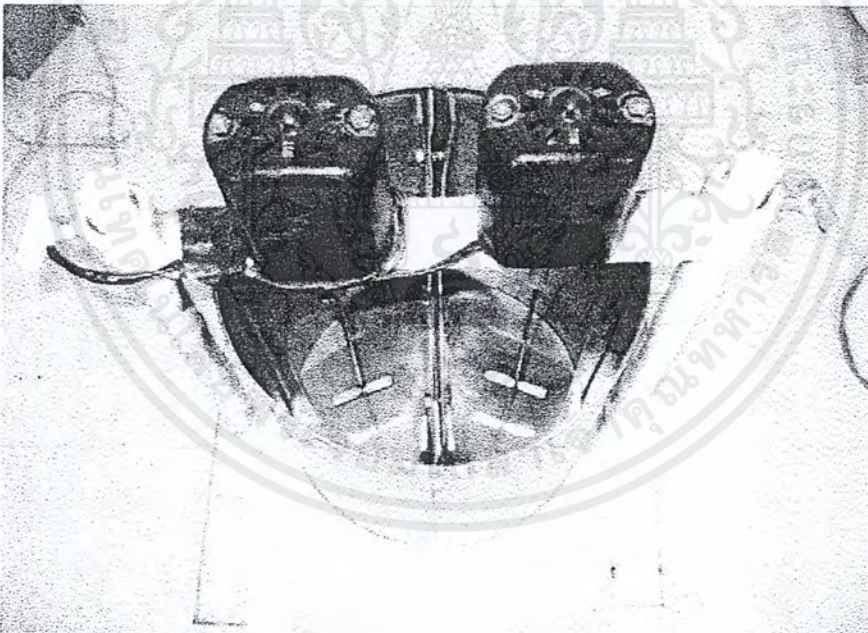
ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ชุดเครื่องปั้นกวน 2 ชุด ได้แก่

#### 1. เครื่องปั้นกวนขนาดใหญ่ ประกอบด้วย

1.1 ถังผสมคนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 เซนติเมตร สูง 25.5 เซนติเมตร กรอบสำหรับ  
ขึงตัวพวงแบบแผ่นด้านในถึง กว้าง 2.5 เซนติเมตร

1.2 มอเตอร์ AC 2 ตัว

1.3 ตัวพวงแบบแผ่น มีพื้นที่สัมผัสสารละลาย 107.2 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ ง.1 เครื่องปั้นกวนขนาดใหญ่

#### 2. เครื่องปั้นกวนขนาดเล็ก ประกอบด้วย

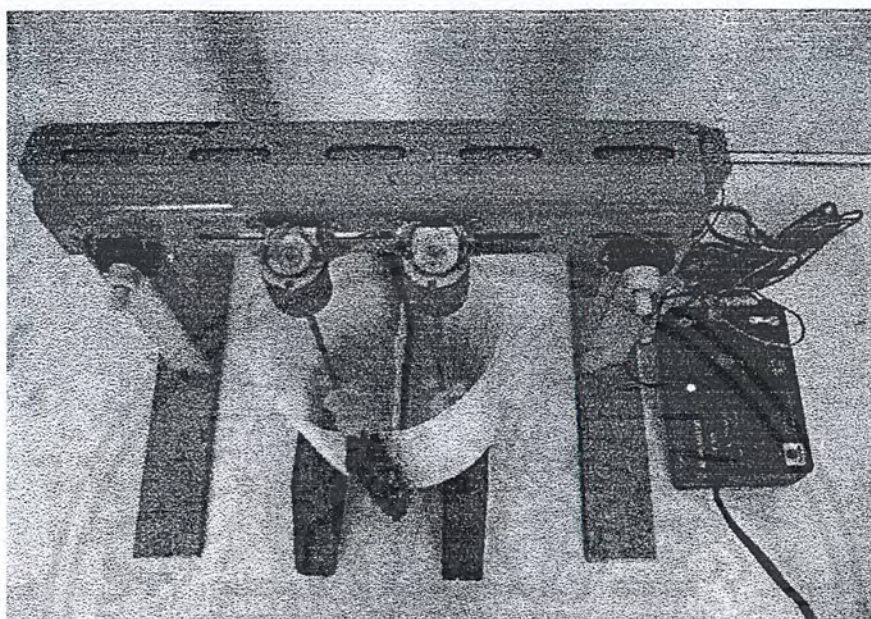
2.1 ถังพลาสติกผลิตจากพอลิโพรพิลีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 เซนติเมตร สูง 14  
เซนติเมตร โดยมีกรอบสำหรับขึงตัวพวงแบบแผ่นด้านนอกของถัง

