

การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแฟ็กเบด
ชนิดโคเคอร์เรนต์และชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน
ในระดับโรงงานต้นแบบ

นาย วุฒิพงศ์ พงศ์จตุรวิทย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-438-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PERFORMANCE COMPARISON OF PACKED-BED CO-CURRENT
AND COUNTER-CURRENT REGENERATION DEMINERALIZATION
SYSTEMS ON THE PROTOTYPE LEVEL**

Mr. Wuthipong Pongjaturavit

**A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Chemical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1996
ISBN 974-635-438-8**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแฟกเบต
ชนิดโคเคอร์เรนต์และชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันใน
ระดับโรงงานต้นแบบ

โดย

วุฒิพงศ์ พงศ์จตุรวิทย์

ภาควิชา

วิศวกรรมเคมี

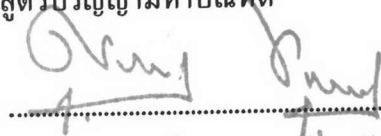
อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

มงคล ศรีเรือง

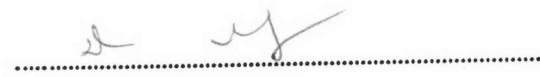
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

ประธานกรรมการ



.....
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา



.....
(นายมงคล ศรีเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



.....
(อาจารย์ ดร.สมประสงค์ ศรีชัย)

กรรมการ

วุฒิพงศ์ พงศ์จตุรวิทย์ : การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแพ็กเบดชนิดโคเคอร์เรนต์และชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันในระดับโรงงานต้นแบบ (PERFORMANCE COMPARISON OF PACKED-BED CO-CURRENT AND COUNTER-CURRENT REGENERATION DEMINERALIZATION SYSTEMS ON THE PROTOTYPE LEVEL) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล , อ.ที่ปรึกษาร่วม : นายมงคล ศรีเรือง, 258 หน้า ISBN 974-635-438-8

การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบแพ็กเบดชนิดโคเคอร์เรนต์และชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความสามารถผลิตน้ำบริสุทธิ์ของทั้งสองชนิดในเงื่อนไขที่เหมือนกัน ระบบที่ใช้ทดลองประกอบด้วยหอเรซินประจุบวกและหอเรซินประจุลบต่อกันในลักษณะอนุกรมเหมือนกันทั้งสองระบบ

การทดลองกระทำที่อัตราการจ่ายน้ำ 100 ถึง 300 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งในกรณีเรซินประจุบวกเทียบเท่ากับความเร็วเชิงเส้น 13.67 ถึง 41.02 เมตรต่อชั่วโมง และในกรณีเรซินประจุลบเทียบเท่ากับความเร็วเชิงเส้น 6.45 ถึง 19.35 เมตรต่อชั่วโมง

ผลการวิจัยทดลอง พบว่า ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน มีสมรรถนะบางอย่างที่เหนือกว่าชนิดโคเคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน แต่มีบางอย่างที่ไม่เห็นความแตกต่างชัดเจน

ในแง่ความสามารถผลิตน้ำต่อรอบการทำงาน ในกรณีเรซินประจุบวก พบว่า ระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันดีกว่า 5.77 - 7.69 % แต่ในกรณีเรซินประจุลบไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ในทำนองเดียวกันในแง่ประสิทธิภาพการล้างสารแลกเปลี่ยนและความสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ล้างสารแลกเปลี่ยน ในกรณีเรซินประจุบวก พบว่า ระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันก็ดีกว่า ส่วนในกรณีเรซินประจุลบก็ไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ในแง่ของคุณภาพน้ำขาออกจากระบบ พบว่า ระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันดีกว่าเช่นกัน ในแง่ของการรั่วไหลออกของไอออน ในกรณีของเรซินประจุบวก พบว่า ระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันมีการรั่วไหลออกของไอออนน้อยกว่า ส่วนในกรณีของเรซินประจุลบไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ในแง่ของปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากการล้างสารแลกเปลี่ยน ที่ระดับรีเจนเนอเรชันเท่ากัน ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างระบบทั้งสองชนิด แต่หากเปรียบเทียบที่ปริมาณการผลิตน้ำที่เท่ากันแล้ว ระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันจะมีปริมาณน้ำเสียน้อยกว่า อนึ่งในแง่ความดันลดยังไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างระบบทั้งสอง

นอกจากนั้นได้พิจารณาความเหมาะสมของสมการคำนวณออกแบบที่เสนอไว้ใน Engineering Bulletin และ Data Sheet ของบริษัทผู้ผลิตเรซินปรากฏว่า มีความเหมาะสมในการใช้ออกแบบระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ โดยที่ผลการทดลองให้ค่าสอดคล้องกับการคำนวณ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C617355 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD:

ION EXCHANGE / COUNTER-CURRENT REGENERATION / CO-CURRENT REGENERATION / DEMINERALIZATION

WUTHIPONG PONGJATURAVIT : PERFORMANCE COMPARISON OF PACKED-BED CO-CURRENT AND COUNTER-CURRENT REGENERATION

DEMINERALIZATION SYSTEMS ON THE PROTOTYPE LEVEL. THESIS

ADVISOR : PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph. D. , THESIS CO-

ADVISOR : MR. MONGKONE SRIRUENG, 258 pp. ISBN 974-635-438-8

Performance comparison between packed-bed co-current and counter-current regeneration demineralization systems is a study to compare the efficiency and capacity of the two demineralization systems under the same operating conditions. Each experimental unit consists of a cation and an anion resin column connected in series.

Experiments were conducted with water flow rate from 100 to 300 litres per hour, which is equivalent to 13.67 to 41.02 m/hr and 6.45 to 19.35 m/hr linear velocity in the case of cation and anion resin, respectively.

The experimented results obtained with the counter-current regeneration demineralization system showed superior performance in some aspects to the co-current regeneration system but no clear differences in other aspects.

With respect to the cycle capacity, the results show that the counter-current regeneration system achieved 5.77-7.69 % higher capacity than the other system in the case of cation resin. However, for anion resin there is no explicit difference in capacity. Similarly, in terms of regeneration efficiency and regenerant dosage the counter-current regeneration system was superior in the case of cation resin but no clear difference in the case of anion resin. With respect to product water quality, the counter-current regeneration system was again superior. As regards ionic leakage, the counter-current regeneration system allowed less sodium leakage in the case of cation resin but there was no clear difference in the case of anion resin. Regarding the amount of regenerant waste, there was no clear difference between the two systems when the same regeneration level was used. Conversely, if comparison is made on the basis of equal cycle capacity, the counter-current regeneration system would generate less regenerant waste. By the way, no clear difference in the measured pressure drop was found between the two systems.

In addition, the applicability of the design equations presented in the Engineering Bulletin and Data Sheets provided by the resin manufacturer was considered. Since the calculations agree with the experimented results, the appropriateness of the equations were confirmed.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม คุณมงคล ศรีเรือง นักวิทยาศาสตร์ ระดับ 11 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด รวมทั้งกรรมการทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทุก ๆ ท่านมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ฝ่ายเคมีและวิเคราะห์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือ และโรงไฟฟ้าพระนครใต้) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณคณะทำงานทุกท่านและหน่วยงานทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ได้ช่วยเหลือในงานวิจัยนี้.

ขอขอบคุณ คุณนรินทร์ หิตโกเมท รวมทั้งพนักงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตทุกท่าน ซึ่งไม่ได้ลงนามทั้งหมดในที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ จนงานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ธุรการของภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ช่วยติดต่อประสานงาน ระหว่างนิสิตกับอาจารย์ที่ปรึกษา และกับทางมหาวิทยาลัยจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฬ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 มูลเหตุจูงใจของการวิจัยและความเป็นมา	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบข่ายและขั้นตอนการทำวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย	4
2 หลักการและทฤษฎี	6
2.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (ION EXCHANGE)	6
2.2 หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	7
2.3 การดูดซับ (ADSORPTION)	8
2.4 สมดุลย์ระหว่างของแข็ง-ของไหล (SOLID-FLUID EQUILIBRIA)	8
2.5 ปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับของแข็งและของไหล (SOLID-FLUID OPERATIONS)	10
2.6 กฎที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนแบบย้อนกลับได้ (LAWS GOVERNING REVERSIBLE ION EXCHANGE)	11
2.7 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	14
2.8 ลำดับความชอบไอออนของเรซิน	22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	23
2.10 เรซินแบบกรดแก่	24
2.11 เรซินแบบกรดอ่อน	27
2.12 เรซินแบบต่างแก่	29
2.13 เรซินแบบต่างอ่อน	31
2.14 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน	32
2.15 ความชื้นของเรซิน	33
2.16 ความหนาแน่นปรากฏ (BULK DENSITY)	33
2.17 ขนาดประสิทธิผล (EFFECTIVE SIZE) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (UNIFORMITY COEFFICIENT)	34
2.18 ชีตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน	34
2.19 วัฏจักรการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน	34
2.20 วิธีการรีเจนเนอเรชัน (METHODS OF REGENERATION)	40
2.21 การผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากแร่ธาตุ	43
2.22 การแก้ปัญหาการรั่วของไอออน	46
2.23 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต	49
3 การออกแบบ การสร้างและการติดตั้งหน่วยปฏิบัติการทดลอง	51
3.1 การพิจารณาเลือกสถานที่ทดลอง	51
3.2 การเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำดิบ	53
3.3 การคำนวณและการออกแบบ (SIZING AND DESIGNING)	54
3.3.1 คุณลักษณะของน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการทดลอง (CHARACTERISTICS OF RAW WATER)	54
3.3.2 การคำนวณภาระไอออนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำดิบเพื่อการออกแบบ (IONIC LOAD CALCULATION FOR UNIT OPERATION DESIGN)	55
3.3.3 ไตอะแกรมของกระบวนการ (PROCESS DIAGRAM)	58

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	3.3.4 กำหนดข้อมูลเบื้องต้นของการเดินเครื่องเพื่อการออกแบบ	59
	3.3.5 การคำนวณหาปริมาณสารกรองเรซินและขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน	59
	3.3.6 สรุปการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน	73
	3.4 ภาพเขียนและไดอะแกรม (DRAWING AND DIAGRAM)	75
	3.5 การติดตั้งหน่วยปฏิบัติการ	80
4	การดำเนินการวิจัย	81
	4.1 ขอบข่ายของการวิจัย	81
	4.2 รายละเอียดการทดลองแต่ละขั้นตอน	81
	4.2.1 การศึกษาคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการ	81
	4.2.2 การคำนวณ ออกแบบ และจัดสร้างหน่วยปฏิบัติการ	83
	4.2.3 การวัดขนาดมิติภายในหอแต่ละหอของหน่วยปฏิบัติการ	85
	4.2.4 การคำนวณปริมาณเรซินจากปริมาตรภายในหอของหน่วยปฏิบัติการ	85
	4.2.5 การทดสอบการขยายตัวของเรซินในห้องปฏิบัติการ	85
	4.2.6 การคำนวณปริมาณเรซินในรูปแบบอิมตัวที่ต้องใช้กับหน่วยปฏิบัติการ	88
	4.2.7 การติดตั้งและทดสอบหน่วยปฏิบัติการ	88
	4.2.8 การคำนวณหาปริมาณรีเจนเนอแรนต์ที่ต้องใช้จริง	89
	4.2.9 การรีเจนเนอเรตซ้ำ (Double regeneration) เรซินของใหม่ทั้งสี่หอ	89
	4.2.10 การทำให้เรซินทั้งสี่หออยู่ในรูปแบบอิมตัว (Exhausted form) ด้วยน้ำดิบ	94
	4.2.11 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การผลิตน้ำบริสุทธิ์ระหว่างแบบแพ็กเบตชนิดโคเคอร์เรนต์ และชนิดแคนเตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน	94

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2.12 การตรวจสอบวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	99
4.2.13 การสรุปความเหมาะสมในแง่ประสิทธิภาพ ในการปรับปรุงโรง ผลิตน้ำบริสุทธิ์	101
4.2.14 การทดสอบความเหมาะสมของสมการทั่วไปที่ใช้ออกแบบกับผล การทดลองที่ได้จริง	102
4.2.15 การเสนอระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่จะสร้างขึ้นใหม่ในโรงไฟฟ้าโดย พิจารณาจากผลการวิจัยข้างต้น	102
5 ผลการทดลองและการวิจารณ์	103
5.1 ผลการทดลองศึกษาคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการ	103
5.1.1 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำดิบ	103
5.1.2 วิจารณ์ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำดิบ	104
5.2 ผลการทดลองวัดขนาดมิติภายในหอแต่ละหอของหน่วยปฏิบัติการ	104
5.3 ผลการคำนวณหาปริมาณเรซินจากปริมาตรภายในหอของหน่วยปฏิบัติ การ	105
5.3.1 ผลการคำนวณ	105
5.3.2 วิจารณ์ผลการวัดและคำนวณในหัวข้อ 5.2 และ 5.3	105
5.4 ผลการทดลองการขยายตัวของเรซินในห้องปฏิบัติการ	106
5.4.1 ผลการทดลอง	106
5.4.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	107
5.5 ผลการทดลองคำนวณปริมาณเรซินในรูปแบบอิมมัตวที่ต้องใช้กับหน่วย ปฏิบัติการ	108
5.6 การคำนวณหาปริมาณรีเจนเนอแรนต์ที่ต้องใช้จริง	108
5.7 ผลการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตน้ำบริสุทธิ์ระหว่างแบบ แพ็คเกจชนิดโคเคอร์เรนต์และชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอ เรชั่น	111

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ก) ผลการทดลองเบื้องต้นในขั้นเตรียมการ	111
ข) ผลการทดสอบสมรรถนะ	117
5.8 ผลการสรุปความเหมาะสมในแง่ประสิทธิภาพเพื่อปรับปรุงโรงผลิตน้ำ บริสุทธ์	126
5.9 ผลการยืนยันความเหมาะสมของสมการทั่วไปที่ใช้ออกแบบกับผลการ ทดลองที่ได้จริง	127
5.9.1 ผลการยืนยันโดยการคำนวณเปรียบเทียบความเหมาะสมของ สมการทั่วไปที่ใช้ออกแบบกับผลการทดลองที่ได้จริง	127
5.9.2 การวิจารณ์ผลการทดลอง	144
5.9.3 สรุปผลการทดลอง	148
6 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	204
6.1 ข้อสรุปผลการวิจัย	204
6.1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำบริสุทธ์แบบแฟ็ก เบตชนิดโคเคอร์เรนต์และชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอ เรชันในระดับโรงงานต้นแบบ	204
6.1.2 ความเหมาะสมของสมการที่ใช้คำนวณออกแบบ	206
6.2 ข้อเสนอแนะ	207
6.2.1 แนวทางการปรับปรุงโรงผลิตน้ำบริสุทธ์เดิมของโรงไฟฟ้า	207
6.2.2 ระบบผลิตน้ำบริสุทธ์ที่จะสร้างขึ้นใหม่ในโรงไฟฟ้า	207
รายการอ้างอิง	208
ภาคผนวก	210
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง	211
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างของวิธีการคำนวณ	228

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค. ภาพถ่าย	231
ภาคผนวก ง. Engineering Bulletin and Data Sheet ของ บริษัท Rohm and Haas	235
Table of Density of Aqueous Hydrochloric Acid Solutions	256
Table of Density of Aqueous Sodium Hydroxide Solutions	257
ประวัติผู้เขียน	258

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่าง ๆ 19
2.2	ลำดับความชอบไอออนของเรซินในน้ำที่มีสารของแข็งละลายน้ำต่ำกว่า 1,000 มก./ล. 22
2.3	ลักษณะสมบัติสำคัญของเรซินทั้ง 4 ประเภท 24
2.4	สมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่เกิดจากการใช้เรซินแบบกรดแก่ 26
2.5	ลักษณะสมบัติทั่วไปของเรซินโพลีสไตรีนเชิงพาณิชย์ชนิดหนึ่ง 32
2.6	ลักษณะการใช้งาน คุณภาพน้ำที่ได้และข้อได้เปรียบเสียเปรียบของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบต่าง ๆ 45
2.7	การรีวของโซเดียมไอออนเมื่อล้างด้วยวิธีการแตกต่างกัน (ใช้เรซินชนิด SC) 48
5.1	ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำดิบ (ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด) 103
5.2	ผลการวัดขนาดมิติภายในหอแต่ละหอ 104
5.3	ปริมาณเรซินของหอแต่ละหอของหน่วยปฏิบัติการ 105
5.4	ผลการทดลองการขยายตัวของเรซิน 107
5.5	ปริมาณเรซินในรูปแบบอิมตัวที่ต้องใช้กับหอแต่ละหอ 108
5.6	แสดงผลการเปรียบเทียบ Sodium และ Silica Leakage ระหว่างผลการทดสอบกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของระบบผลิตน้ำทั้งสองแบบ 123
5.7	ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเสียจากการล้างสารแลกเปลี่ยนกรณีของเรซินประจุบวกระหว่างระบบผลิตน้ำทั้งสองแบบ 124
5.8	ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเสียจากการล้างสารแลกเปลี่ยนกรณีของเรซินประจุลบระหว่างระบบผลิตน้ำทั้งสองแบบ 125
5.9	ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบรอบการทำงานที่เจ็ดและแปด 128
5.10	ผลการทดลองเปรียบเทียบปริมาณการจ่ายน้ำระหว่างระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ทั้งสองแบบโดยใช้ค่าเฉลี่ยของรอบการทำงานที่ 7 และ 8 กับค่าคำนวณจากการออกแบบ (ทดลองที่อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อชั่วโมง) 136
5.11	ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบรอบการทำงานที่เก้าและสิบ 137

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.12 ผลการทดลองเปรียบเทียบปริมาณการจ่ายน้ำระหว่างระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ทั้งสองแบบ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของรอบการทำงานที่ 9 และ 10 กับค่าคำนวณจากการออกแบบ(ทดลองที่อัตราการจ่ายน้ำ 300 ลิตรต่อชั่วโมง) -----	140
5.13 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบ รอบการทำงานที่สิบเอ็ดและสิบสอง -----	141
5.14 ผลการทดลองเปรียบเทียบปริมาณการจ่ายน้ำระหว่างระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ทั้งสองแบบ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของรอบการทำงานที่ 11 และ 12 กับค่าคำนวณจากการออกแบบ (ทดลองที่อัตราการจ่ายน้ำ 100 ลิตรต่อชั่วโมง) -----	144
ก 1 ผลการทดลองศึกษาคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการ (1-31 ตุลาคม 2537) -----	212
ก 2 ผลการทดลองศึกษาคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการ (1-30 พฤศจิกายน 2537) -----	213
ก 3 ผลการทดลองศึกษาคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการ (1-31 ธันวาคม 2537) -----	214
ก 4 ผลการทดลองศึกษาคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าหน่วยปฏิบัติการ (1-17 มกราคม 2538) -----	215
ก 5 ผลการทดลองรอบการทำงานที่หนึ่ง (Cycle # 1) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อชั่วโมง -----	216
ก 6 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สอง (Cycle # 2) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อชั่วโมง -----	217
ก 7 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สาม (Cycle # 3) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อชั่วโมง -----	218
ก 8 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สี่ (Cycle # 4) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อชั่วโมง -----	219
ก 9 ผลการทดลองรอบการทำงานที่ห้า (Cycle # 5) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อชั่วโมง -----	220

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก 10 ผลการทดลองรอบการทำงานที่หก (Cycle # 6) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	221
ก 11 ผลการทดลองรอบการทำงานที่เจ็ด (Cycle # 7) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	222
ก 12 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สอง (Cycle # 8) : อัตราการจ่ายน้ำ 200 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	223
ก 13 ผลการทดลองรอบการทำงานที่เก้า (Cycle # 9) : อัตราการจ่ายน้ำ 300 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	224
ก 14 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สิบ (Cycle # 10) : อัตราการจ่ายน้ำ 300 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	225
ก 15 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สิบเอ็ด (Cycle # 11) : อัตราการจ่ายน้ำ 100 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	226
ก 16 ผลการทดลองรอบการทำงานที่สิบสอง (Cycle # 12) : อัตราการจ่ายน้ำ 100 ลิตรต่อ ชั่วโมง -----	227

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่าง Adsorption isotherms และการดูดซับก๊าซผสม	9
2.2	เส้นสมดุลย์	12
2.3	เส้นโค้งของความเข้มข้น	12
2.4	เส้นโค้งอิมิตัว	13
2.5	รูปร่างของเรซิน	15
2.6	ขั้นตอนการสังเคราะห์และเตรียม Cation exchange resin	16
2.7	โมเดลของโครงสร้างภายในของเม็ดเรซิน	17
2.8	กลไกของการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนประจุบวก	20
2.9	โมเดลของ Cation resin	21
2.10	โครงสร้างของเรซิน SC เมื่ออยู่ในสภาพที่แตกตัว	24
2.11	โครงสร้างแบบหนึ่งของเรซิน SC	25
2.12	การเปลี่ยน Na^+ ของเรซินแบบกรดแก่กับไอออนบวกทุกตัวที่อยู่ในน้ำ (สิ่งที่ไม่เปลี่ยนแปลงคือ ไอออนลบในน้ำ)	25
2.13	การแลกเปลี่ยน H^+ ของเรซินแบบกรดอ่อนกับไอออนบวกบางตัวในน้ำ	28
2.14	โครงสร้างแบบหนึ่งของเรซิน SB	29
2.15	ก. ตัวอย่างของขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน (Service Cycle)	38
	ข. ตัวอย่างของขั้นตอนการรีเจนเนอเรต (Regeneration)	38
2.16	อัตราไหลในการล้างย้อนและอุณหภูมิกับ % การขยายตัวของชั้นเรซิน	39
2.17	ประสิทธิภาพในการล้างเรซินขึ้นกับปริมาณน้ำยาที่ใช้ล้าง(ในที่นี้ใช้น้ำเกลือ)	39
2.18	ระดับรีเจนเนอเรชันของเรซินประเภทกรดแก่	40
2.19	รูปแบบเมื่อเรซินอิมิตัว	41
2.20	Co-current regeneration	41
2.21	Counter-current regeneration	42
2.22	การผลิตน้ำบริสุทธิ์ได้โดยใช้หอบเรซินประจุบวกและลบ โดยมีหอไล่ก๊าซคั้น กลาง	44
2.23	ลักษณะของหอบบรรจุเรซินเมื่อผ่านการใช้งานแล้ว	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.24	ลักษณะของชั้นเรซินประจุบวกเมื่อล้างด้วยกรดแล้ว	46
2.25	ลักษณะของชั้นเรซินในท่อเมื่อจับไอออนจนเต็มหมดและหลังจากล้างเรซินแบบ ไหลตามกันและไหลสวนทางกัน	47
3.1	ไดอะแกรมของกระบวนการ	59
3.2	ไดอะแกรมของระบบจ่ายน้ำประปา	76
3.3	ไดอะแกรมแสดงรายละเอียดชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ของหอบรรจุเรซินประจุบวก และประจุลบ	77
3.4	ไดอะแกรมแสดงรูปร่าง ทิศทางการจ่ายน้ำ การรีเจนเนอเรตของหอบรรจุเรซินประจุ บวกและลบของระบบทั้งสองชนิด	78
3.5	ไดอะแกรมแสดงระบบท่อและอุปกรณ์วัด	79
5.1	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Conductivity) ในช่วงเดือน ตุลาคม 2537 ...	150
5.2	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Chloride) ในช่วงเดือน ตุลาคม 2537	150
5.3	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Hardness) ในช่วงเดือน ตุลาคม 2537	151
5.4	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Conductivity) ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2537	151
5.5	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Chloride) ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2537 ...	152
5.6	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Hardness) ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2537 ..	152
5.7	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Conductivity) ในช่วงเดือน ธันวาคม 2537 ..	153
5.8	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Chloride) ในช่วงเดือน ธันวาคม 2537	153
5.9	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Hardness) ในช่วงเดือน ธันวาคม 2537	154
5.10	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Conductivity) ในช่วงเดือน มกราคม 2538 ..	154
5.11	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Chloride) ในช่วงเดือน มกราคม 2538	155
5.12	กราฟแสดงดัชนีคุณภาพน้ำดิบ (Hardness) ในช่วงเดือน มกราคม 2538	155
5.13	กราฟแสดงค่า FMA ของน้ำออกจากหอบรรจุเรซินประจุบวกกับปริมาณน้ำจ่ายจาก ระบบโคเคอร์เรเนตรีเจนเนอเรชัน (รอบการทำงานที่หนึ่ง)	156

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.105	กราฟแสดงค่า Na ของน้ำออกจากหอเรซินประจุบวกกับปริมาณน้ำจ่ายจากระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (รอบการทำงานที่สิบสอง) -----	202
5.106	กราฟแสดงค่า pH ของน้ำออกจากหอเรซินประจุลบกับปริมาณน้ำจ่ายจากระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (รอบการทำงานที่สิบสอง) -----	202
5.107	กราฟแสดงค่า Conductivity ของน้ำออกจากหอเรซินประจุลบกับปริมาณน้ำจ่ายจากระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (รอบการทำงานที่สิบสอง) -----	203
5.108	กราฟแสดงค่า Silica ของน้ำออกจากหอเรซินประจุลบกับปริมาณน้ำจ่ายจากระบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (รอบการทำงานที่สิบสอง) -----	203
ค.1	ภาพถ่ายชุดการทดลองการขยายตัวของเรซินในห้องปฏิบัติการ -----	232
ค.2	ภาพถ่ายชิ้นส่วนประกอบของหอทดลอง -----	233
ค.3	ภาพถ่ายหอทดลองก่อนติดตั้งระบบท่อ -----	233
ค.4	ภาพถ่ายหน่วยปฏิบัติการทดลองที่สร้างขึ้น -----	234

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ

กล.
ตร.ชม.
ตร.ฟุต
มล.
มก./ล.
ลบ.ชม.
ลบม.
ลบ.ฟุต
cm
EA
eq
eq/l_R
g
h
hr
kg
kg/m³
l,lit
lbs
lb/ft³
lph
m³
min
mg
me/g
me/ml
mm

คำเต็ม

แกลลอน
ตารางเซนติเมตร
ตารางฟุต
มิลลิลิตร
มิลลิกรัม/ลิตร
ลูกบาศก์เซนติเมตร
ลูกบาศก์เมตร
ลูกบาศก์ฟุต
เซนติเมตร
ชิ้น (Each)
อควาเลนซ์
อควาเลนซ์/ลิตรเรซิน
กรัม
ความสูง (height)
ชั่วโมง
กิโลกรัม
กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ลิตร
ปอนด์
ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต
ลิตร/ชั่วโมง
ลูกบาศก์เมตร
นาที (minute)
มิลลิกรัม
มิลลิอควาเลนซ์/กรัม
มิลลิอควาเลนซ์/มิลลิลิตร
มิลลิเมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ

nil

NTU

ppb

ppm

r

$\mu\text{S/cm.}$

% wt

$^{\circ}\text{C}$

คำเต็ม

น้อยมากจนตรวจไม่พบ

หน่วยความขุ่น เอ็นทียู

หนึ่งในพันล้านส่วน

หนึ่งในล้านส่วน

รัศมี (radius)

ไมโครซิเมนต์/เซ็นติเมตร

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

องศาเซลเซียส