2.2 มอเตอร์ DC 2 ตัว

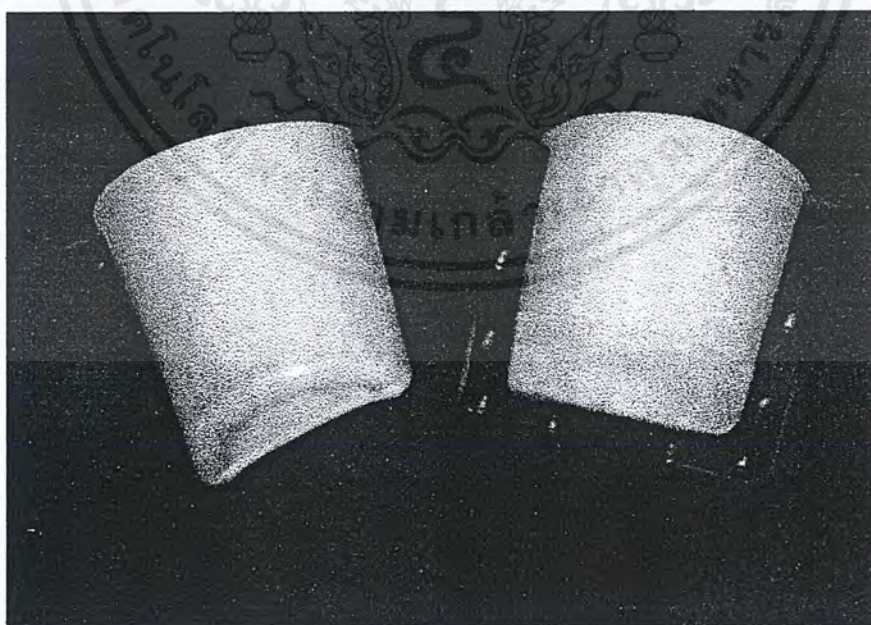
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้ใช้ฟรีโดยไม่คิดค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 ตัว

2.4 ตัวพยางแบบแผ่น มีพื้นที่สัมผัสสารละลาย 30.4 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ ง.2 เครื่องปั่นกววนชุดเล็ก



รูปที่ ง.3 เครื่องปั่นกววนชุดเล็ก แสดงให้เห็นส่วนประกอบภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

### 1. นางสาวฉัฐพร คำรงค์โรจน์วัฒนา

เกิดเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาในโครงการส่งเสริมและพัฒนานักเรียนที่มีความสามารถพิเศษ (สพพ.) จากโรงเรียนศรีอยุธยา ในปีการศึกษา 2539 โดยได้รับรางวัลนักเรียนดีเด่น ประเภทสร้างชื่อเสียงให้กับโรงเรียน จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งจะสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2543

### 2. นางสาวทิพย์รัตน์ เตียงธวัช

เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนศึกษานารี ในปี พ.ศ.2537 โดยได้รับรางวัลนักเรียนดีเด่น ประเภทผลการเรียนดีเด่น และสอบเทียบได้วุฒิการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากศูนย์การศึกษา นอกโรงเรียน โรงเรียนบำรุงวิชา ในปีการศึกษา 2539 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และในปีการศึกษา 2543 ซึ่งเป็นภาคเรียนสุดท้ายของการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้รับทุนการศึกษาเพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาบริหารธุรกิจ จากโครงการส่งเสริมทักษะของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี