

ผลการทดลองและวิจารณ์

บทนี้เป็นรายงานผลการทดลอง วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลต์เพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมักโซเดียมซิเตรท และศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อิเล็กโทรไลต์เพื่อแยกกรดมะนาวจากน้ำหมักควบคู่กับการหมักในถังหมักขนาด 5 ลิตร โดยปัจจัยที่มีการศึกษา คือ ปัจจัยทางเคมีได้แก่ ความเข้มข้นของสารป้อนและค่าความเป็นกรดค่าปัจจัยทางกายภาพได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าของสนามไฟฟ้าที่ใช้ อัตราการไหลของสารละลายและอุณหภูมิของระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดมะนาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แยกได้ แล้วคำนวณค่าฟลักซ์ ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวและพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว ซึ่งการคำนวณค่าต่างๆนี้แสดงในภาคผนวก ง และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ โดยสรุปแผนการทดลองการศึกษาปัจจัยทางเคมีและปัจจัยทางกายภาพในบทที่ 2 ตามตารางที่ 2.1-2.2 ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองมีดังนี้

3.1 ผลของของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลต์เพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก

แปรความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาวในช่องของกรดมะนาวที่แยกได้เป็น 0 40 80 120 และ 160 กรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทคงที่ 80 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดค่าที่ 5 เพื่อศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาว และโซเดียม - ซิเตรท (concentration gradient) โดยภาวะที่ใช้ คือ อัตราการไหลของสารละลาย 480 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 3.1-3.11 และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ.1-5 และ จ.27

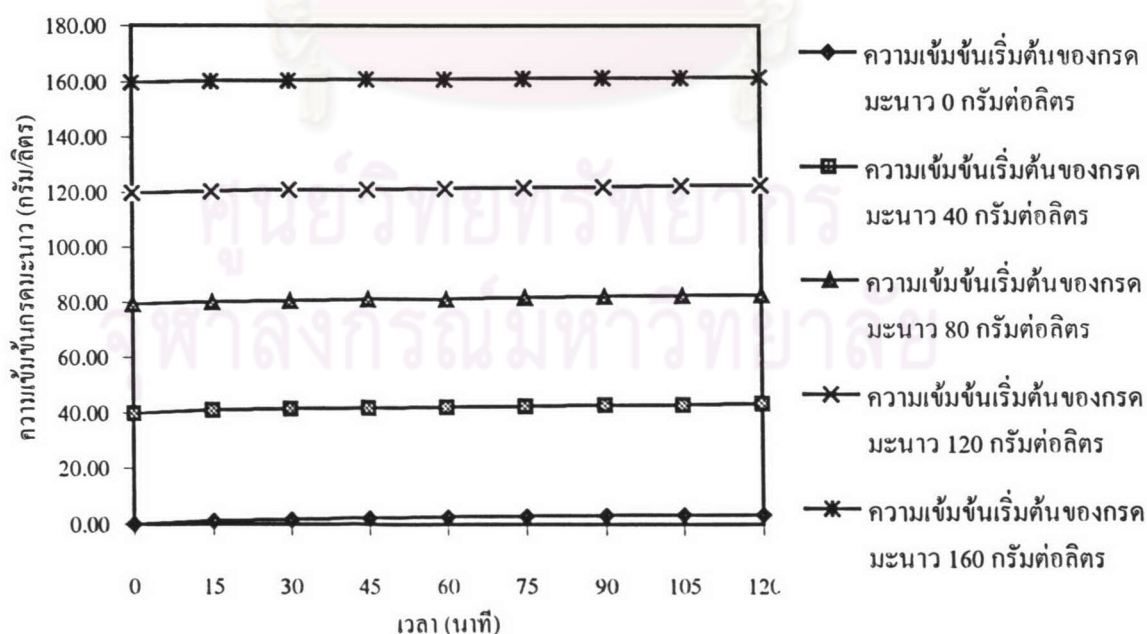
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นความเข้มข้นกรดมะนาวและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สะสมเพิ่มมากขึ้น แต่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงเนื่องจากไอออนในรูปโซเดียมไอออน และซิเตรทแอนไอออนถูกกำจัดออกไปจากสารละลายในช่องน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ส่งผลให้สารละลายในช่องนั้นมีไอออนลดลง ความต้านทานจึงสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ การจ่ายไฟให้กับขั้วไฟฟ้าจึงต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม (ศักย์ไฟฟ้า = กระแสไฟฟ้า x ความต้านทาน)

ฟลักซ์ซิเตรทแปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คือ เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ฟลักซ์ซิเตรทจะเพิ่มขึ้นตาม และพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซิเตรทมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Moresi และ Sappino (2000) โดยค่า

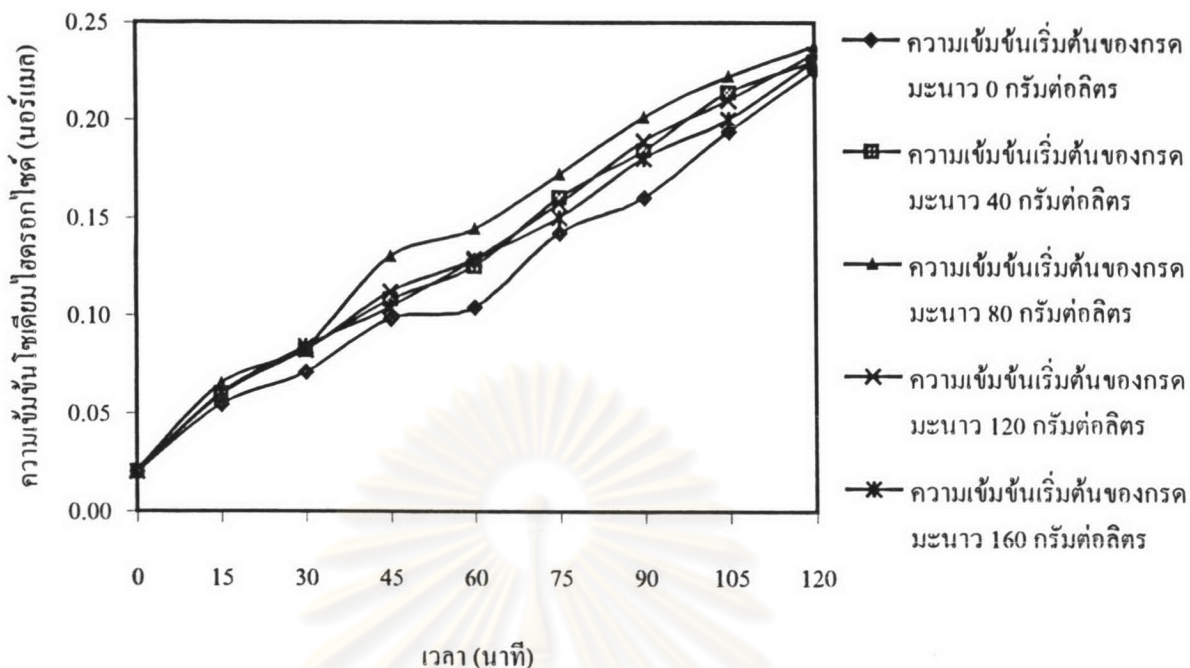
ความชื้นของสมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเทรทนั้น แสดงถึงประสิทธิภาพของการแยกกรดมะนาว ซึ่งประสิทธิภาพของการแยกกรดมะนาวจะแปรผกผันกับค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว คือ เมื่อประสิทธิภาพของการแยกกรดมะนาวสูง พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาวจะต่ำลง ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานมากนักเอง ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดมะนาว 40 กรัมต่อลิตรให้ประสิทธิภาพการแยกดีที่สุดเป็น 2.50×10^{-3} กรัมต่อลูกอมบ์ และฟลักซ์ซีเทรทสูงสุด เท่ากับ 0.65×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตร.วินาที และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในช่องกรดมะนาวสูงกว่า 80 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวและฟลักซ์ซีเทรทมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อสารละลายในช่องของกรดมะนาวมีความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายโซเดียมซีเทรท จะทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนเนื่องจากไมเกรชั่นและการแพร่มีทิศทางตรงข้ามกัน การเพิ่มความเข้มข้นของกรดมะนาวจึงไม่มากนัก ฟลักซ์ซีเทรทและประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวจึงต่ำลง

ส่วนความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวโดยเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0 กรัมต่อลิตรซึ่งใช้น้ำขจัดไอออนนั้น ฟลักซ์ซีเทรทและประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวกลับน้อยกว่าที่เริ่มต้นด้วยกรดมะนาวความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร เนื่องมาจากความเข้มข้นที่แตกต่างกันมากนี้ก่อให้เกิด concentration polarization ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Luo และคณะ (2002)

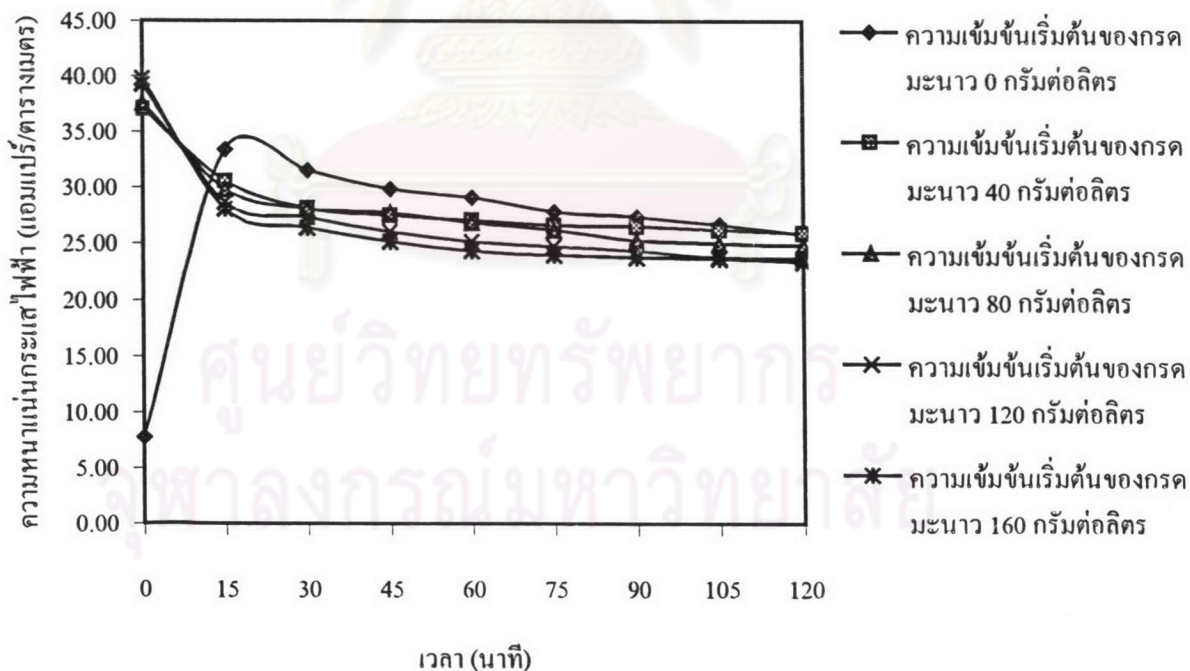
ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนของความเข้มข้นสารละลายในช่องกรดมะนาวต่อโซเดียมซีเทรทที่ความเข้มข้นกรดมะนาว 40 กรัมต่อลิตร ต่อความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซีเทรท 80 กรัมต่อลิตรหรือคิดเป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 2 มาใช้ในการทดลองต่อไป



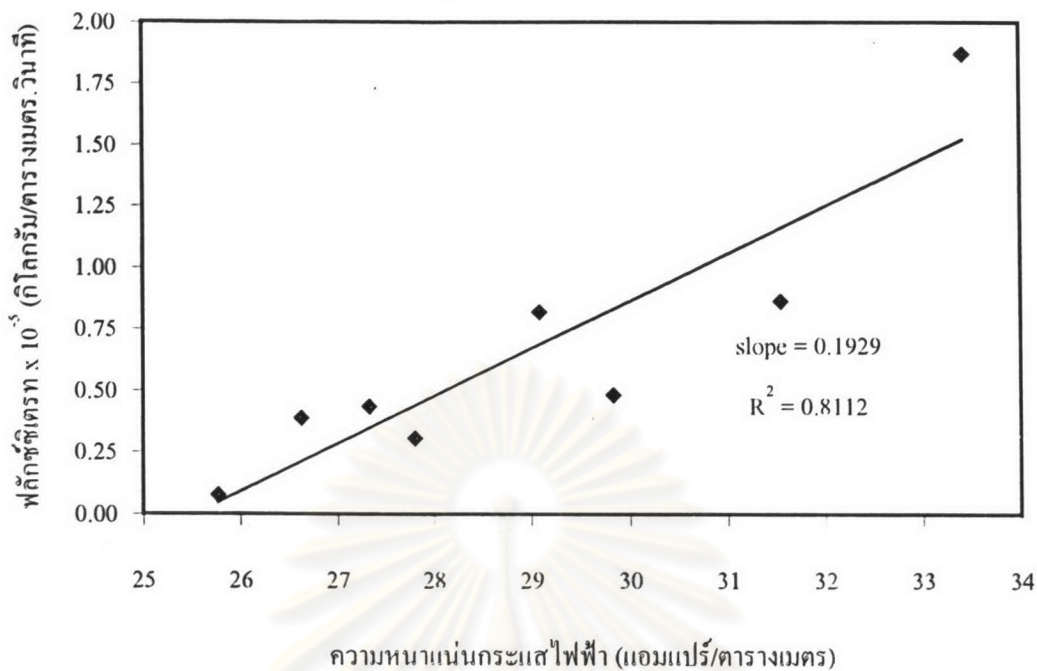
รูปที่ 3.1 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและ โซเดียมซีเทรทที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไลซิส



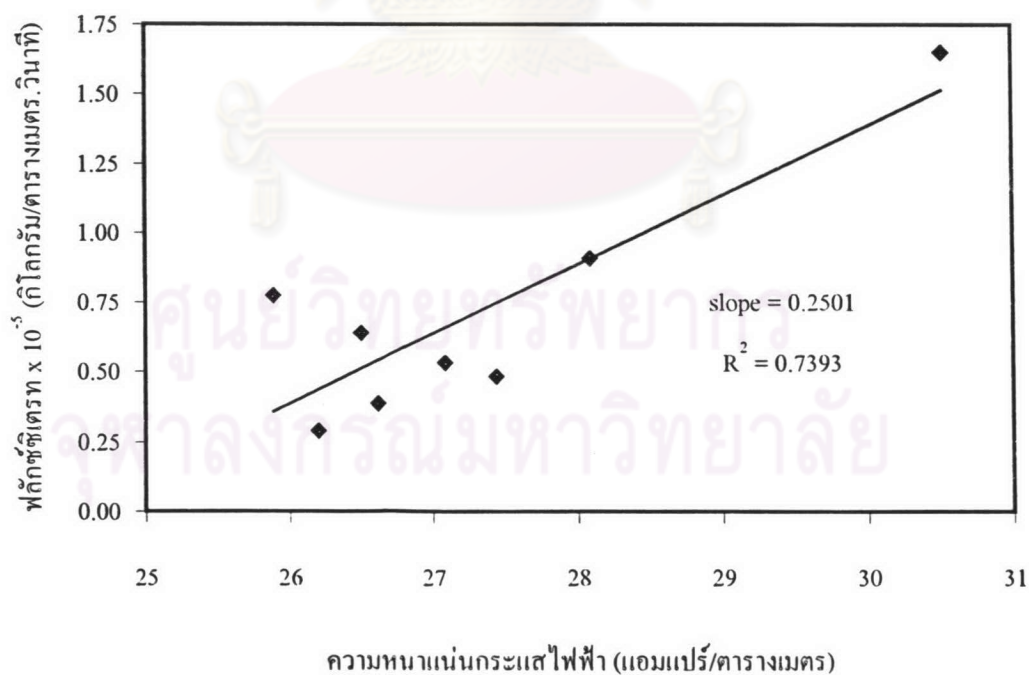
รูปที่ 3.2 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและ โซเดียมซิติเรทที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไลซิส



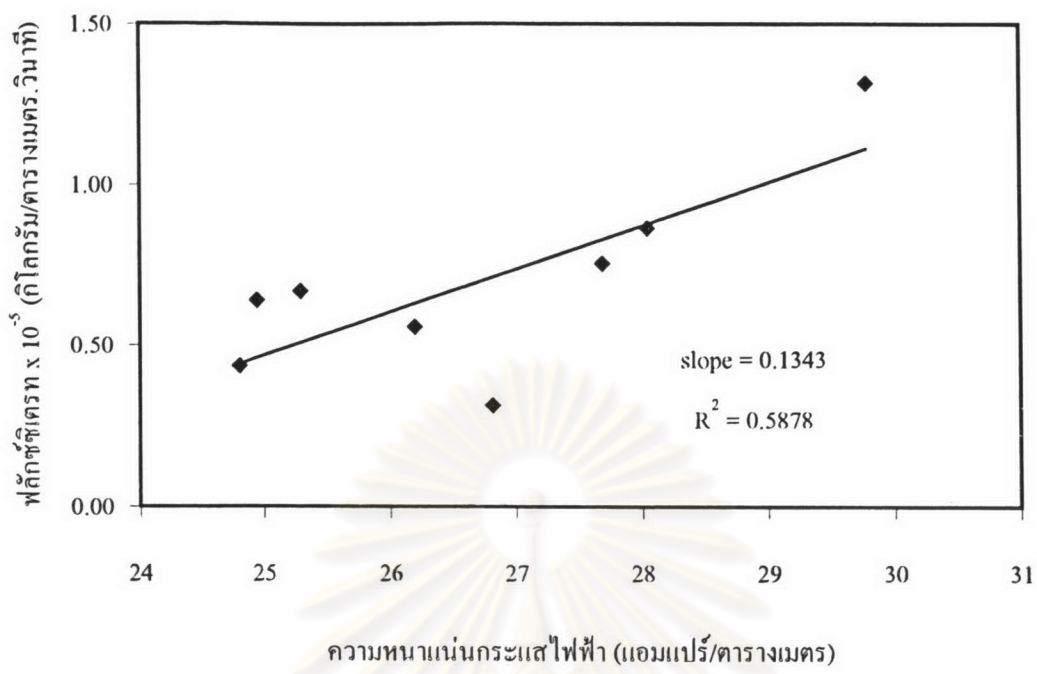
รูปที่ 3.3 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและ โซเดียมซิติเรทที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



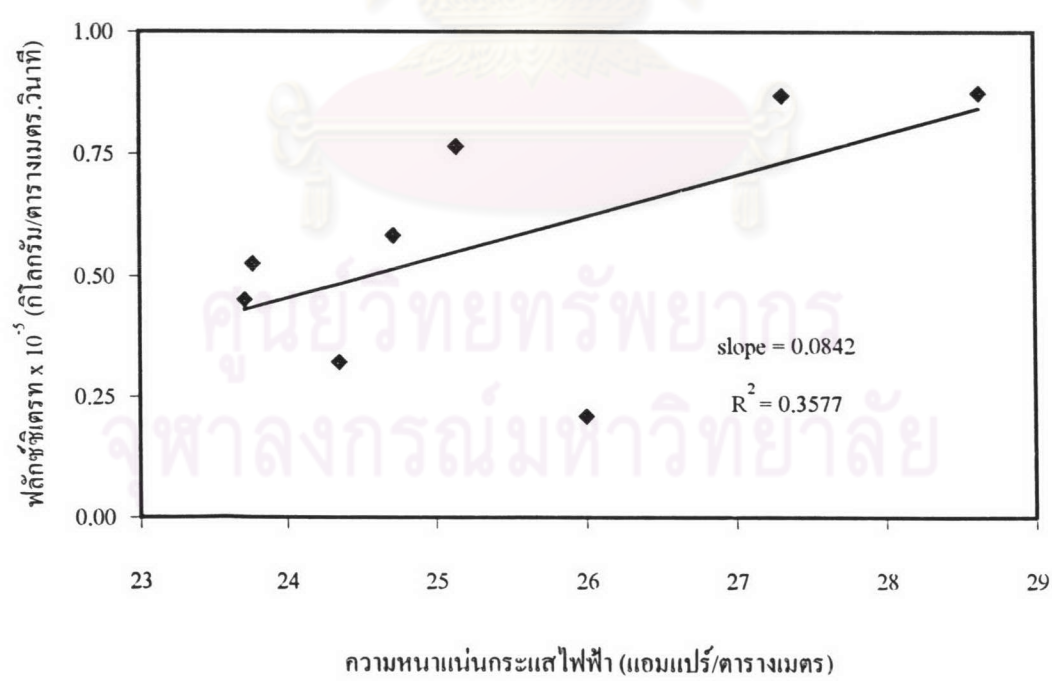
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีตรอนเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกัมมันตภาพรังสีที่ความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีเริ่มต้น 0 กรัมต่อลิตร



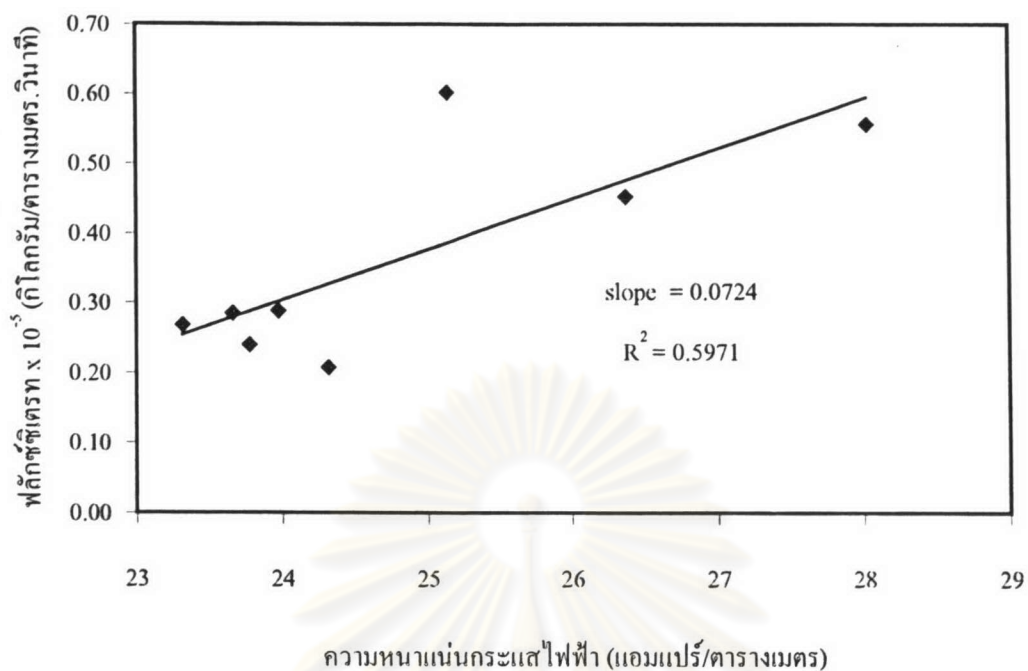
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีตรอนเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกัมมันตภาพรังสีที่ความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีเริ่มต้น 40 กรัมต่อลิตร



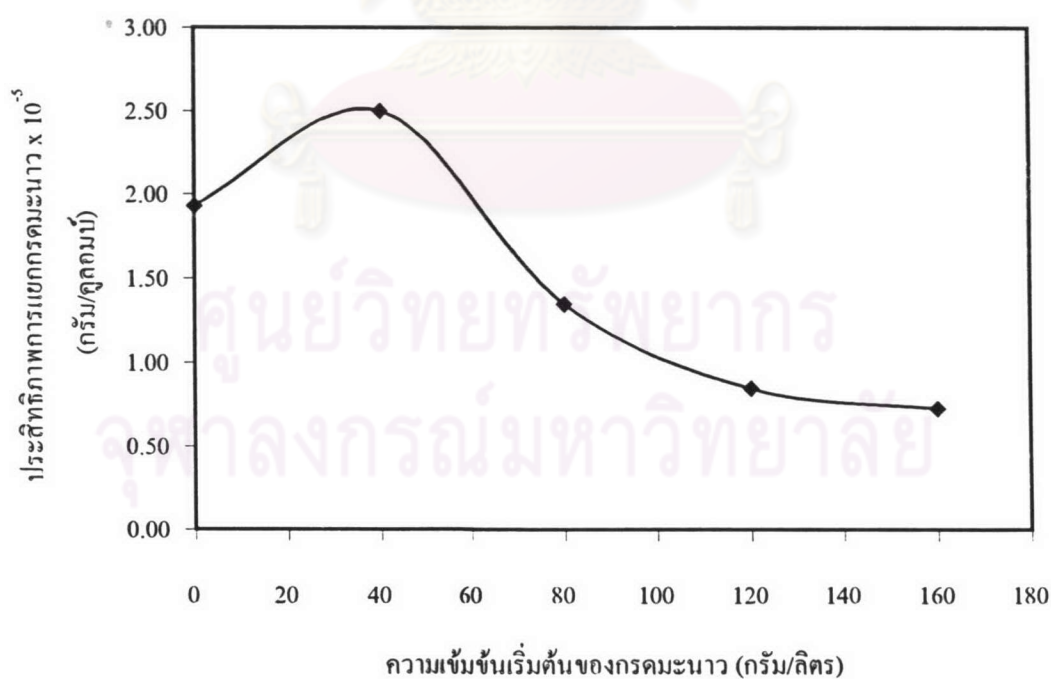
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 80 กรัมต่อลิตร



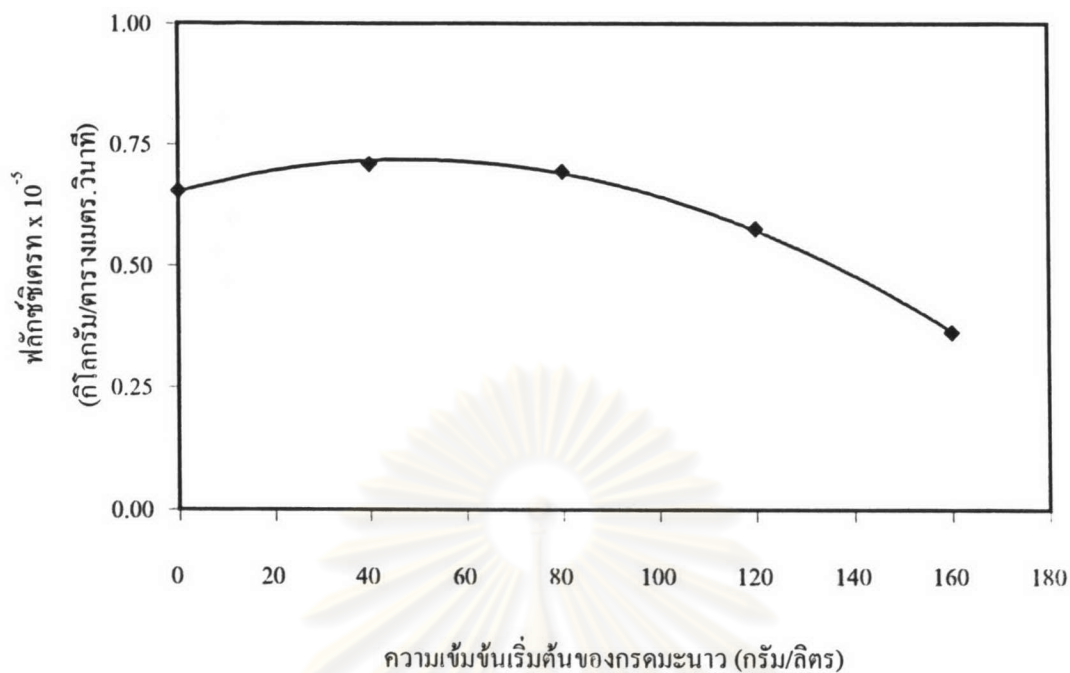
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร



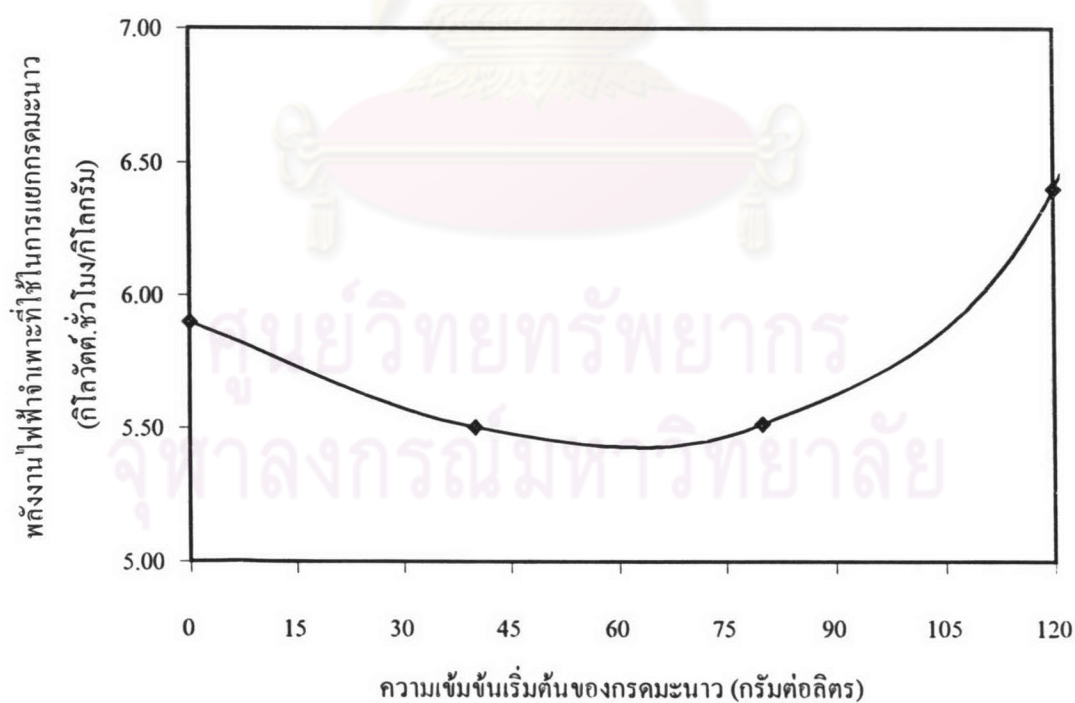
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นของกรดมะนาวเริ่มต้น 160 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 3.9 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซีเตรทที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว



รูปที่ 3.10 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซีเตรท ที่มีต่อค่าฟลักซ์ซีเตรท



รูปที่ 3.11 ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในช่องของกรดมะนาวและโซเดียมซีเตรท ที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว

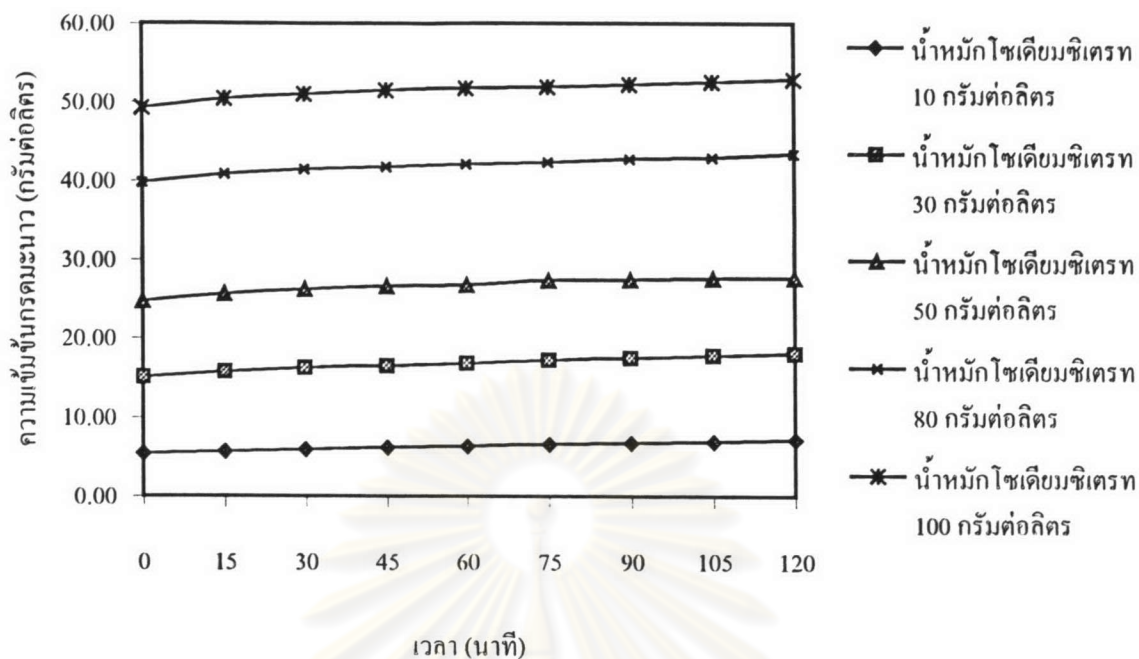
3.2 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลต์เพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก

แปรความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซิเตรท ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารป้อนด้านกรดมะนาวและโซเดียมซิเตรทเป็น 5 และ 10 กรัมต่อลิตร 15 และ 30 กรัมต่อลิตร 25 และ 50 กรัมต่อลิตร 40 และ 80 กรัมต่อลิตร และ 50 และ 100 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไลต์ โดยควบคุมความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองช่องให้อยู่ในอัตราส่วนคงที่ 1 ต่อ 2 น้ำหมักโซเดียม-ซิเตรทความเข้มข้น 10 30 50 และ 80 กรัมต่อลิตร จะเก็บจากการหมักในชั่วโมงที่ 24 42 66 และ 96 ตามลำดับ ส่วนน้ำหมักความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ไม่สามารถหมักจนถึงความเข้มข้นนี้ จึงมีการเติมกรดมะนาวลงไปปรับความเข้มข้น โดยน้ำหมักที่ใช้มีค่าความเป็นกรดค่าที่ 5 ภาวะที่ใช้คือ อัตราการไหลของสารละลาย 480 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 3.12-3.22 และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ.6-10 และ จ.28

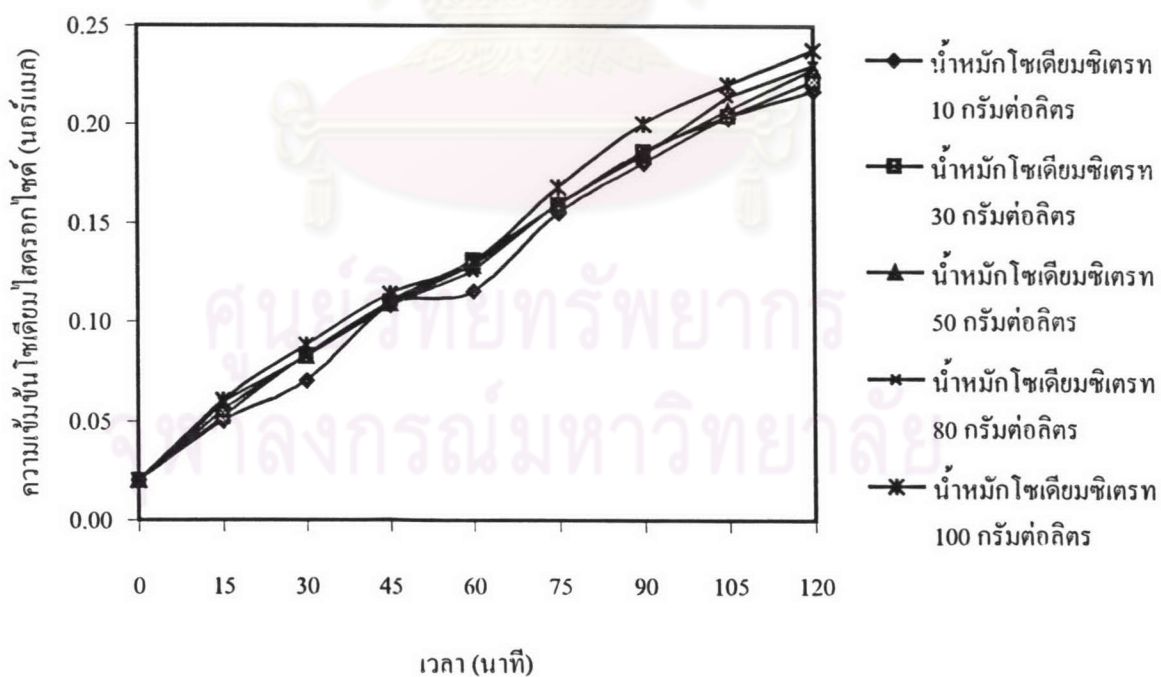
จากผลการทดลองพบว่า น้ำหมักโซเดียมซิเตรทในช่วงความเข้มข้น 10 ถึง 80 กรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าจะสูงขึ้น ซึ่งทำให้แนวโน้มของการแยกกรดมะนาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ความเข้มข้นสูงมาก โดยฟลักซ์ซิเตรทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวสูงขึ้น และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาวต่ำลง แนวโน้มนี้เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Novalic และคณะ (1995) แต่ที่ความเข้มข้นช่วง 80 ถึง 100 กรัมต่อลิตร ฟลักซ์ซิเตรทและประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวไม่แตกต่างกันมากนัก จึงเลือกความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร มาใช้ในการทดลองต่อไป ซึ่งความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซิเตรท 80 กรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถผลิตได้โดยใช้วิธีการผลิตในวิธีการทดลองข้อ 2.2.1

สำหรับการเวียนแบบกะ(batch) ควรเลือกใช้น้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีความเข้มข้นสูงในการแยก เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมีเนื้อสารอยู่มากจึงคุ้มค่าทั้งในเรื่องของการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สูงและการแยกสารละลายโซเดียมซิเตรทที่มีเนื้อสารมากจะทำให้แยกกรดมะนาวปริมาณมากได้ อย่างไรก็ตามการแยกโดยเวียนแบบกะนั้นมีข้อเสีย คือไม่สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆให้สมดุลได้และกำลังการผลิตต่ำ (Leitz, 1986)

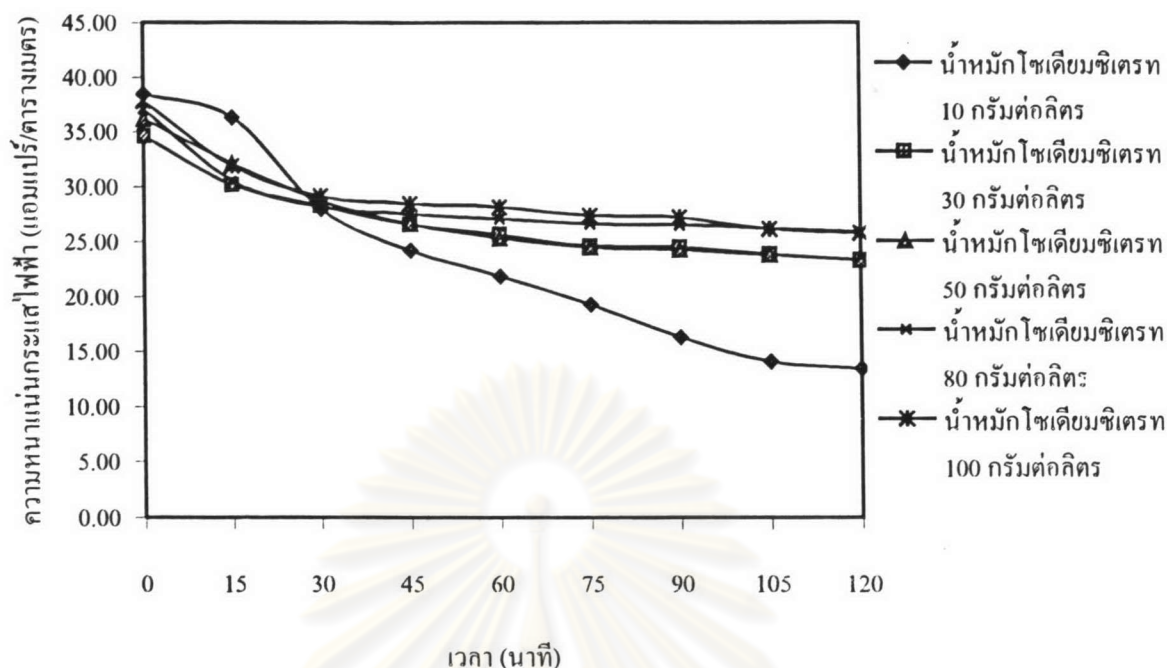
สำหรับระบบแบบสารป้อนและปล่อย (feed and bleed) เหมาะสำหรับการนำมาใช้ควบคู่กับการหมักแบบ extractive fermentation โดยสามารถเลือกใช้น้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีความเข้มข้นต่ำแต่ยังคงให้ฟลักซ์ในการแยกซิเตรทที่สูง และประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวสูงอยู่ได้ ซึ่งเป็นการช่วยลดระยะเวลาเนื่องจากการหมัก เพื่อที่จะได้เริ่มการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆได้ กำลังการผลิตสูง แต่ต้องอาศัยระบบควบคุมที่ดีเพื่อให้ปัจจัยคงที่



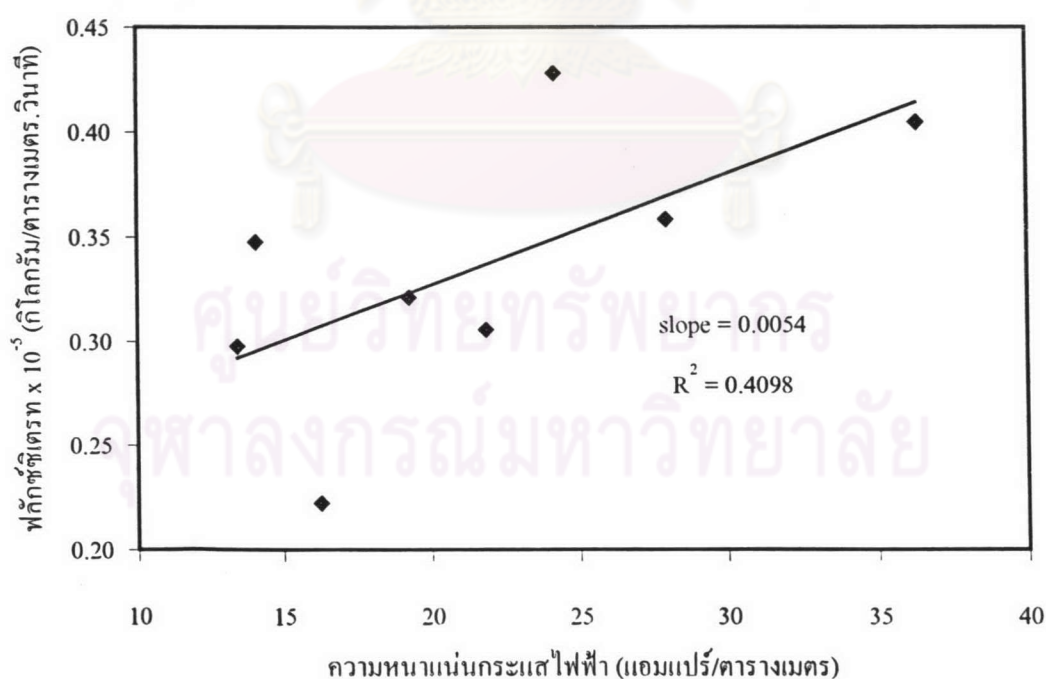
รูปที่ 3.12 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไลซิส



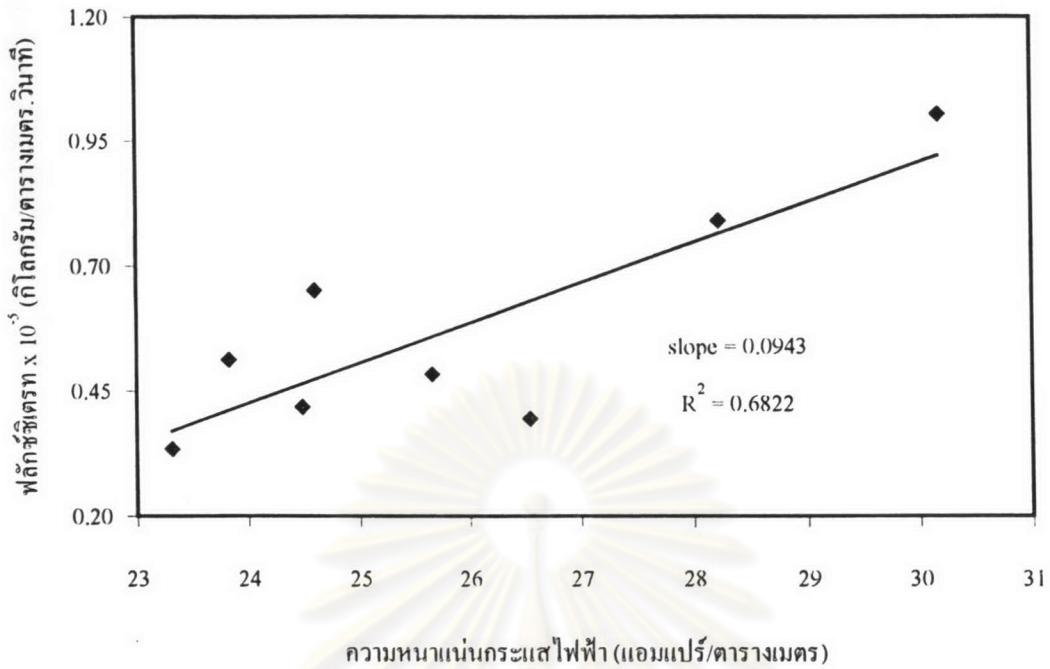
รูปที่ 3.13 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไลซิส



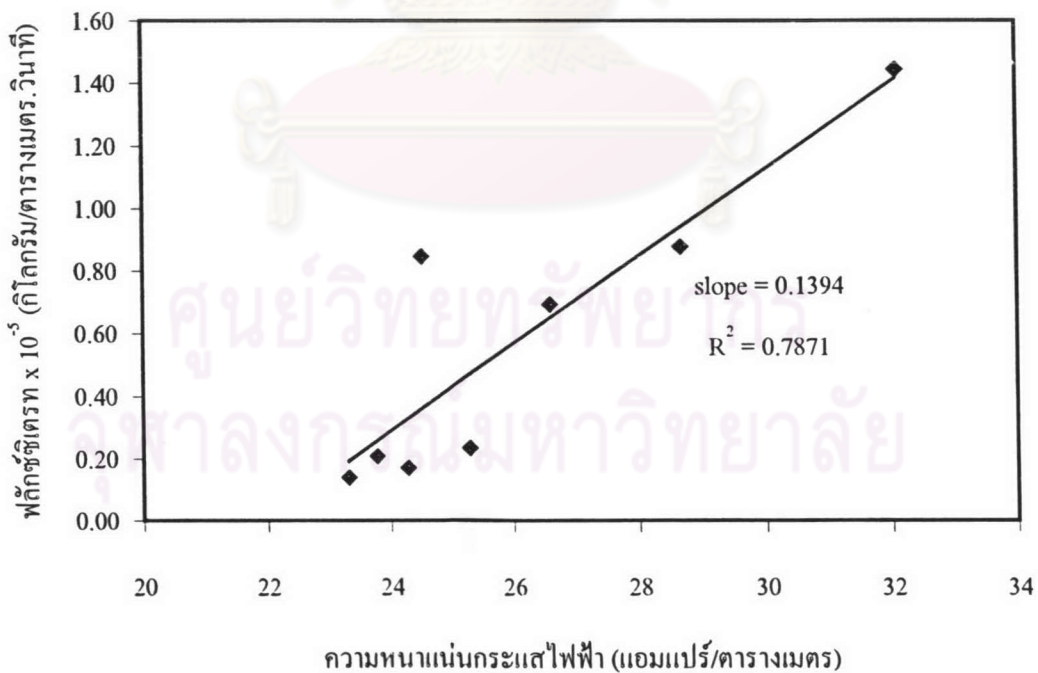
รูปที่ 3.14 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรดมะนาวและน้ำหมักโซเดียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



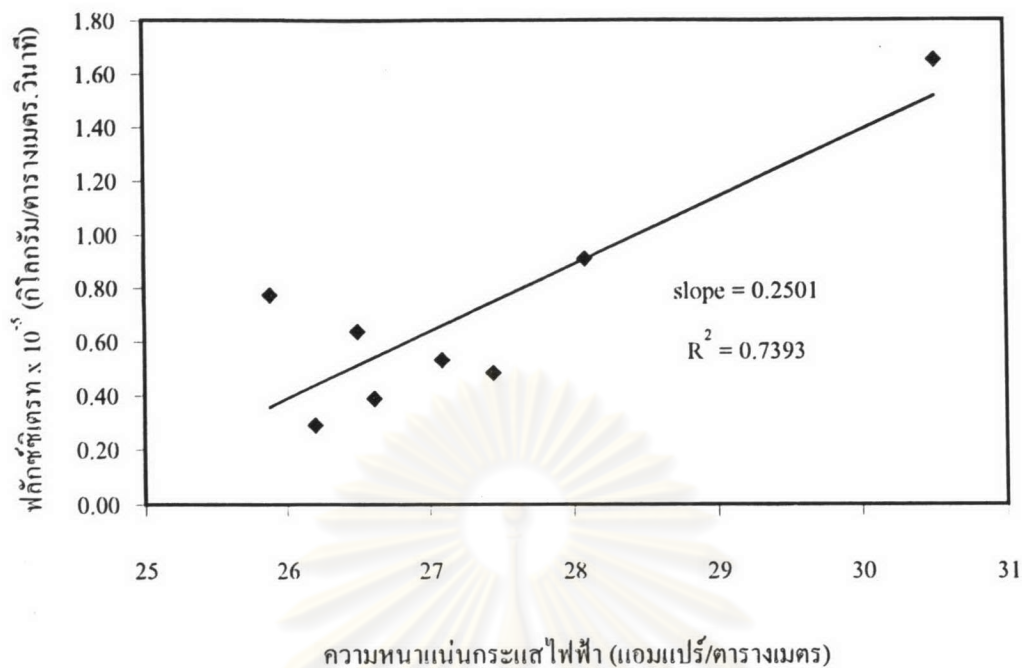
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์กระแสเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซัลเฟต 10 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 5 กรัมต่อลิตร



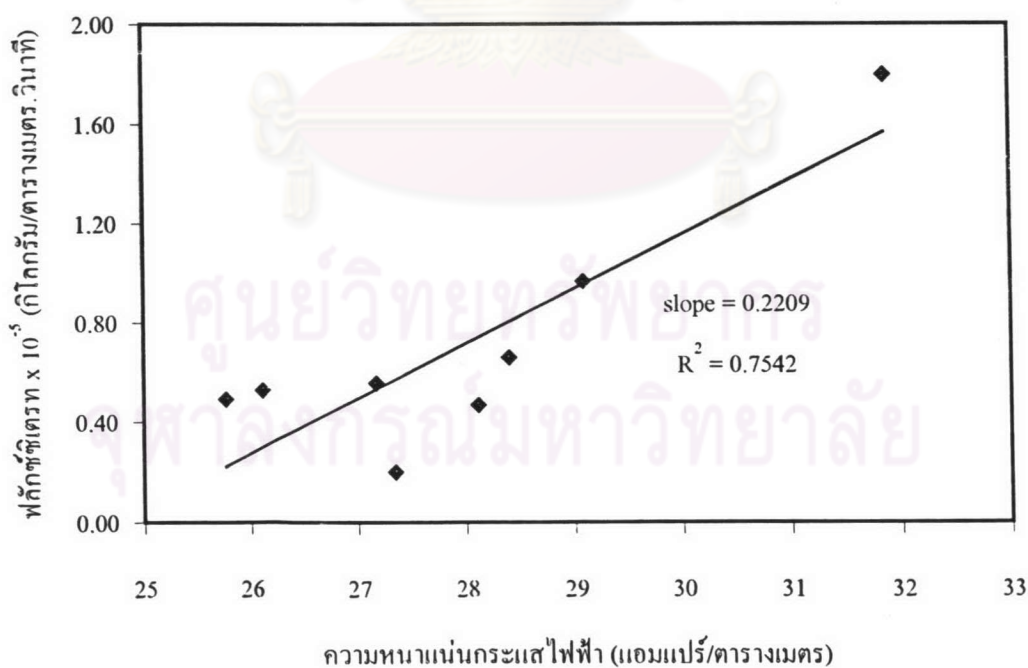
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมคลอไรด์ 30 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 15 กรัมต่อลิตร



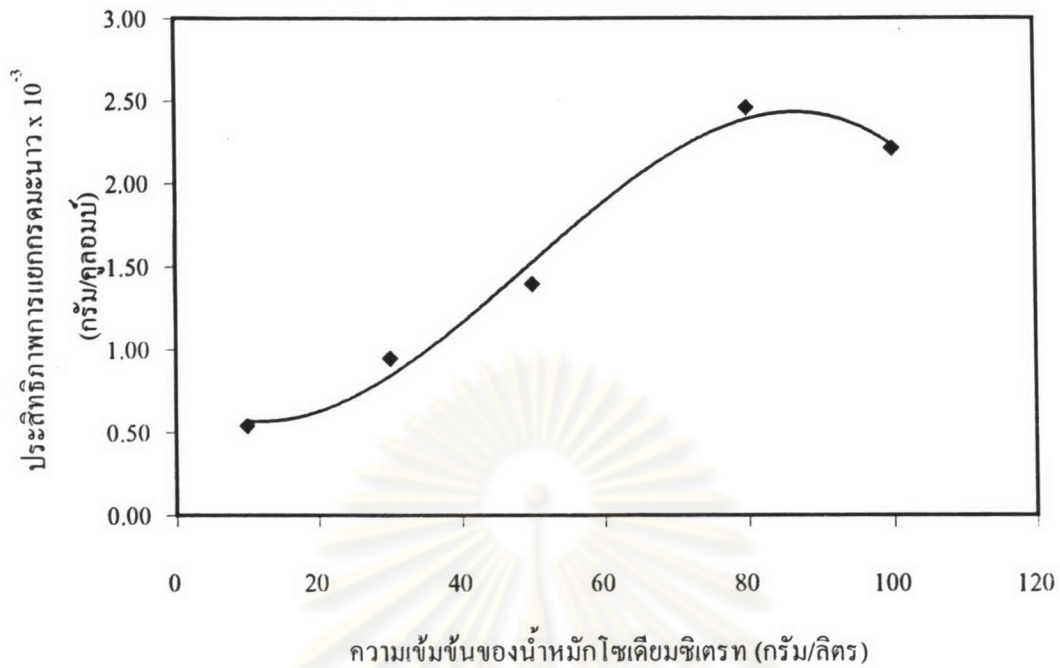
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมคลอไรด์ 50 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 25 กรัมต่อลิตร



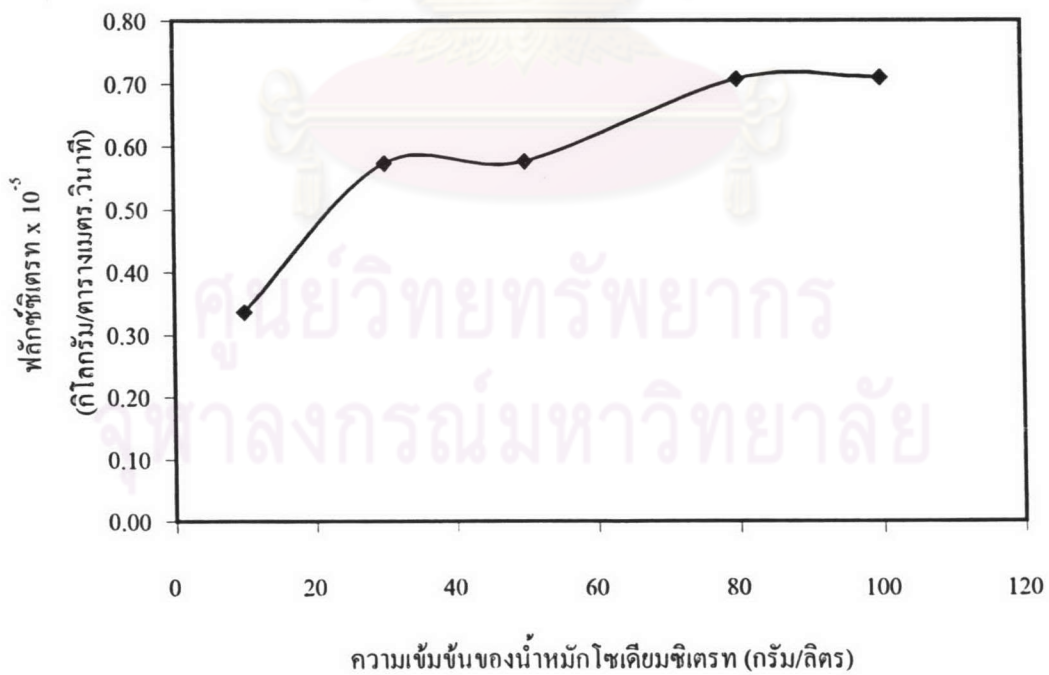
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซีเตรท 80 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 40 กรัมต่อลิตร



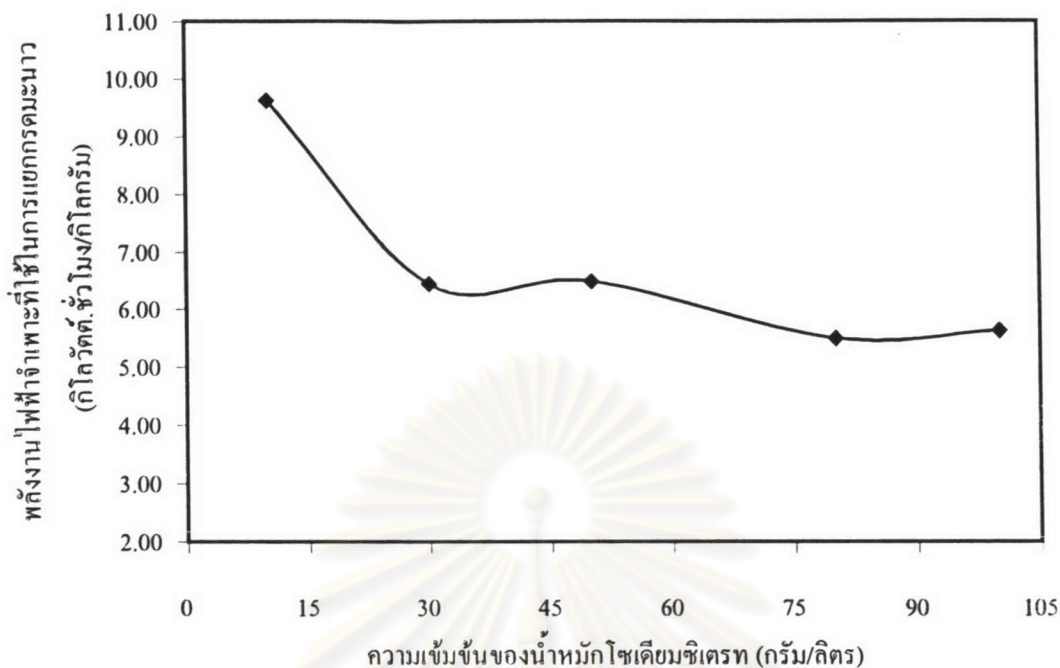
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมซีเตรท 100 กรัมต่อลิตรและสารละลายกรดมะนาว 50 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 3.20 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านคาร์บอเนตและน้ำหมักโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกคาร์บอเนต



รูปที่ 3.21 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านคาร์บอเนตและน้ำหมักโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อที่มีต่อค่าฟลักซ์ซีเตรต



รูปที่ 3.22 ผลของความเข้มข้นสารป้อนด้านกรรมะนาวและน้ำหมักโซเดียมคลอรีน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 ที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรรมะนาว

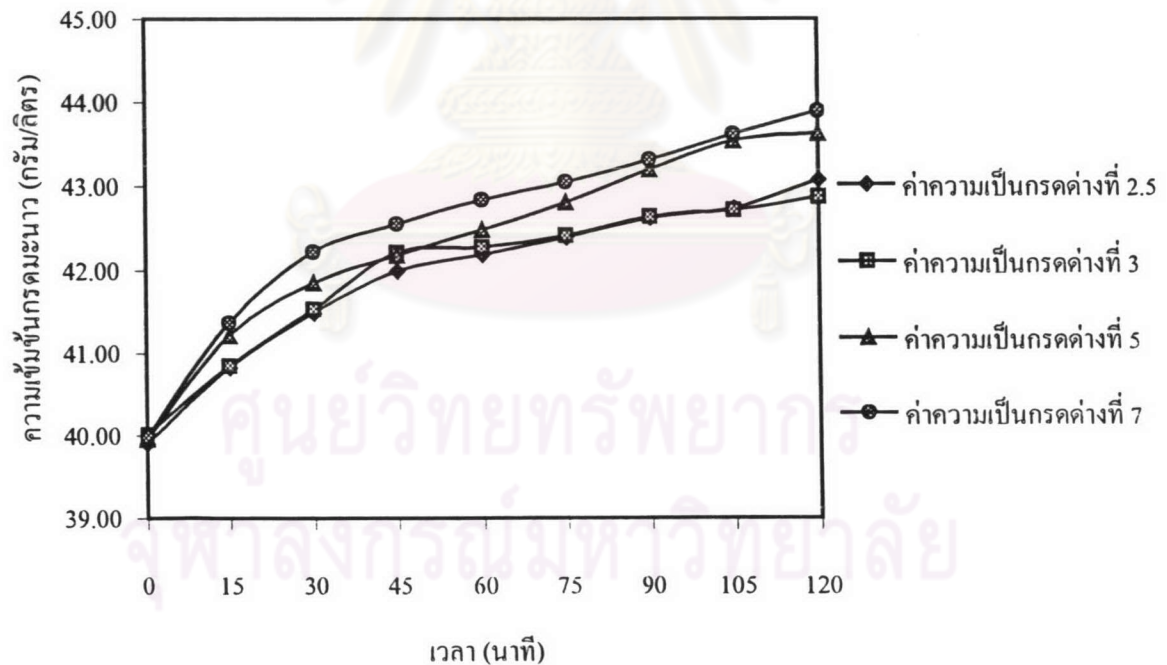
3.3 ผลของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมคลอรีนต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเพื่อการแยกกรรมะนาวจากน้ำหมัก

แปรค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมคลอรีนเป็น 2.5 3 5 และ 7 ซึ่งอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 โดยที่ค่าความเป็นกรดต่างที่ 2.5 เป็นตัวแทนตัวถูกละลายในรูปกรดซัลฟูริก ค่าความเป็นกรดต่างที่ 3 เป็นตัวแทนตัวถูกละลายในรูปโซเดียมคลอไรด์ ค่าความเป็นกรดต่างที่ 5 เป็นตัวแทนตัวถูกละลายในรูปโซเดียมคลอไรด์ และค่าความเป็นกรดต่างที่ 7 เป็นตัวแทนตัวถูกละลายในรูปโซเดียมคลอไรด์ โดยความเข้มข้นในช่องของกรรมะนาวมีความเข้มข้นกรรมะนาวเริ่มต้น 40 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำหมักโซเดียมคลอรีน 80 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.02 นอร์มัล ภาวะที่ใช้ คือ อัตราการไหลของสารละลาย 480 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 3.23-3.32 และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ.11-14 และ จ.29

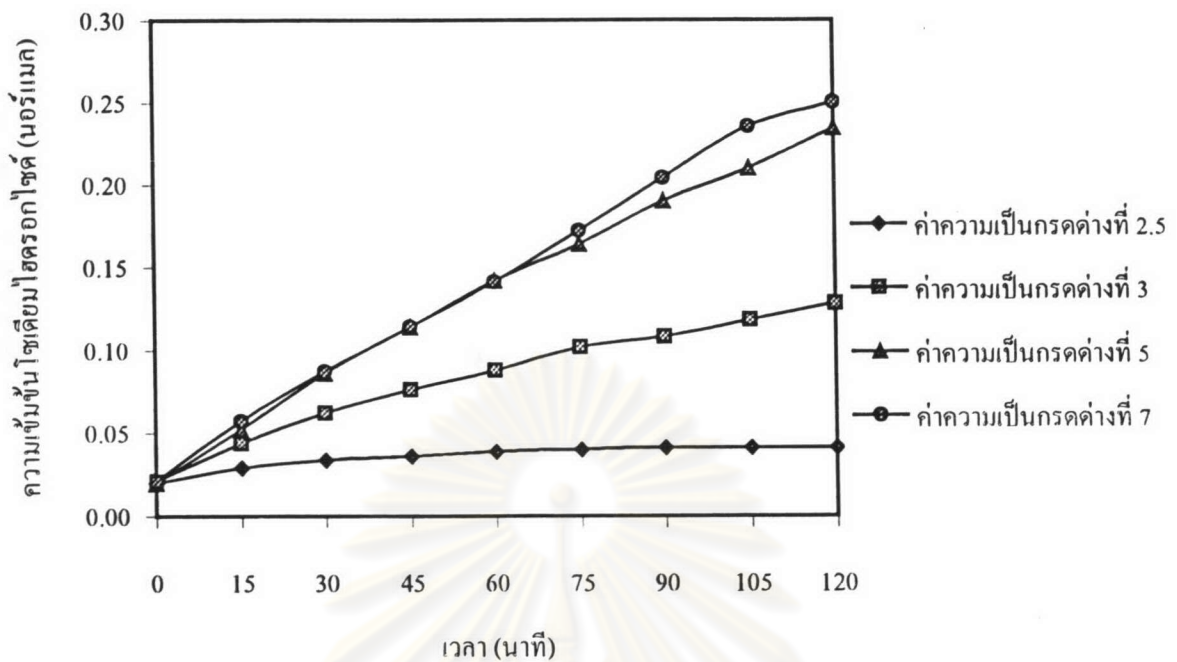
จากผลการทดลองพบว่า น้ำหมักโซเดียมคลอรีนที่มีค่าความเป็นกรดต่างสูงจะแยกให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำ เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรดต่างสูงมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง ที่ค่าความเป็นกรดต่างที่ 7 แยกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 0.25 นอร์มัลในเวลากการทดลอง 120 นาที ซึ่งความเข้มข้นสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างที่ 2.5 ถึง 6.2 เท่า นอกจากนี้ยัง

พบว่าที่ค่าความเป็นกรดค่าสูงขึ้น การนำไฟฟ้าจะมากขึ้น กระแสไฟฟ้าจึงสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถแยกกรดมะนาวได้ความเข้มข้นสูงมากขึ้น ทั้งนี้ถึงแม้ว่าค่าความเป็นกรดค่าสูงจะนำไฟฟ้าได้ดีและแยกกรดมะนาวได้ความเข้มข้นมากขึ้นแต่ ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวกลับมีแนวโน้มต่ำลงและต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะในการแยกสารสูง ซึ่งค่าความเป็นกรดค่าที่ 2.5 และ 7 มีประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวเป็น 3.32×10^{-3} และ 1.94×10^{-3} กรัมต่อลูกอมบ์ ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นกรดค่าที่ 3 และ 5 มีประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวไม่แตกต่างกัน

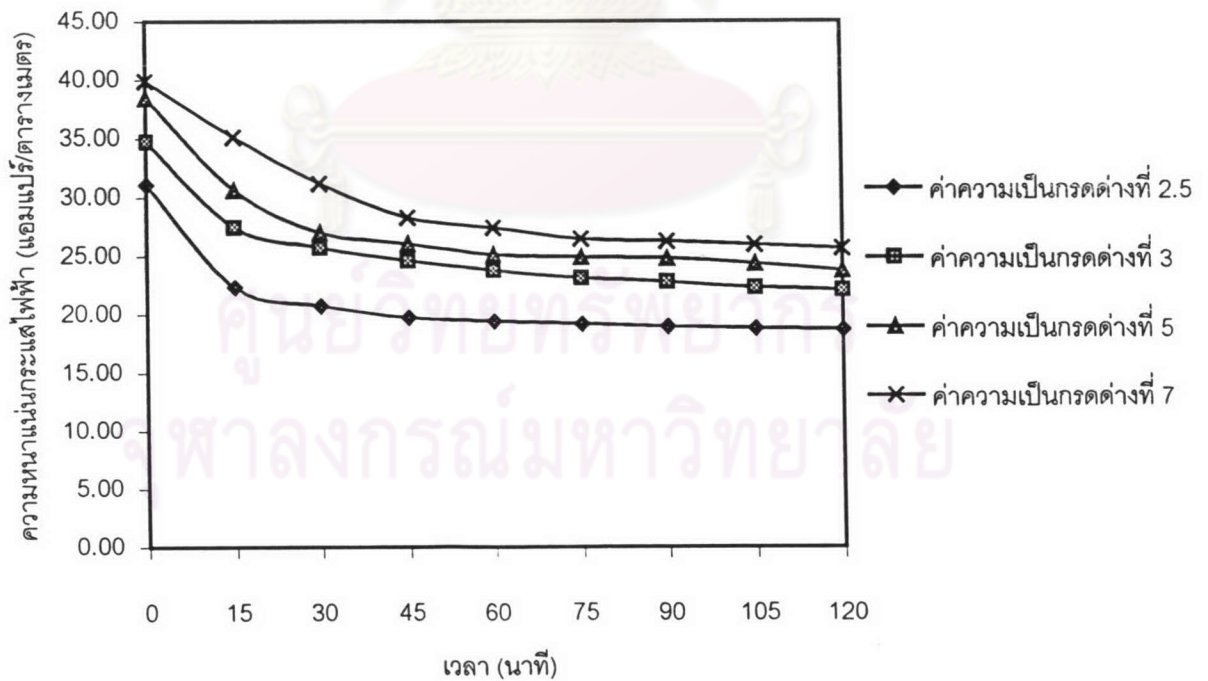
สำหรับน้ำหมักที่ได้จากเชื้อราสามารถนำมาแยกกรดมะนาวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในกระบวนการผลิตกรดมะนาวด้วยเชื้อราจะควบคุมค่าความเป็นกรดค่าให้อยู่ที่ระดับค่า (Annadurai และคณะ, 1996) อย่างไรก็ตามสำหรับการผลิตกรดมะนาวจากยีสต์นั้น ค่าความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ค่าประมาณ 5 ถึง 6 แต่ถ้าจะนำน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่ได้ไปปรับความเป็นกรดค่าให้ต่ำก่อนนำไปเข้ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสก็เป็นการสิ้นเปลือง เนื่องจากกรดมะนาวมีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์จึงต้องใช้กรดปริมาณมากในการปรับ ดังนั้นจึงเลือกค่าความเป็นกรดค่าที่ 5 เช่นเดียวกับการผลิตเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



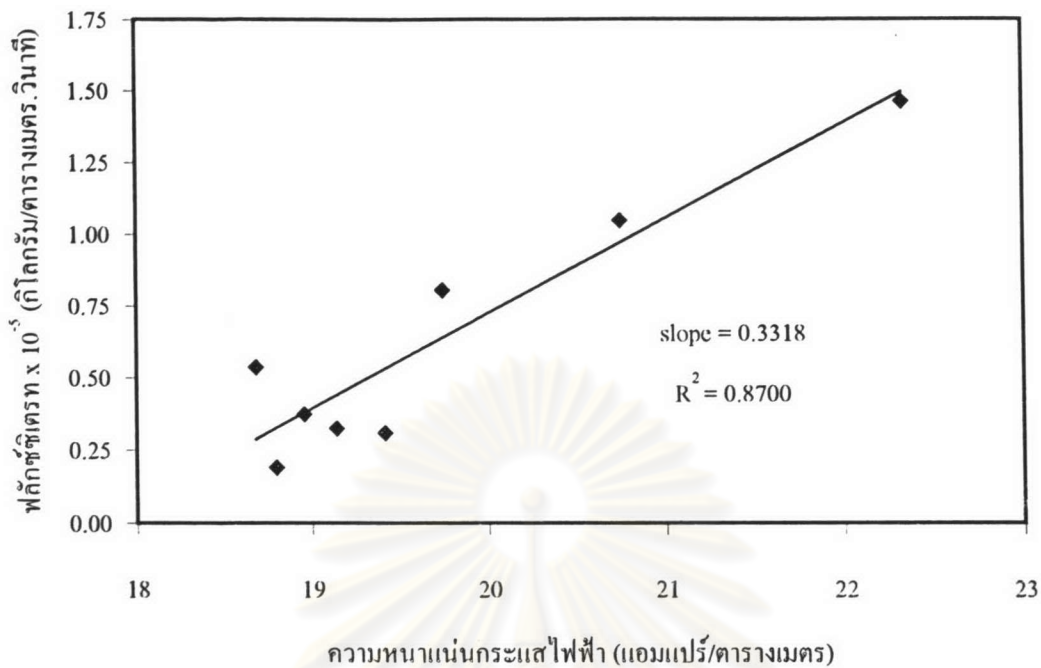
รูปที่ 3.23 ผลของค่าความเป็นกรดค่าของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อการแยกกรดมะนาวด้วยอิเล็กโทรไลซิส



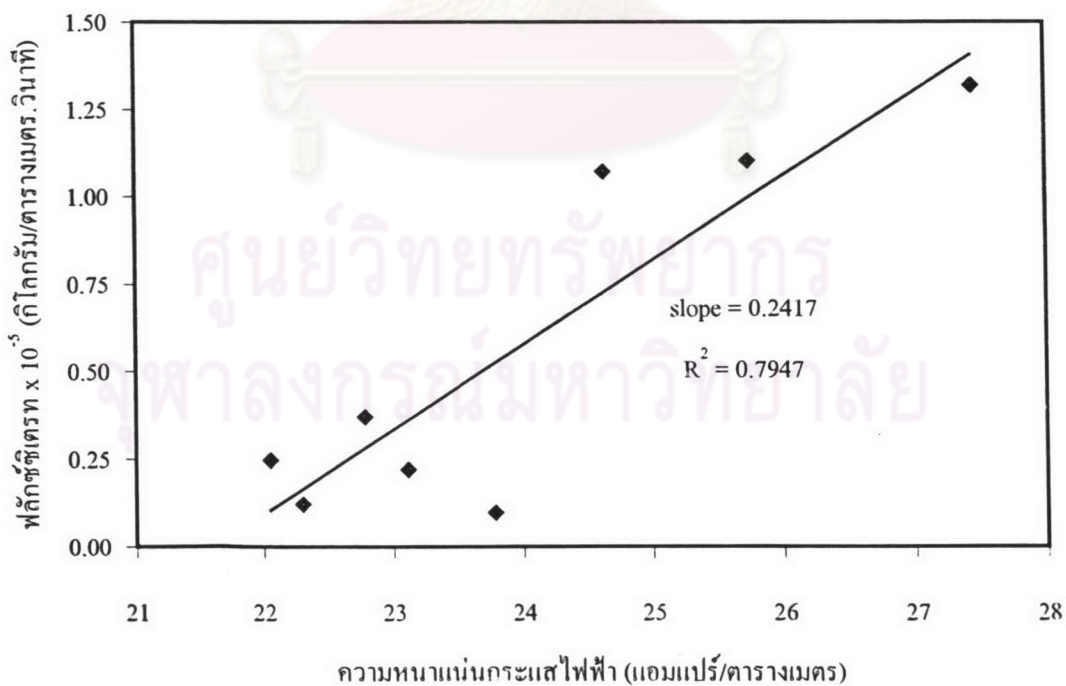
รูปที่ 3.24 ผลของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมไฮโปคลอไรต์ที่มีต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไลซิส



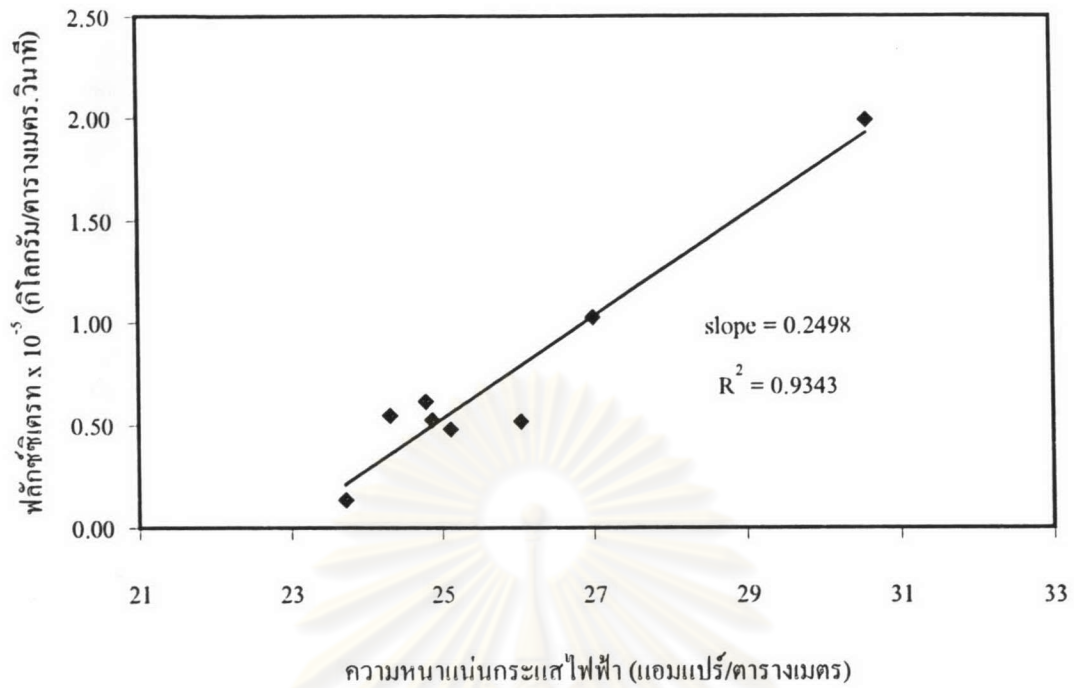
รูปที่ 3.25 ผลของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมไฮโปคลอไรต์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



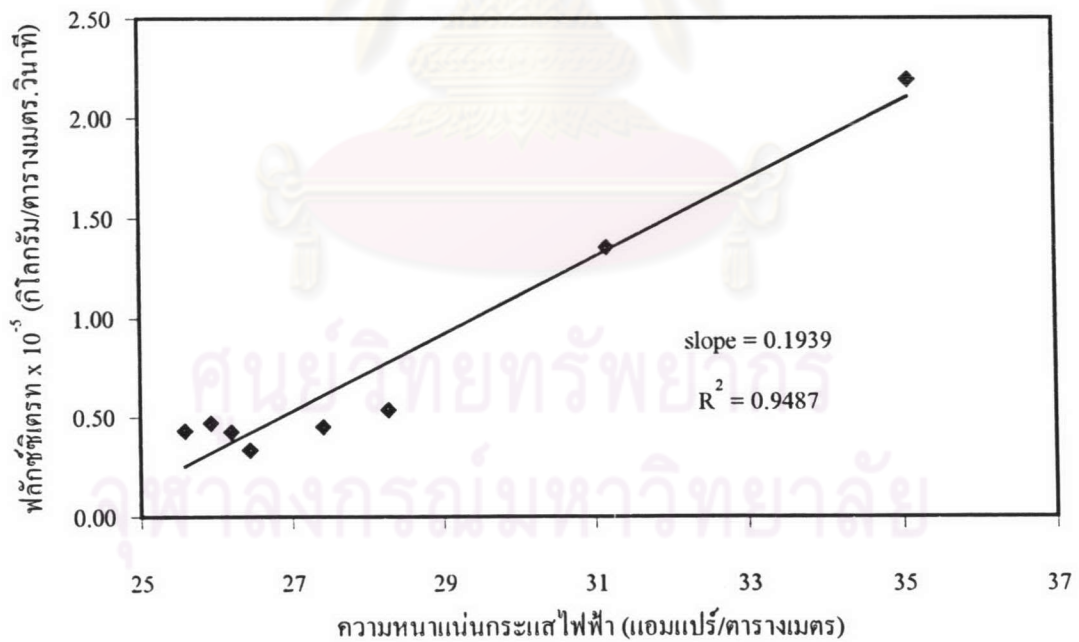
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์คลอโรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมคลอไรด์ที่ 2.5



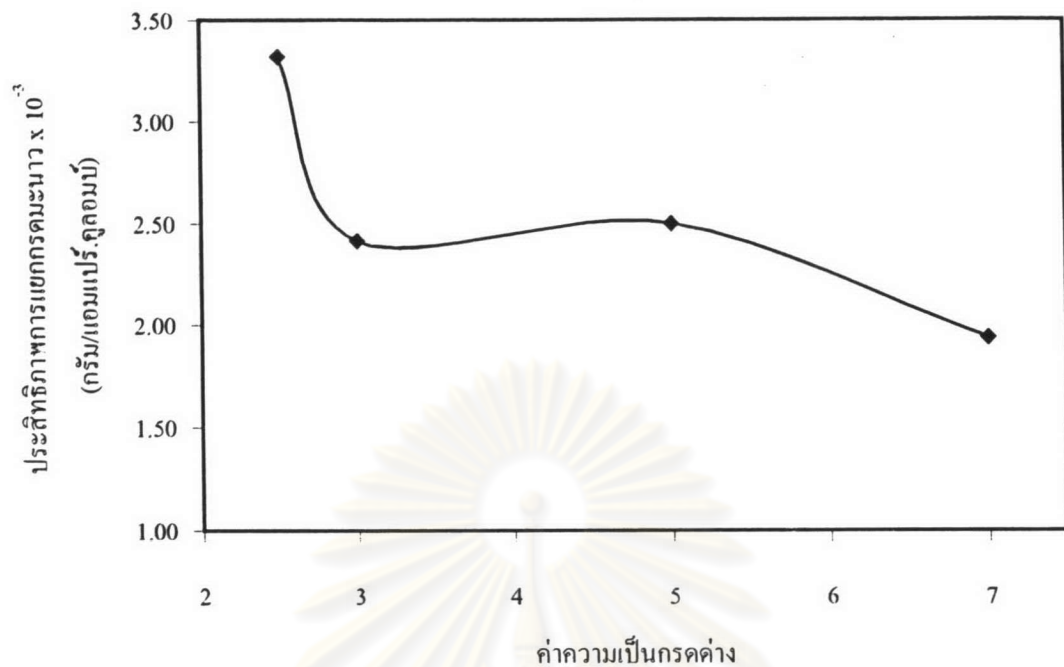
รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์คลอโรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมคลอไรด์ที่ 3



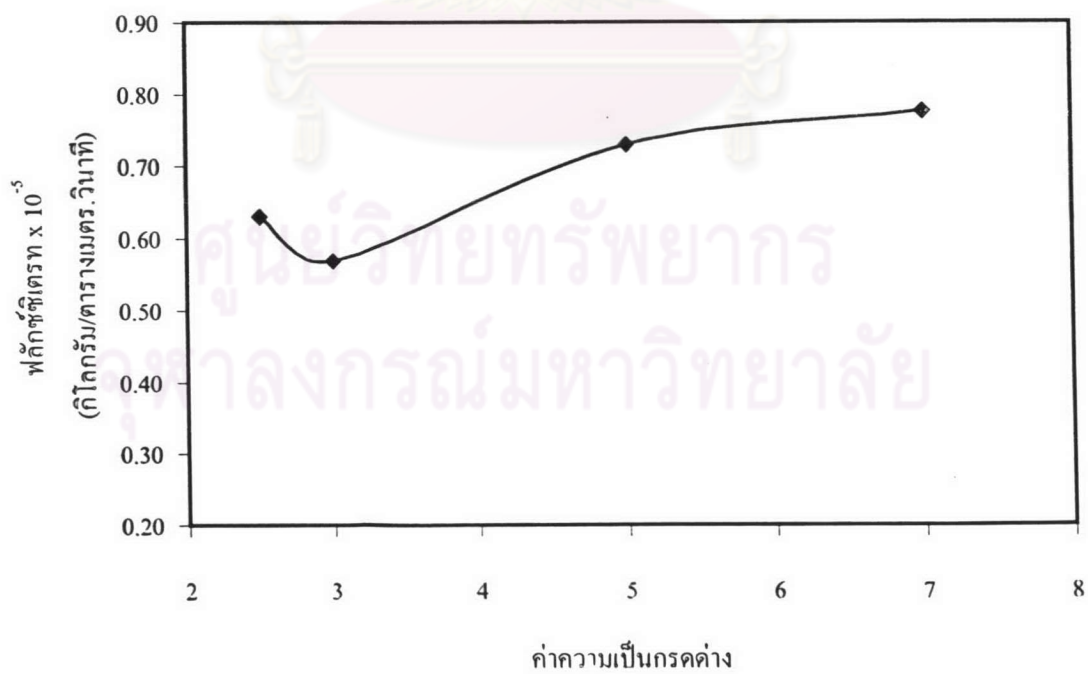
รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ไนเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมซัลเฟตที่ 5



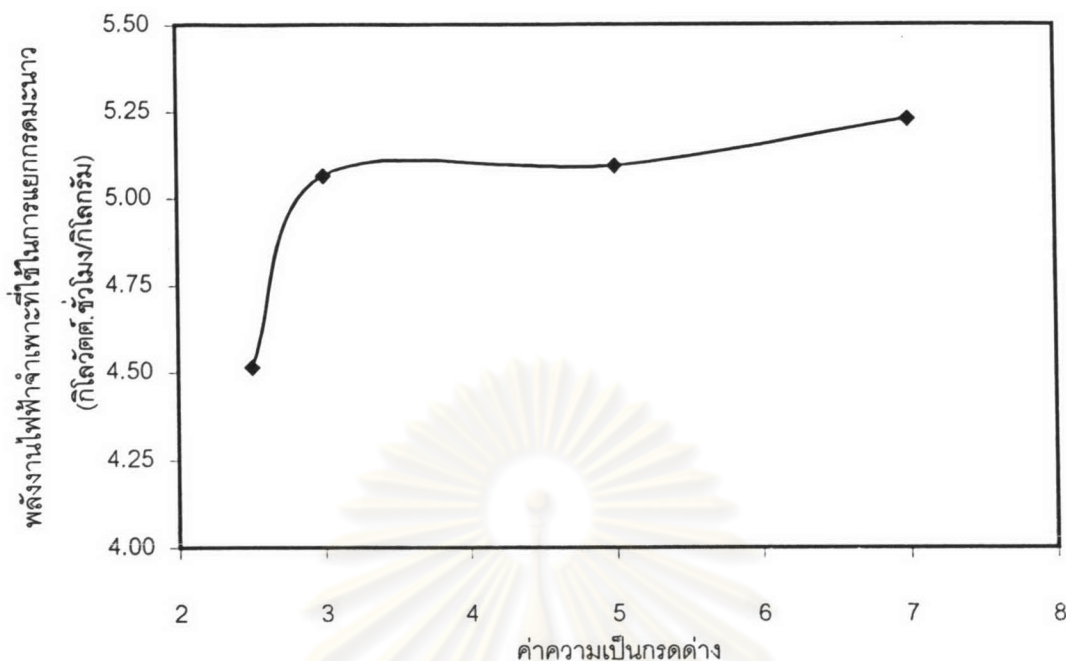
รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ไนเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมซัลเฟตที่ 7



รูปที่ 3.30 ผลของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว



รูปที่ 3.31 ผลของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อค่าฟลักซ์ซีเตรท



รูปที่ 3.32 ผลของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำหมักโซเดียมซิเตรทที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรรมะนาว

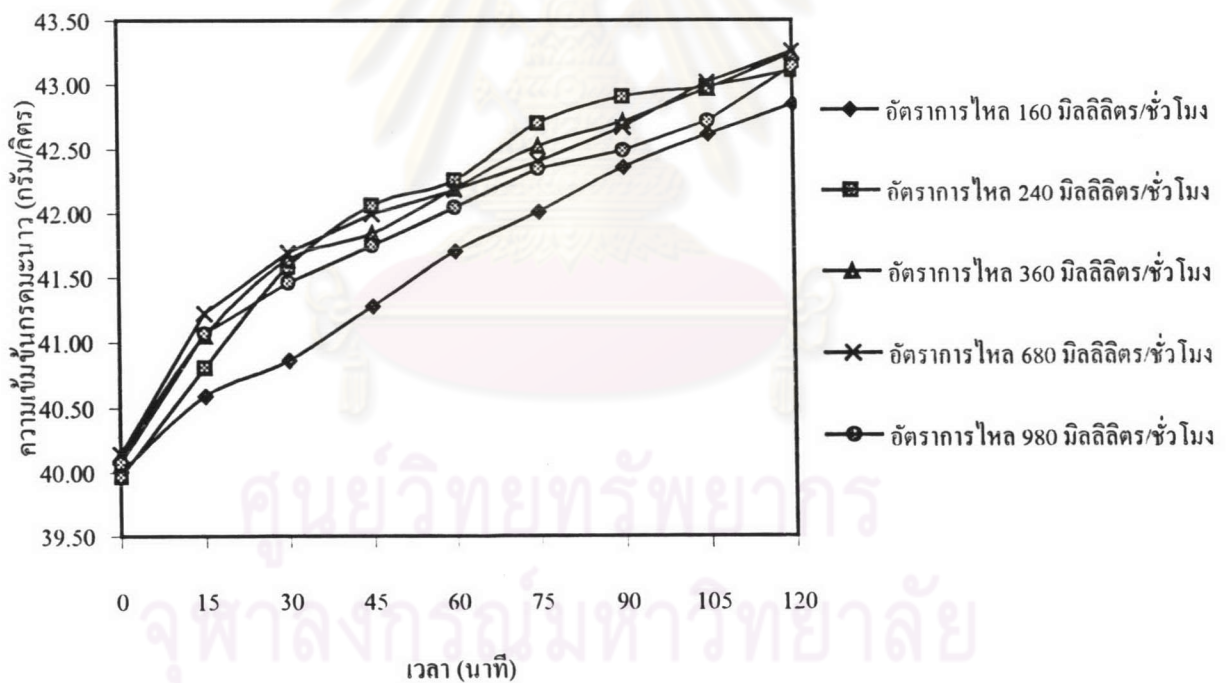
3.4 ผลของอัตราการใช้ของสารละลายต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเพื่อการแยกกรรมะนาวจากน้ำหมัก

แปรอัตราการใช้ของสารป้อน เป็น 160 240 360 680 และ 980 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง หรือคิดเป็นอัตราไหลในหน่วยปริมาตรสัมพันธ์กับปริมาตรจูนโมดูลเท่ากับ 10.55 15.86 23.75 44.84 และ 64.62 ต่อชั่วโมง โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารป้อนด้านกรรมะนาว น้ำหมักโซเดียมซิเตรท และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 40 80 กรัมต่อลิตร และ 0.02 นอร์มัล ตามลำดับ ภาวะที่ใช้ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 33-43 และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ.15-19 และ จ.30

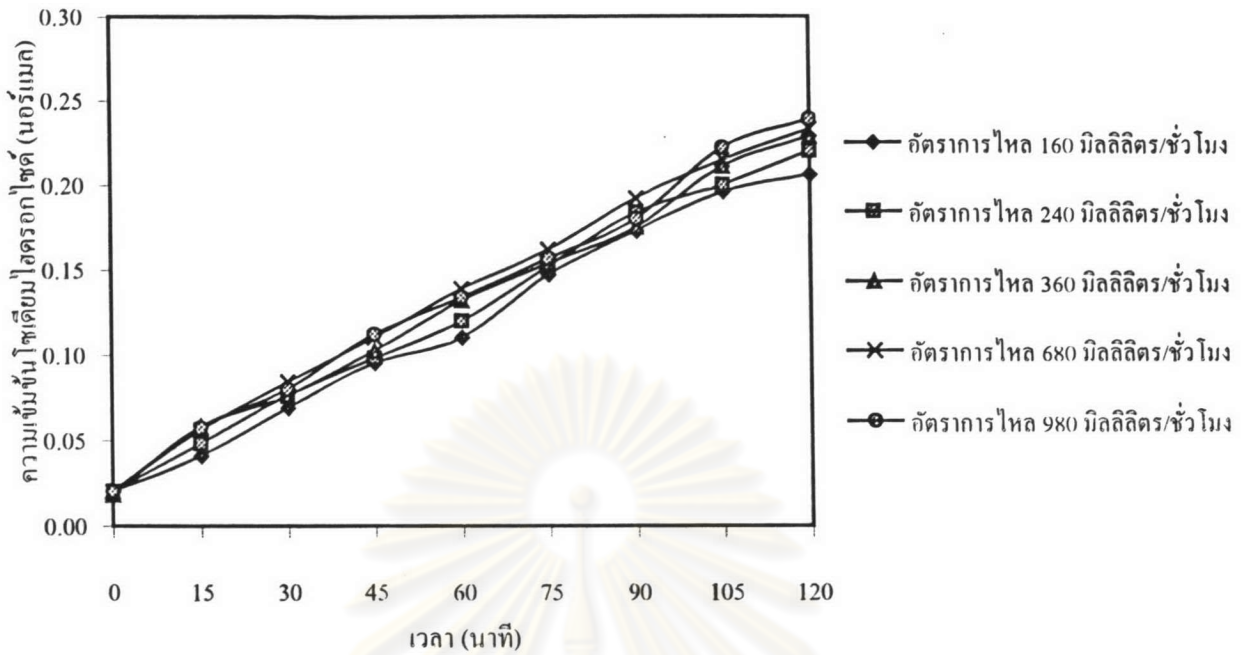
จากผลการทดลองจะเห็นว่า ที่อัตราการใช้ของสารละลายค่าๆที่ 160 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ค่าฟลักซ์ซิเตรทและประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาวมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของสารละลายเป็น 240 ถึง 680 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ค่าฟลักซ์ซิเตรทและประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาวมีค่าสูงขึ้นซึ่งในช่วงนี้ค่าฟลักซ์ซิเตรทและประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาวไม่แตกต่างกันมากนัก และที่อัตราการใช้ของสารละลาย 980 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง มีแนวโน้มให้เห็นว่าที่อัตราการใช้ของสารละลายสูงเกินไปฟลักซ์ซิเตรทและประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาวมีค่าต่ำลง โดยพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรรมะนาวมีค่าสูงขึ้น

โดยการทดลองของ Hattenbach และ Kneifel (1986) อธิบายว่า สำหรับอัตราการไหลที่ต่ำมากเกินไปนั้นจะก่อให้เกิด concentration polarization ที่มีชั้นขอบเขตหนา แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสูงขึ้น จะเป็นการลดชั้นขอบเขตที่เปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทานให้บางลง จึงสามารถแยกสารละลายได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้อัตราการไหลที่สูงเกินไปนั้นตัวถูกละลายจะอยู่ในระบบเป็นเวลานานทำให้แยกสารได้ไม่ดี และเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของปั๊มมากเกินไป ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงหรือคิดเป็นอัตราไหลในหน่วยปริมาตรสัมพันธ์เทียบกับปริมาตรจุลินโมดูลเท่ากับ 15.86 ต่อชั่วโมง ใช้ในการทดลองต่อไป

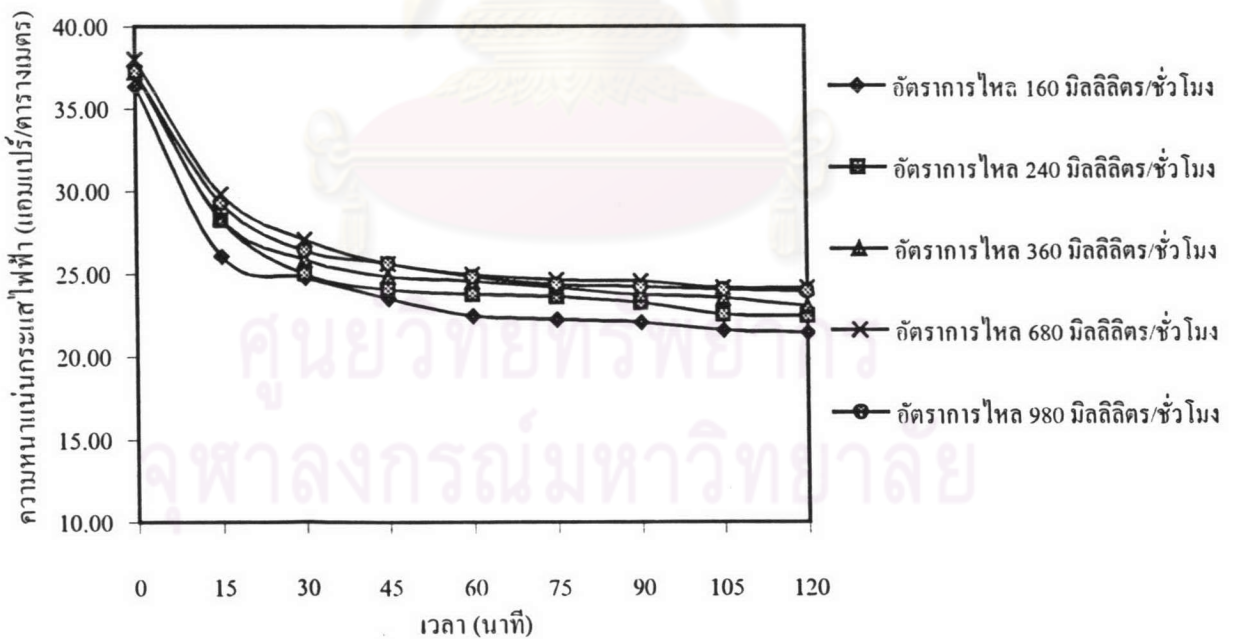
นอกจากนี้ สำหรับโมดูลที่ใช้ในการทดลองนั้น สารป้อนจะมีทิศทางไหลตั้งฉากกับทิศทางของตัวถูกละลายที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่น (cross flow) และได้ออกแบบให้มี spacer ที่เป็นแผ่นตะแกรงพลาสติกกันอยู่ระหว่างเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นกับเยื่อแผ่นเพื่อให้ระบบภายในโมดูลเกิดการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ เพื่อช่วยลดการเกิด concentration polarization (Baker, 2000)



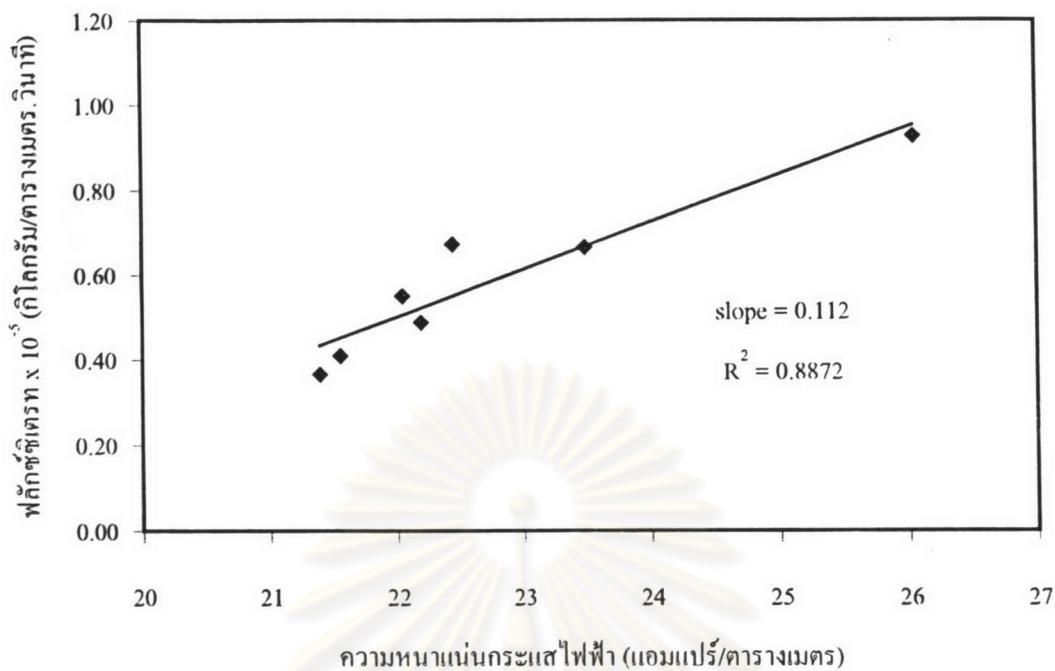
รูปที่ 3.33 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อการแยกกระดมนาวด้วยอิเล็กโทรไดอะลิซิส



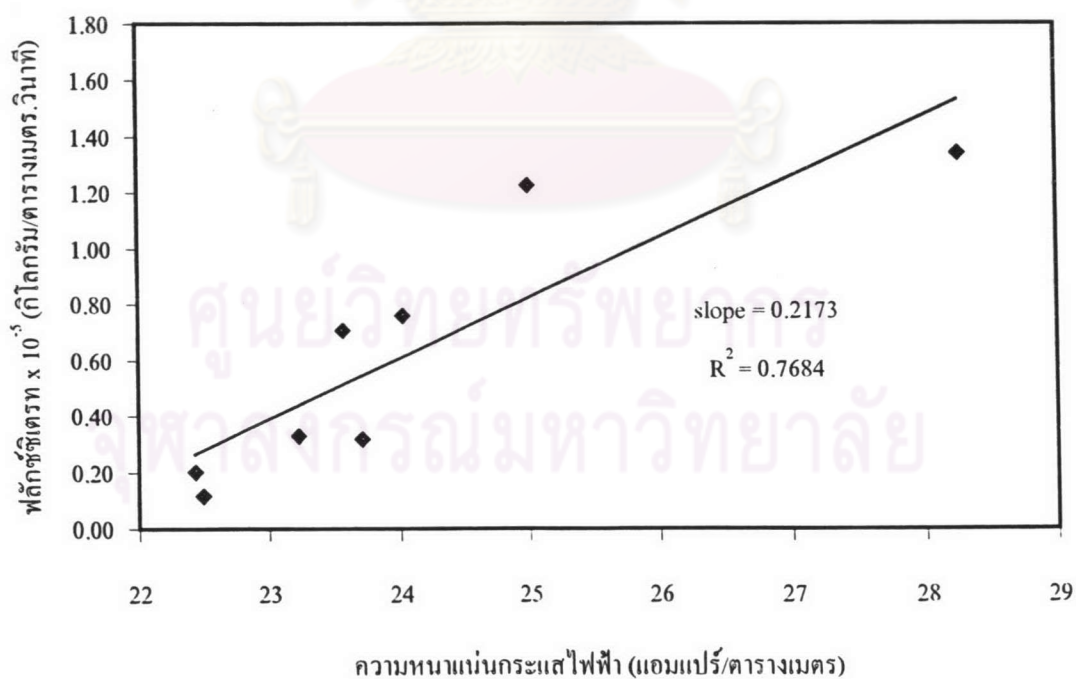
รูปที่ 3.34 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อการแยกโชนีคลอโรฟิลล์ด้วยอิเล็กโทรไลซิส



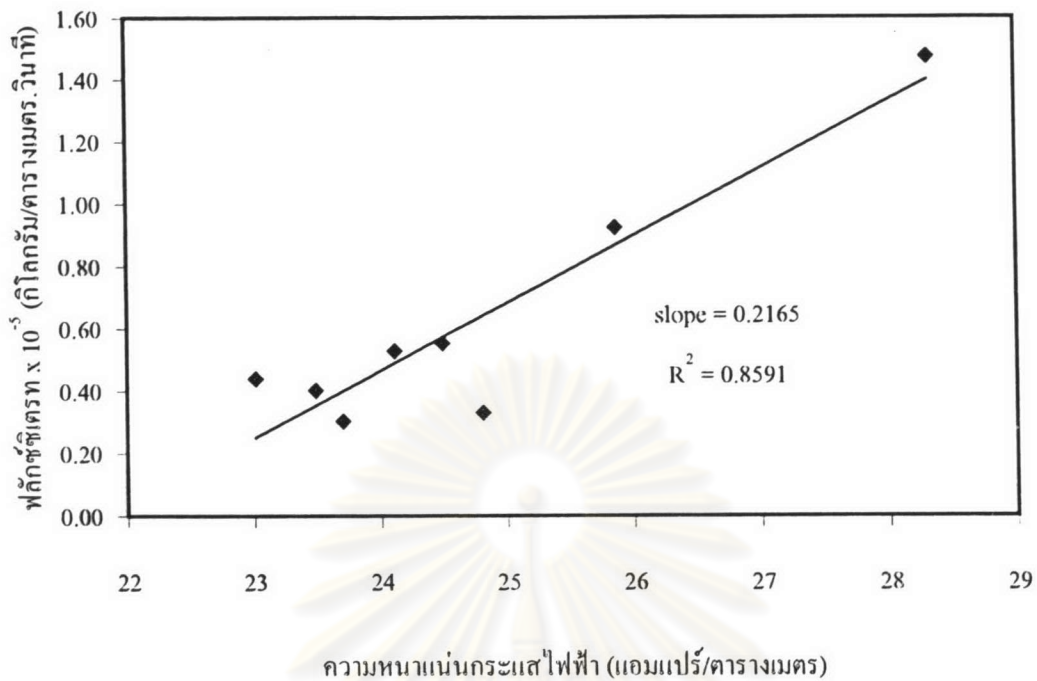
รูปที่ 3.35 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



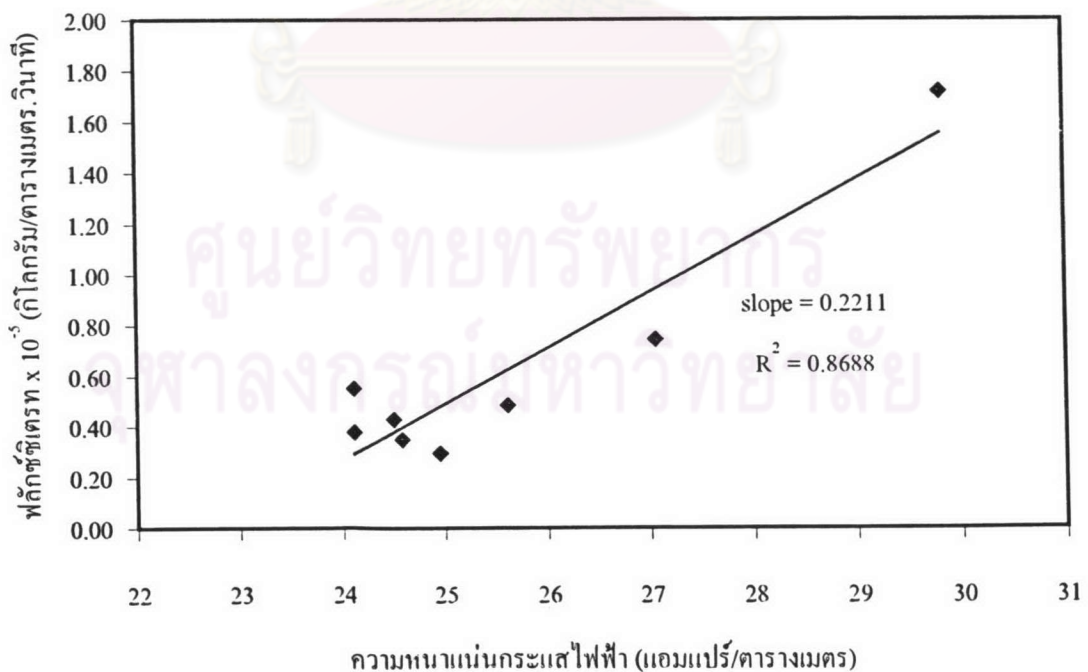
รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเทรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 160 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



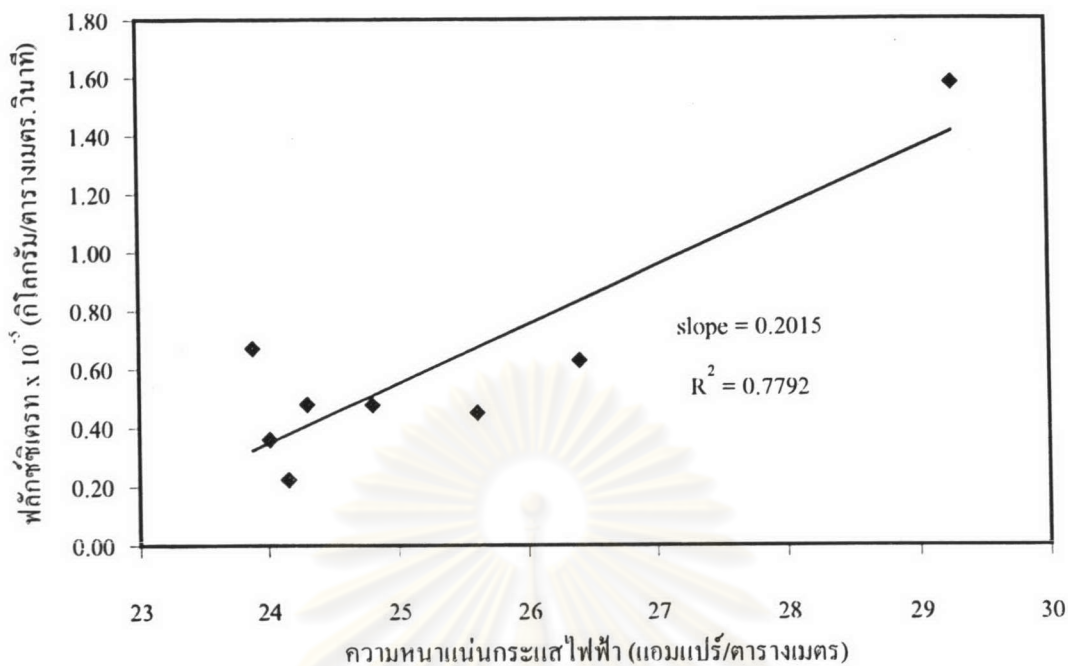
รูปที่ 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเทรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



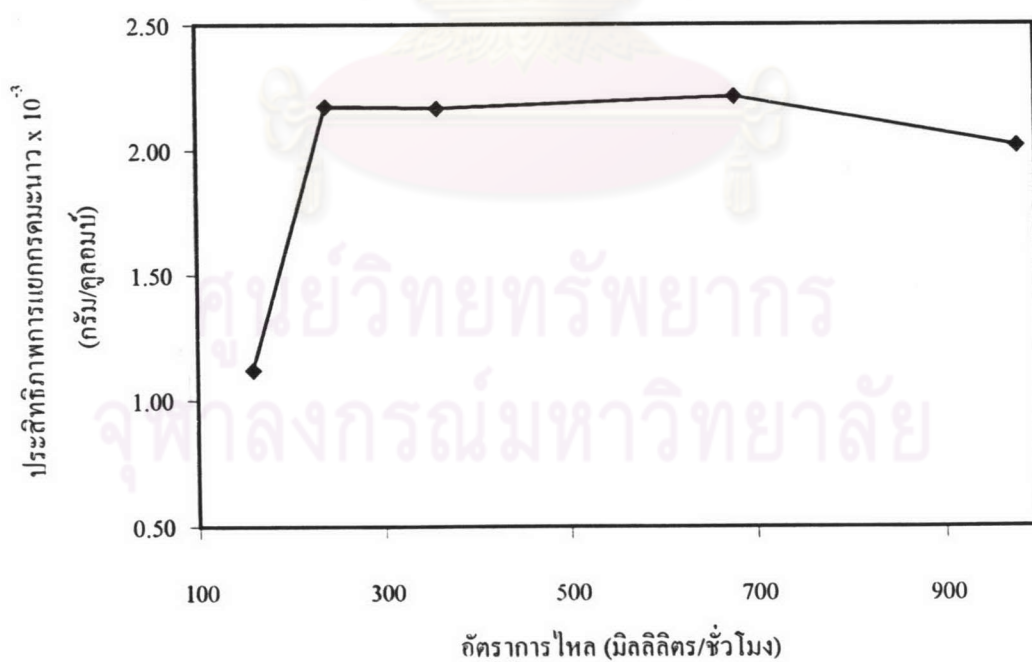
รูปที่ 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีตรอนเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดอะมิโน ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 360 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



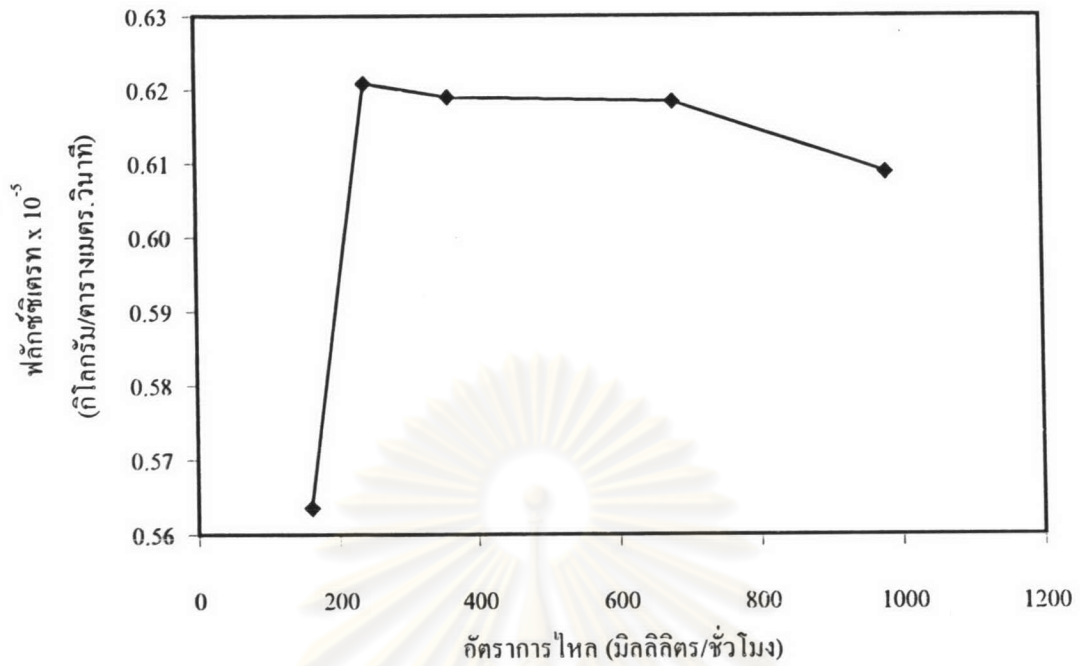
รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีตรอนเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดอะมิโน ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 680 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



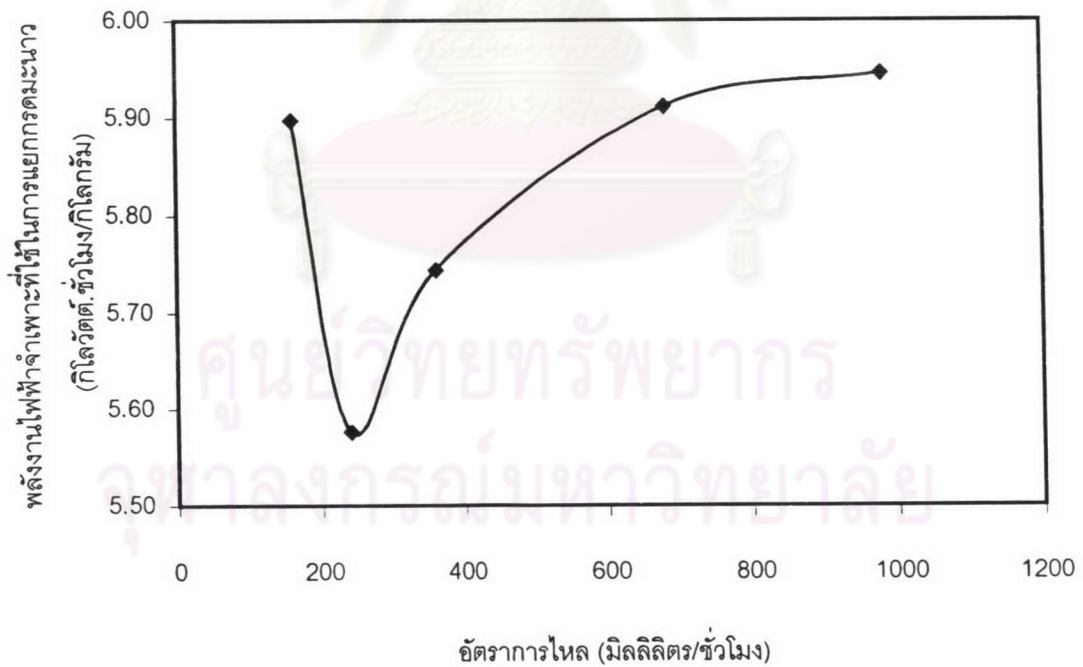
รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อัตราการไหลของสารป้อนเป็น 980 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.41 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว



รูปที่ 3.42 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อค่าฟลักซ์คลอรีน

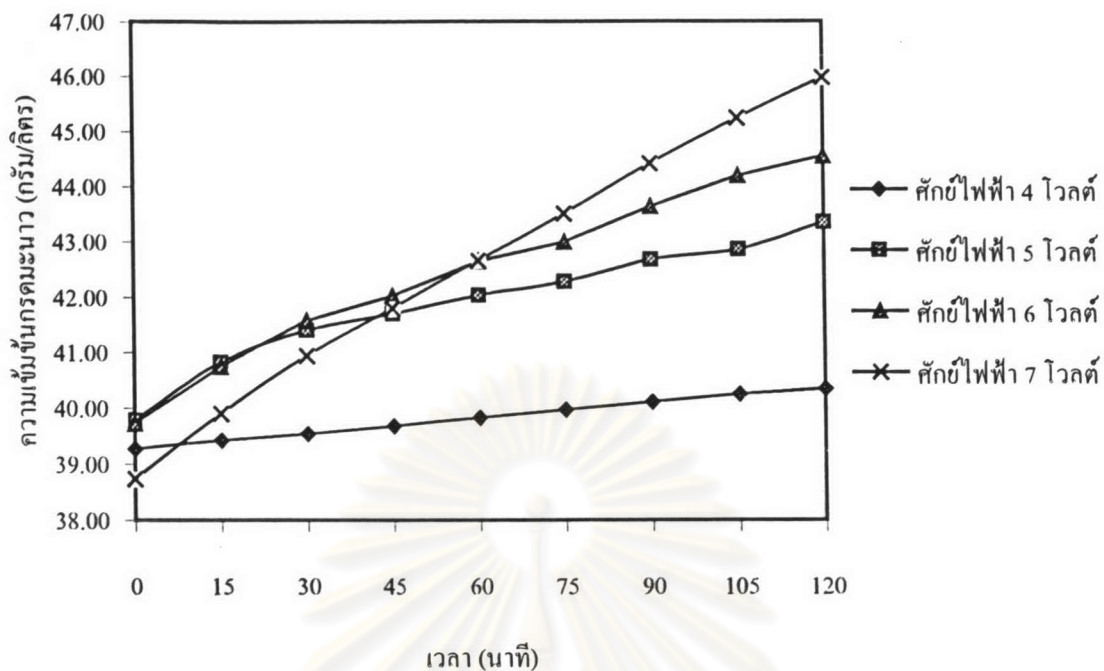


รูปที่ 3.43 ผลของอัตราการไหลของสารละลายที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว

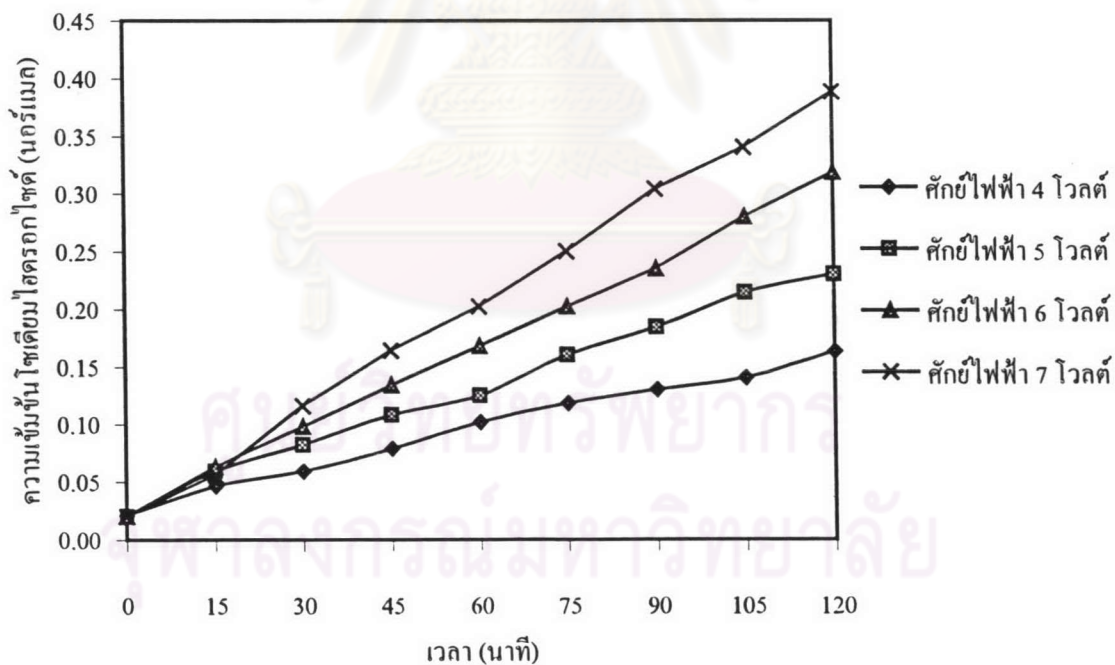
3.5 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเพื่อการแยกกรดมะนาวจากน้ำหมัก แปรค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 4 5 6 และ 7 โวลต์โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารป้อนด้านกรดมะนาว น้ำหมักโซเดียมซิเตรทและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 40 80 กรัมต่อลิตร และ 0.02 นอร์มัล ตามลำดับ ภาวะที่ใช้ คือ อัตราการไหลของสารป้อน 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 3.44-3.53 และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ. 20-23 และ จ.31

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นตาม ทำให้สามารถแยกกรดมะนาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงมากขึ้น ซึ่งฟลักซ์ซิเตรทก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวไม่ได้แปรโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์มีประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวสูงสุดและพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาวน้อยที่สุด เป็น 2.50×10^{-3} กรัมต่อคูลอมบ์ และ 5.48 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าที่ 5 โวลต์ พบว่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวกลับต่ำลง โดย Bonnin และ Linnhoff (1988) ได้อธิบายว่าการใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงหรือศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะทำให้เกิด concentration polarization ได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงจะเป็นการเร่งปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดแก๊สมากขึ้น หรือเกิด kinetic polarization นั่นเอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวต่ำลง ทั้งนี้การแก้ปัญหา kinetic polarization สามารถทำได้โดยลดศักย์ไฟฟ้าหรือมีการเติมสาร depolarizer ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ง่าย จึงทำให้ไม่เกิดแก๊สบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โดยสาร depolarizer ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียก cathode depolarizer เช่น สารไอออนไนเตรท และสาร depolarizer ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียก anode depolarizer เช่น ไฮดรารซีน อย่างไรก็ตามการเติมสาร depolarizer ไม่สามารถเติมลงในผลิตภัณฑ์กรดมะนาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยตรง เพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ควรมีการออกแบบโมดูลอิเล็กโทรไลซิสให้มีช่องสำหรับสาร depolarizer หล่อผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

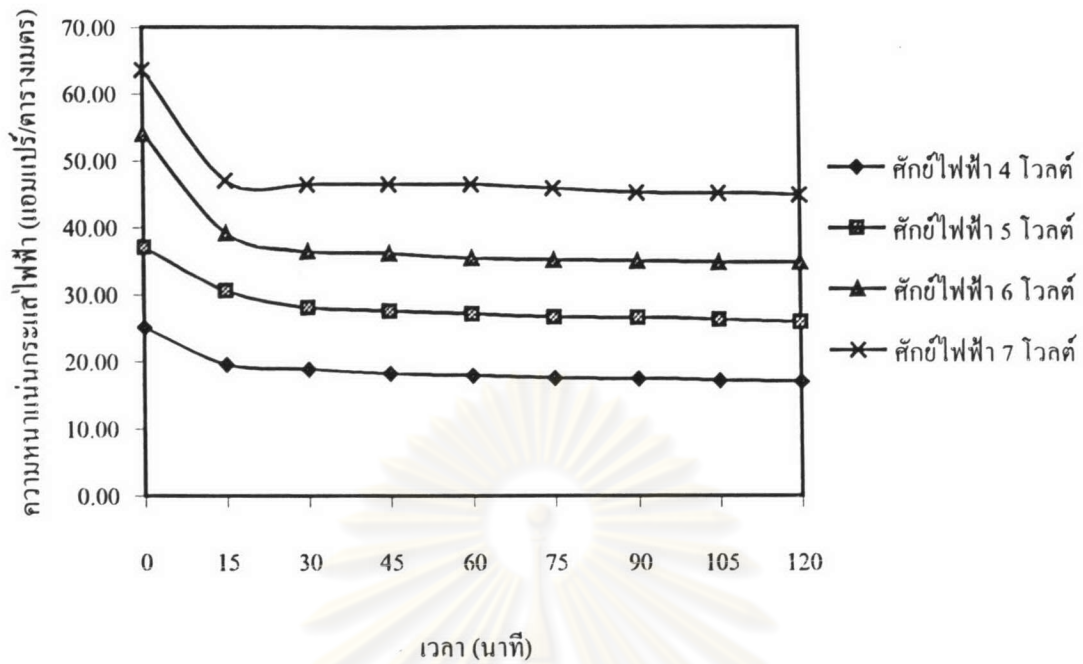
อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองนี้ที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ให้ประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาวที่สูงสุดจึงได้เลือกศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ไปใช้ในการทดลองต่อไป



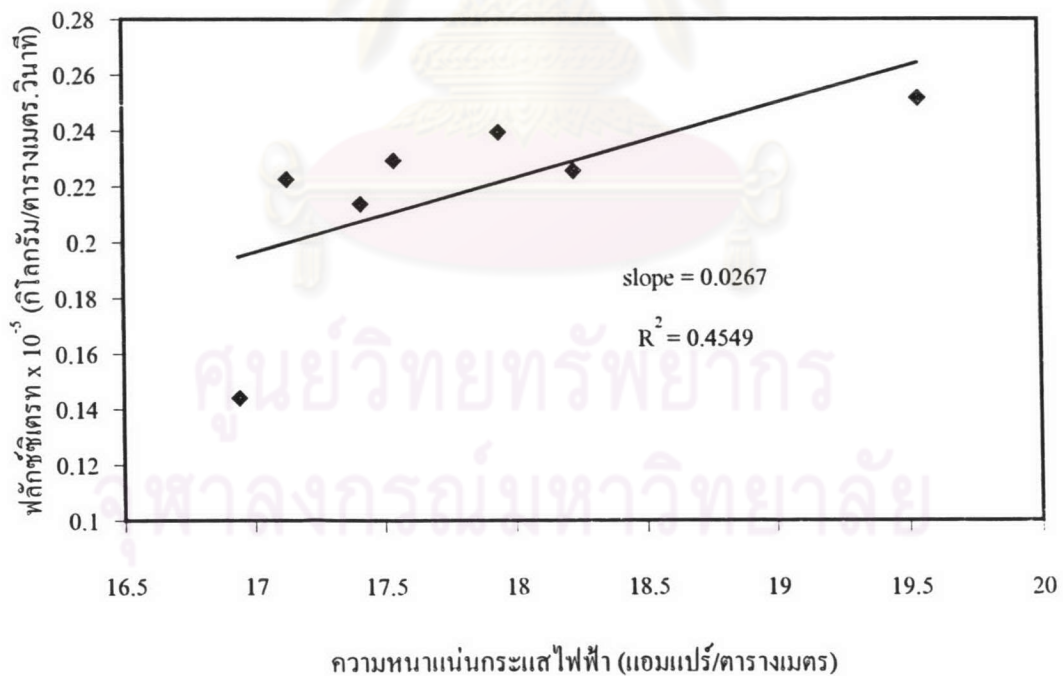
รูปที่ 3.44 ผลของสัคยไฟฟาต่อการแยกกรรมะนาวด้วยอิเล็กโทรไลซิส



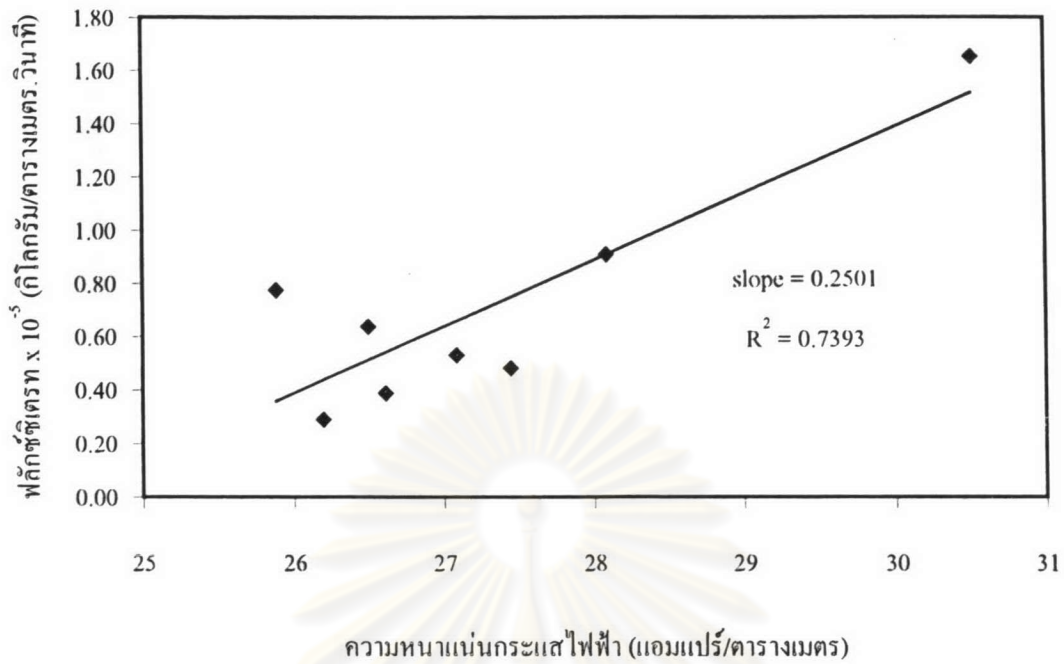
รูปที่ 3.45 ผลของสัคยไฟฟาต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไลซิส



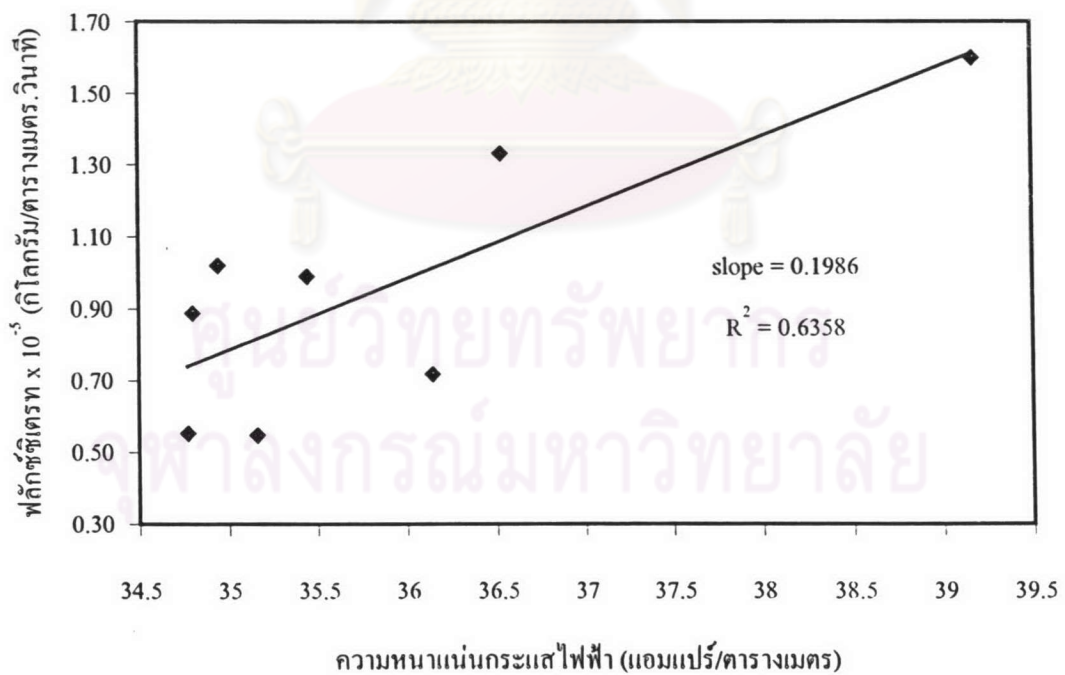
รูปที่ 3.46 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



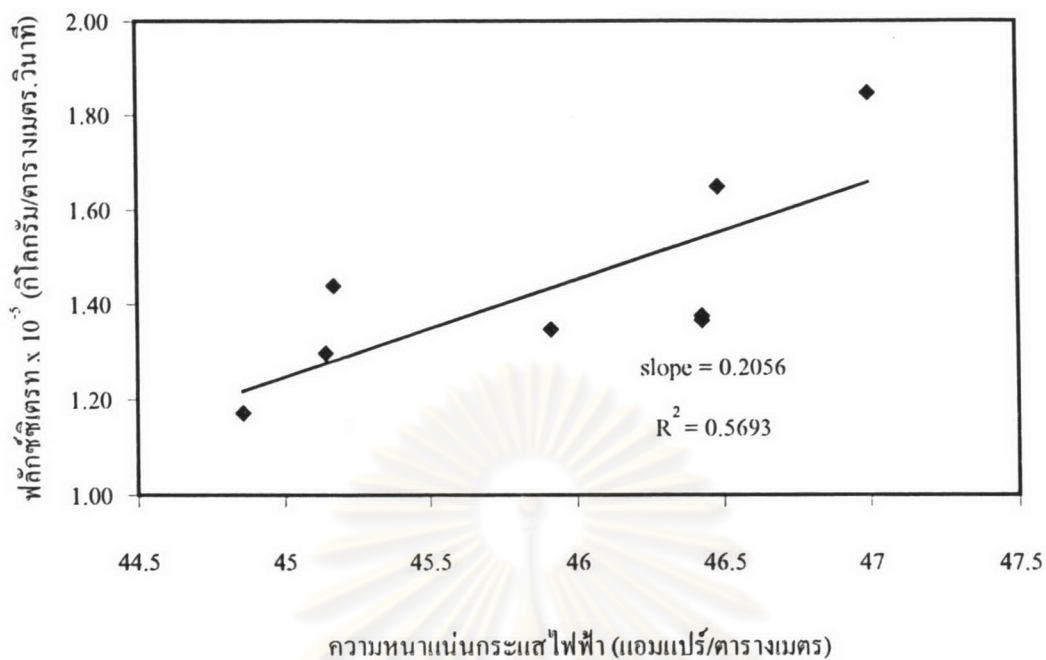
รูปที่ 3.47 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์



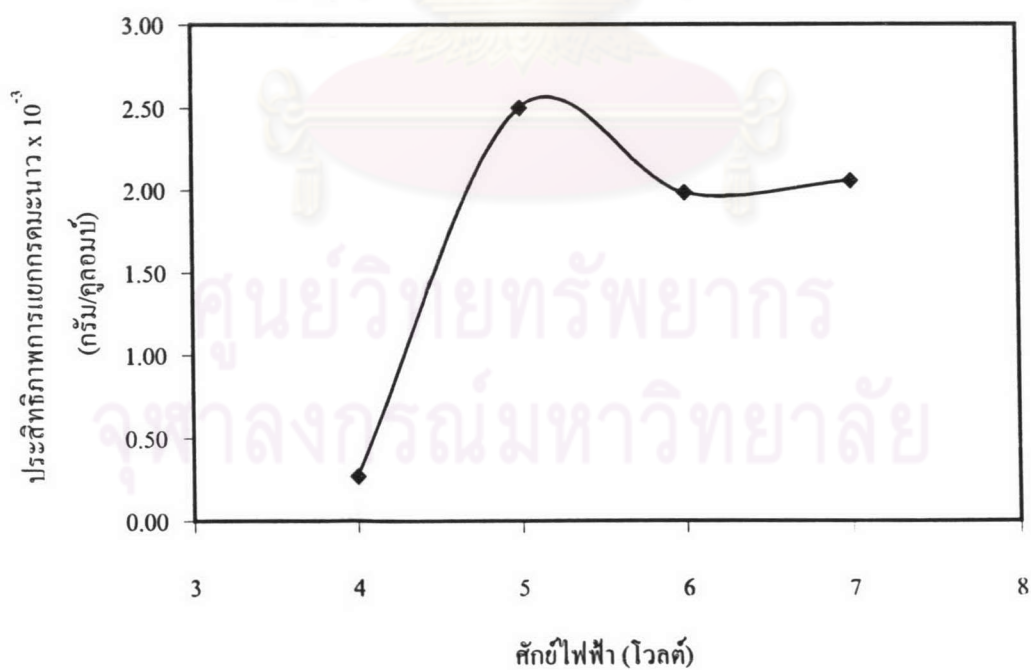
รูปที่ 3.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์



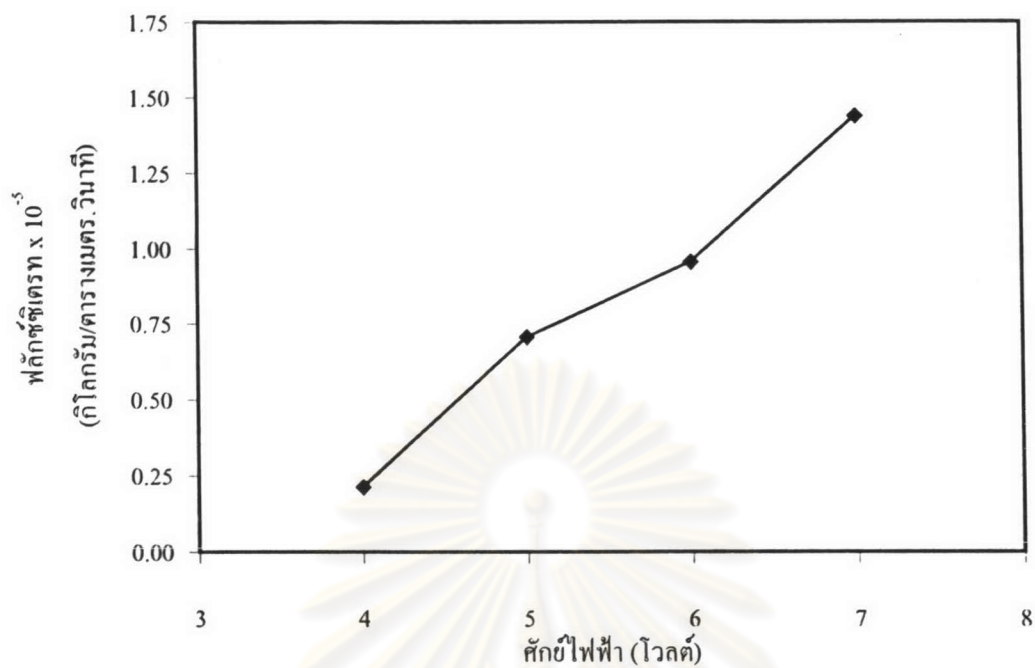
รูปที่ 3.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์



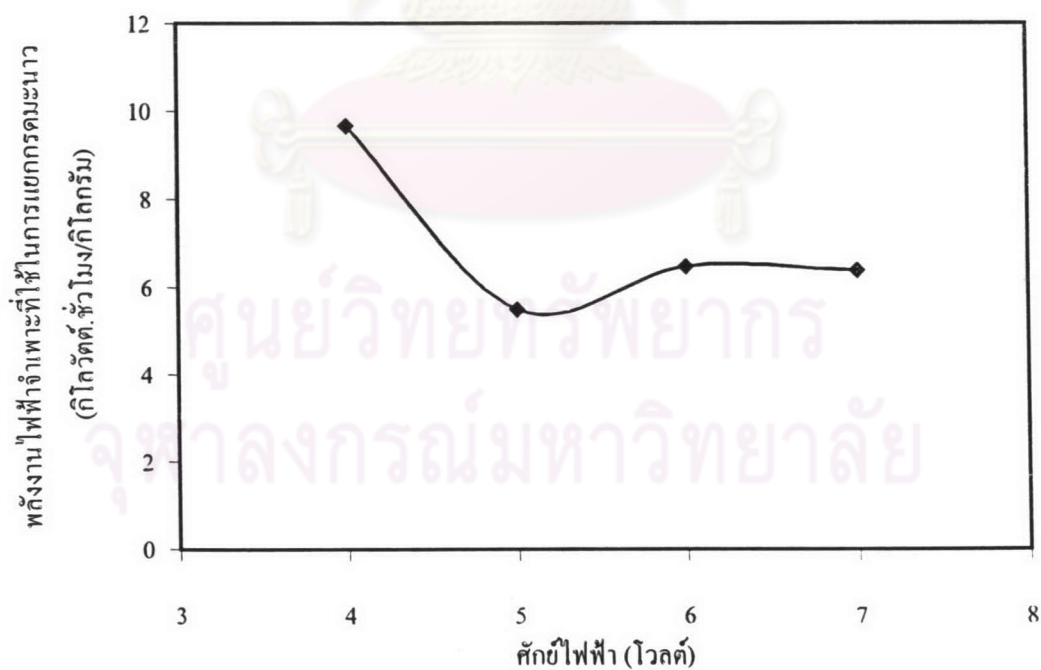
รูปที่ 3.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่ศักย์ไฟฟ้า 7 โวลต์



รูปที่ 3.51 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว



รูปที่ 3.52 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อค่าฟลักซ์ซีเตรท

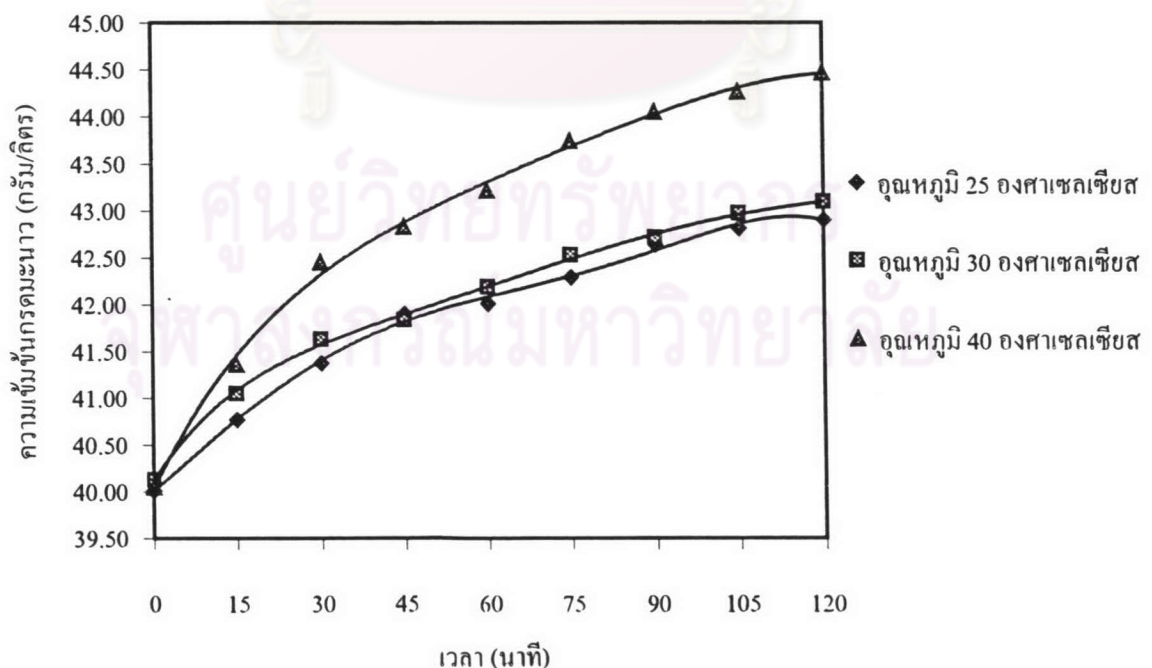


รูปที่ 3.53 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว

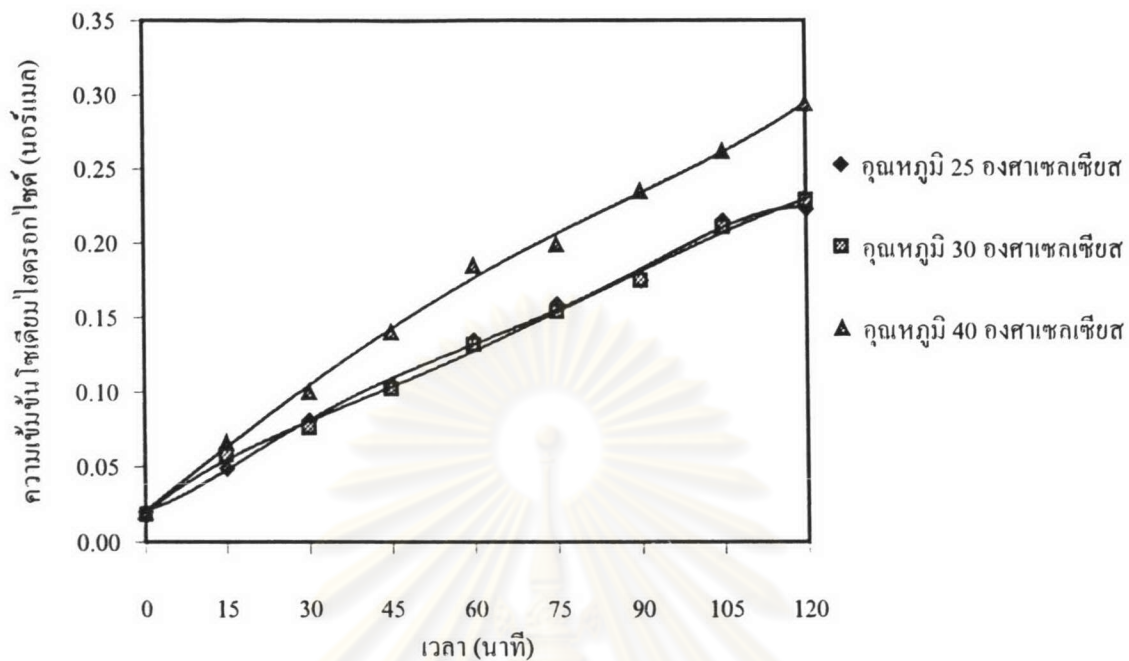
3.6 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลต์เพื่อการแยกกรรมะนาวจากน้ำหมัก

แปรอุณหภูมิของระบบที่ 25 30 และ 40 องศาเซลเซียส โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารป้อนด้านกรรมะนาว น้ำหมักโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 40 80 กรัมต่อลิตร และ 0.02 นอร์มัล ตามลำดับ ภาวะที่ใช้ คือ อัตราการไหลของสารป้อน 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 3.54-3.62 และข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ.24-26 และ จ.32

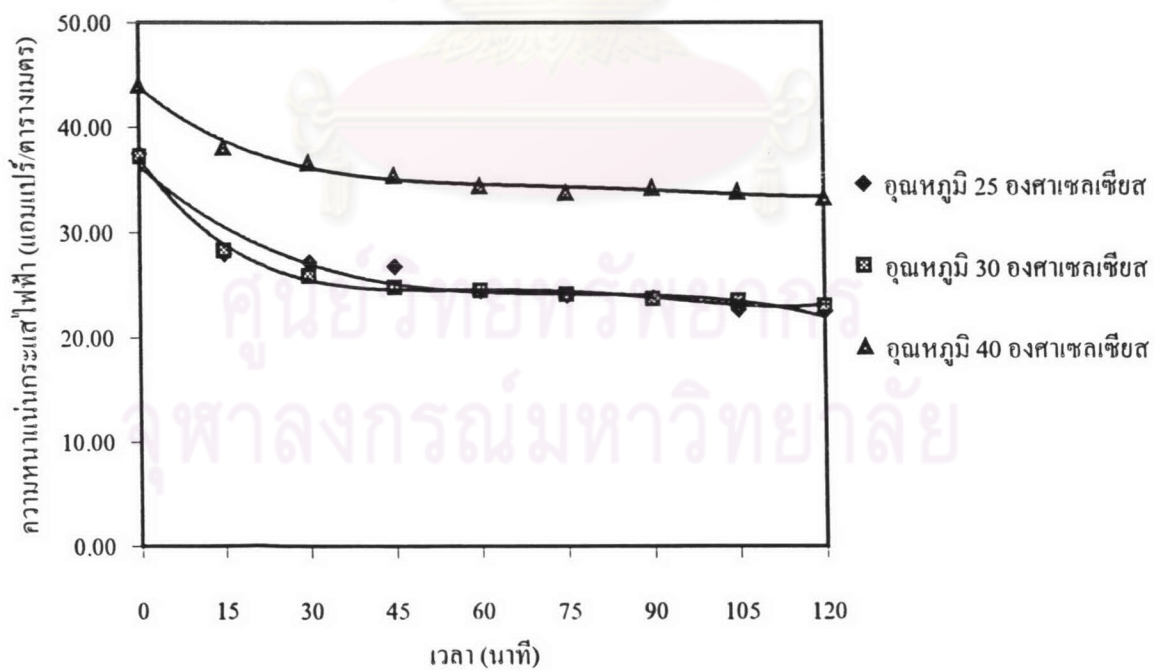
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นการนำไฟฟ้าจะสูงขึ้น ส่งผลให้สามารถแยกกรรมะนาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงมากขึ้น ซึ่งฟลักซ์เชิงปริมาตรและประสิทธิภาพการแยกกรรมะนาวก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสให้ ฟลักซ์เชิงปริมาตรสูงกว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 1.53 เท่า ส่วนพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรรมะนาวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับการทดลองนี้ไม่สามารถแปรอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส เพราะเยื่อแผ่นที่ใช้สามารถทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส โดยการทดลองนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองของ Novalic และคณะ (1995) และ Moresi และ Sappino (1998) โดยที่ Moresi และ Sappino ได้อ้างจาก Prentice (1991) ว่าเนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าความต้านทานในสารละลายลดลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของระบบที่เลือกใช้ต้องไม่เกินค่าที่เยื่อแผ่นสามารถทนได้ด้วย



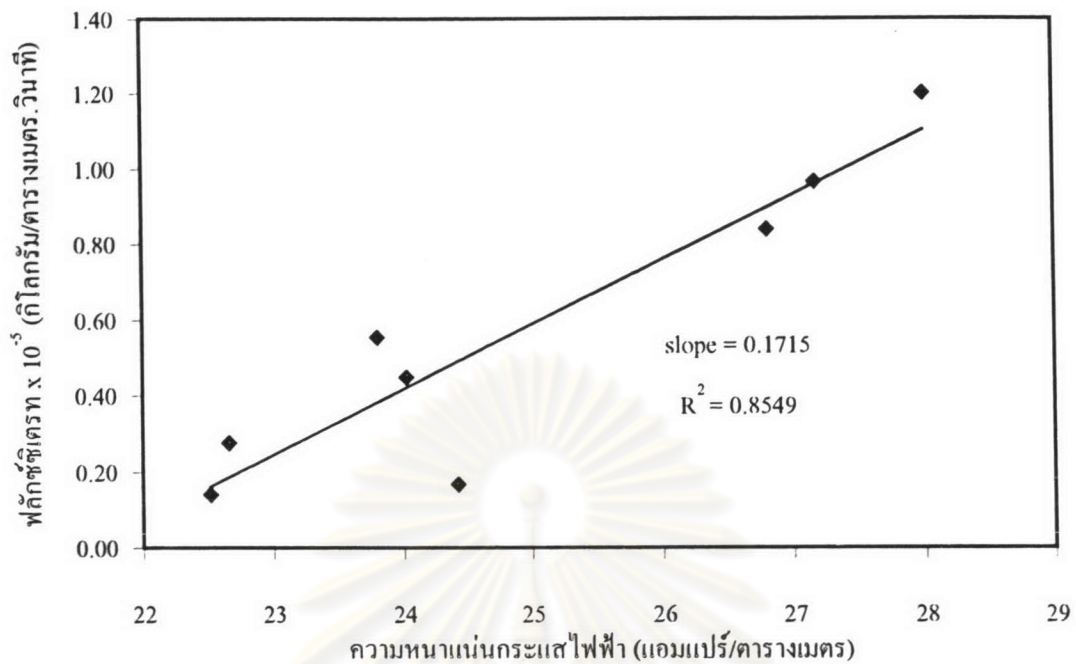
รูปที่ 3.54 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อการแยกกรรมะนาวด้วยอิเล็กโทรไลต์



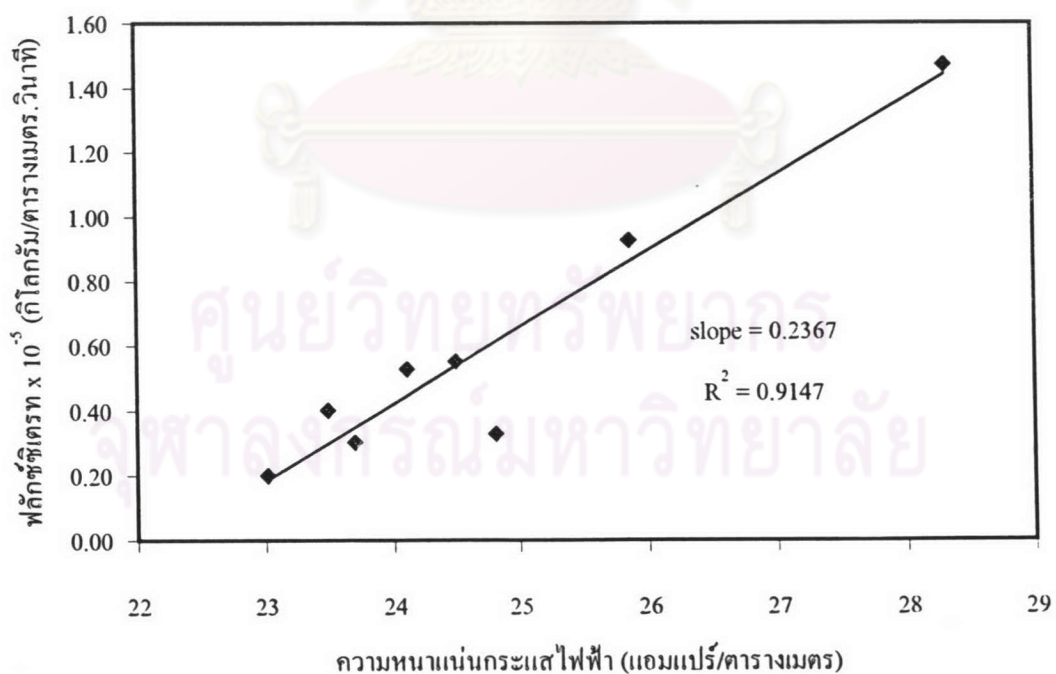
รูปที่ 3.55 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไลซิส



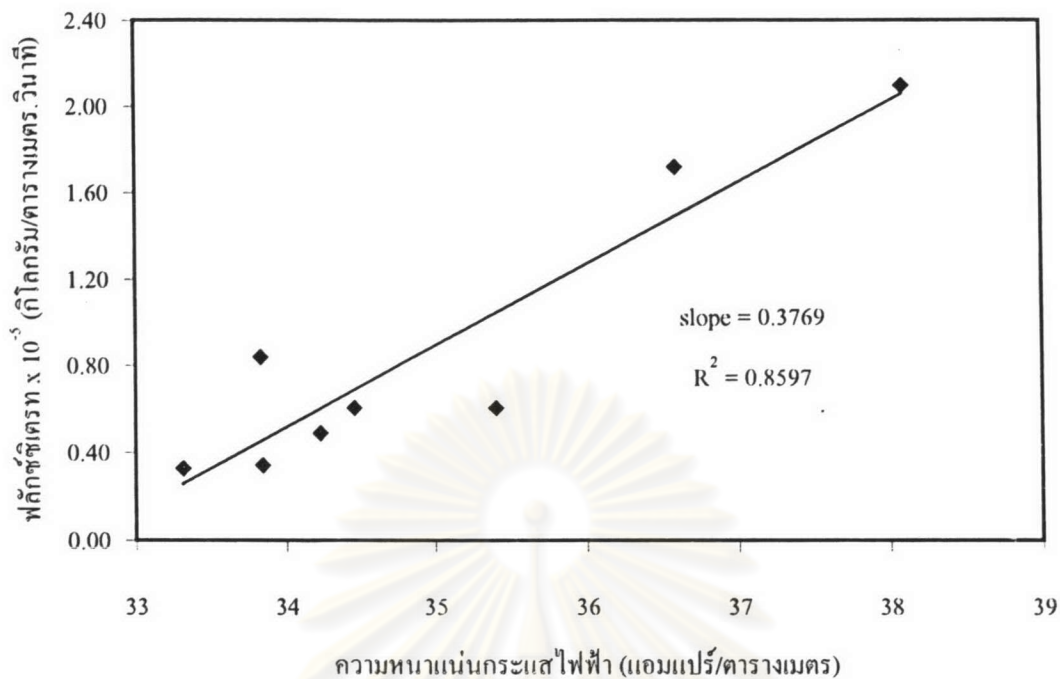
รูปที่ 3.56 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



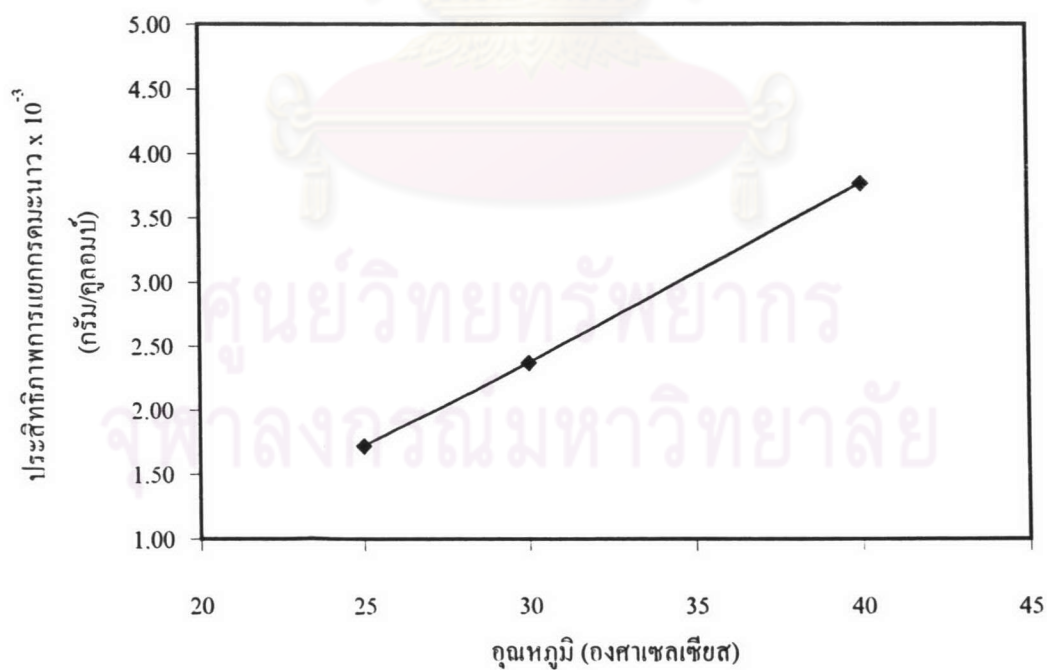
รูปที่ 3.57 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อุณหภูมิของระบบ 25 องศาเซลเซียส



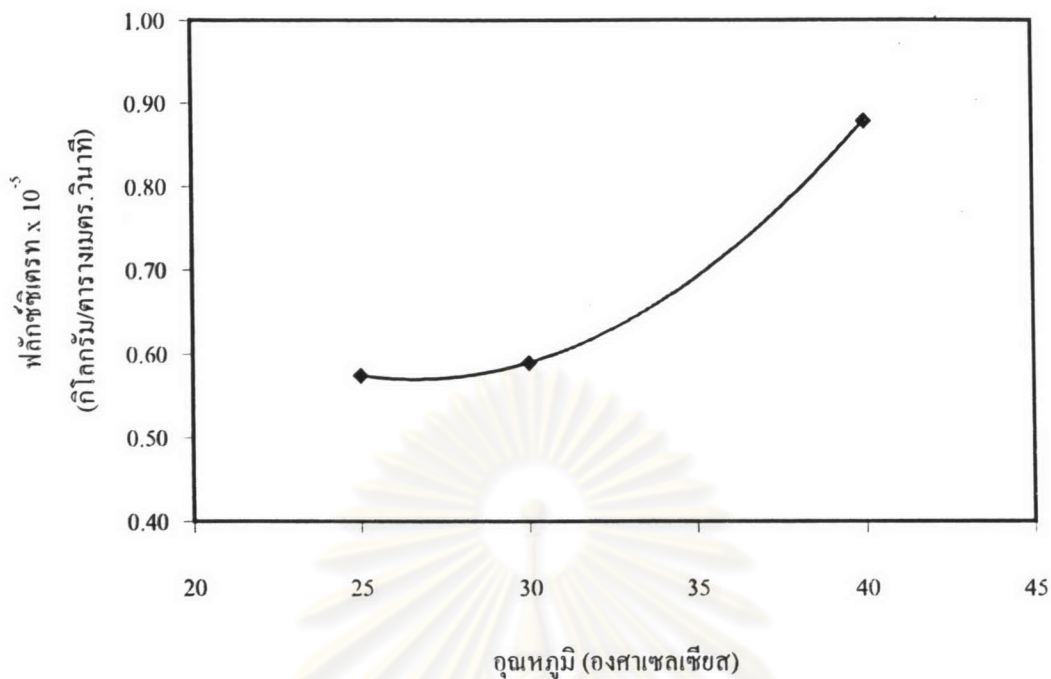
รูปที่ 3.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและฟลักซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อุณหภูมิของระบบ 30 องศาเซลเซียส



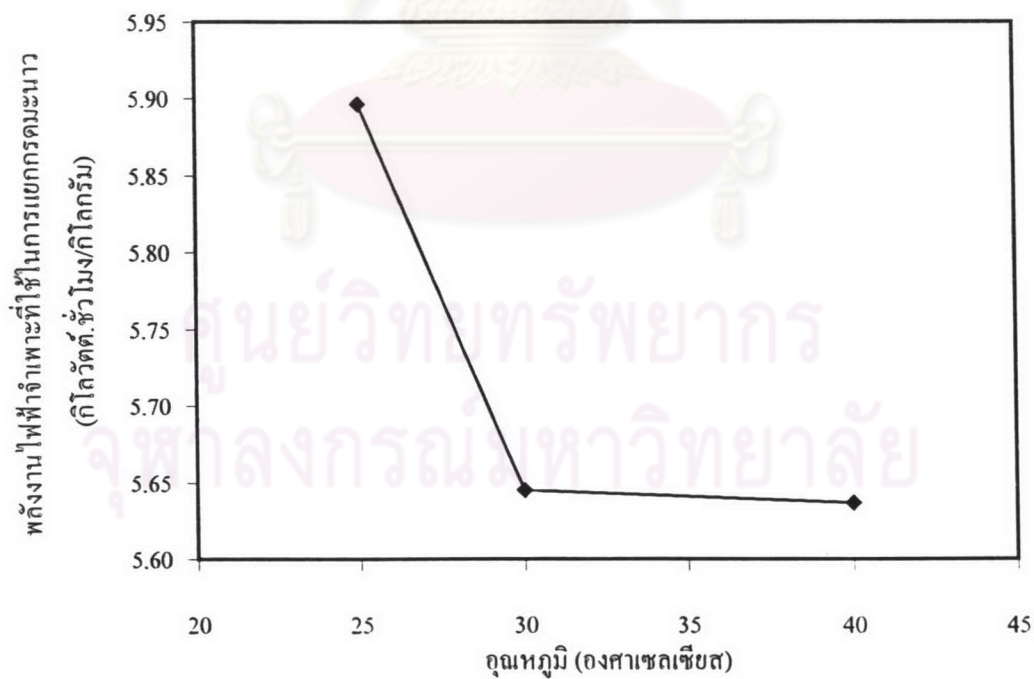
รูปที่ 3.59 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและพิกซ์ซีเตรทเพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว ที่อุณหภูมิของระบบ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.60 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อประสิทธิภาพการแยกกรดมะนาว



รูปที่ 3.61 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน



รูปที่ 3.62 ผลของอุณหภูมิของระบบต่อค่ากำลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ใช้ในการแยกกรดมะนาว

3.7 การแยกกรรมะนาวออกจากน้ำหมักด้วยอิเล็กโทรไลต์ควบคุมค่าความเป็นกรดดังหมักขนาด 5 ลิตร

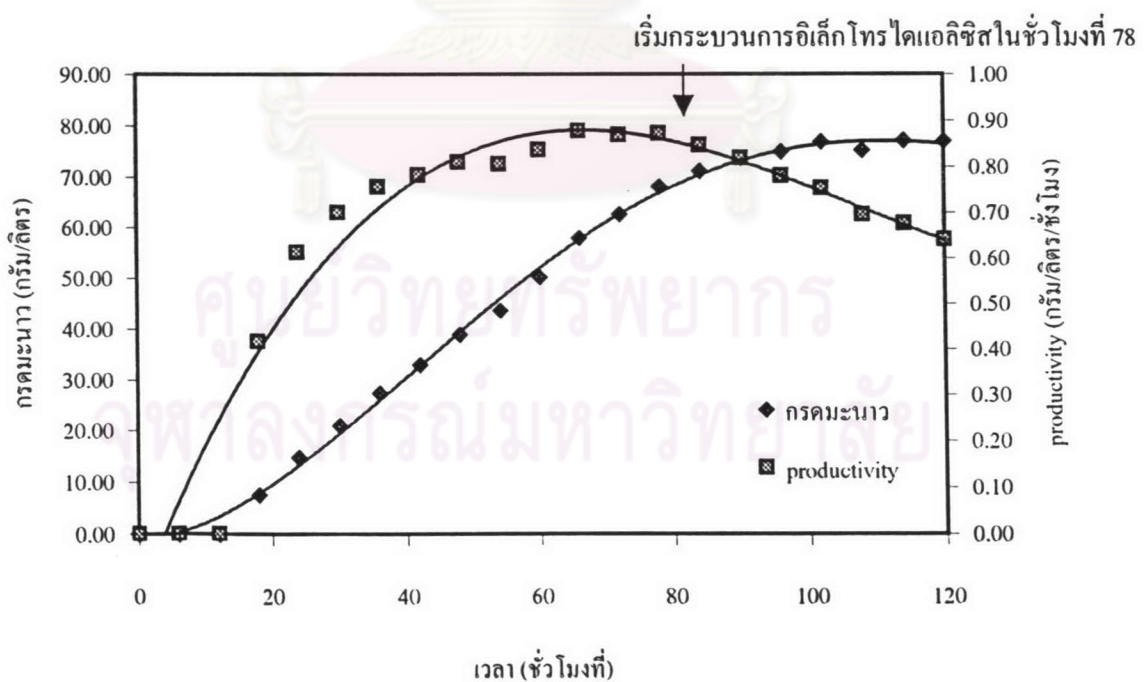
การทดลองนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์ควบคุมค่าความเป็นกรดดังหมักขนาด 5 ลิตรเพื่อเพิ่มผลผลิตโดยลดปัญหา osmolarity ที่สูงเนื่องจากการรักษาค่าความเป็นกรดดังในถังหมักด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงต้องมีการดึงโซเดียมซัลเฟตออกบางส่วนเพื่อควบคุมไม่ให้ภายในถังหมักมีโซเดียมไอออนที่จับกับซัลเฟตไอออนมากเกินไป โดยในขณะที่อัตราการผลิตยังอยู่ในระดับสูงจะมีการดึงน้ำหมักออกมาแยกด้วยอิเล็กโทรไลต์ น้ำหมักโซเดียมซัลเฟตที่ถูกแยกกรรมะนาวออกไปแล้วยังคงมีสารอาหารเหลืออยู่ในนั้นจึงนำมาเวียนกลับเข้าไปในถังหมัก ในส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แยกได้นั้นสามารถนำไปควบคุมค่าความเป็นกรดดังของการหมักได้ ข้อมูลการทดลองตามตารางในภาคผนวก จ.33-34

จากผลการทดลองในส่วนของถังหมัก รูปแบบการผลิตกรรมะนาวและอัตราการผลิตกรรมะนาวดังรูปที่ 3.63 เมื่อเข้าชั่วโมงที่ 78 ความเข้มข้นของน้ำหมักโซเดียมซัลเฟตมีค่าประมาณ 70 กรัมต่อลิตรจึงเริ่มมีการดึงน้ำหมักออกจากถังหมัก นำมาแยกเซลล์โดยการปั่นเหวี่ยงแล้วนำเซลล์ที่ตกตะกอนกลับเข้าไปในถังหมักเพื่อควบคุมไม่ให้ปริมาณเซลล์ในถังหมักลดลง จากนั้นจึงนำน้ำหมักที่ได้ออกไปผ่านไมโครฟิลเตรชันเพื่อกำจัดอนุภาคขนาดเล็กหรือสารแขวนลอยต่างๆ แล้วนำไปเข้ากระบวนการอิเล็กโทรไลต์ โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นในช่องสารละลายกรรมะนาว 40 กรัมต่อลิตร น้ำหมักโซเดียมซัลเฟต 70 กรัมต่อลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.02 นอร์มัล โดยภาวะของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้นี้ได้จากการหาภาวะที่เหมาะสมในผลการทดลองหัวข้อ 3.1-3.6 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราการไหลของสารป้อน 240 มิลลิตรต่อชั่วโมงหรือคิดเป็นอัตราไหลในหน่วยปริมาตรสัมพัทธ์เทียบกับปริมาตรจุนโมดูลเท่ากับ 15.86 ต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ และอุณหภูมิของระบบ 40 องศาเซลเซียส หลังจากเริ่มกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ไปได้ 2 ชั่วโมง จึงมีการสลับปั๊มควบคุมค่าความเป็นกรดดังอัตโนมัติ จากที่ต่อกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ไปต่อกับอิเล็กโทรไลต์ในช่องของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการแยกด้วยอิเล็กโทรไลต์ แต่เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แยกได้มีความเข้มข้นน้อย อีกทั้ง ณ เวลานั้นเป็นช่วงที่มีอัตราการผลิตกรรมะนาวสูงจำเป็นต้องมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มาก จึงไม่สามารถควบคุมค่าความเป็นกรดดังด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการแยกด้วยอิเล็กโทรไลต์เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจำเป็นต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ได้จากการเตรียมพร้อมด้วย

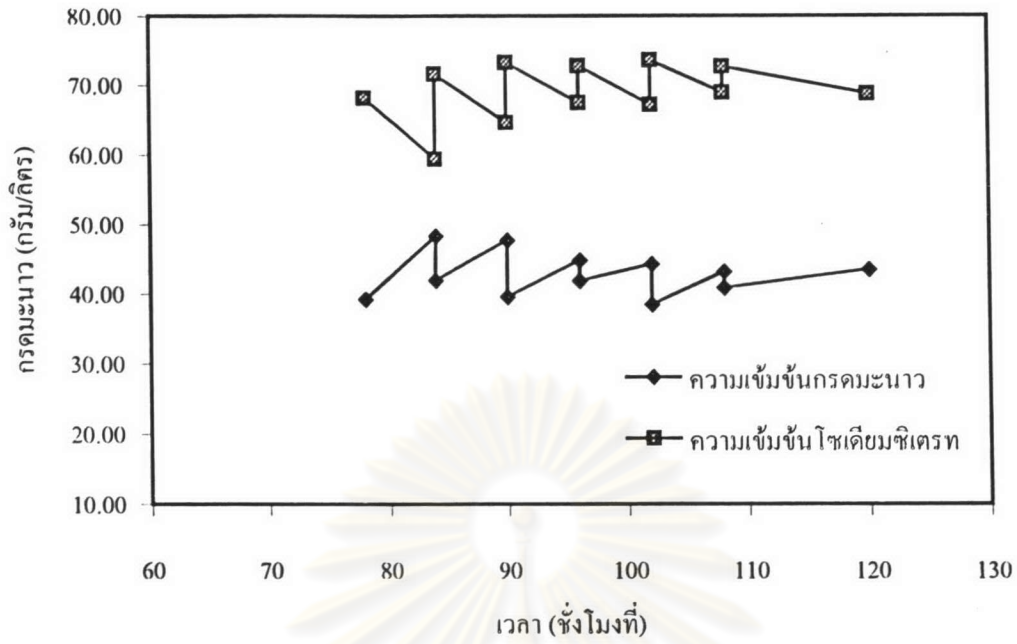
สำหรับกรรมะนาวที่แยกได้และน้ำหมักโซเดียมซัลเฟตทั้งในถังหมักและในโมดูลจะทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นทุก 6 ชั่วโมง ซึ่งในส่วนของอิเล็กโทรไลต์จะพยายามควบคุมให้ความเข้มข้นกรรมะนาวและโซเดียมซัลเฟตอยู่ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยในช่องโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นจะลดลงจึงมีการดึงออกบางส่วนแล้วนำกลับเข้าถังหมักแล้วจึงเติมน้ำหมักที่แยกเซลล์และสารแขวนลอยออก

เข้าไปในช่องโซเดียมซัลเฟตให้ถึงความเข้มข้นประมาณ 70 กรัมต่อลิตรและปริมาตรเท่าเดิม ส่วนในช่องของกรรมจะมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นจึงมีการดึงผลิตภัณฑ์บางส่วนออกไปและเติมน้ำลงไปเพื่อควบคุมความเข้มข้นที่ 40 กรัมต่อลิตรและปริมาตรเท่า ดังรูปที่ 3.64 เมื่อทำการทดลองไปเป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าฟลักซ์ซีเตรทมีค่าต่ำลง (รูปที่ 3.65) อีกทั้งอัตราการผลิตกรรมจะลดลง ทั้งนี้มีการควบแน่นน้ำตาลกลูโคสให้เพียงพอแล้ว จึงหยุดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการดึงผลิตภัณฑ์ออกจากถังหมักน้อยไปจึงไม่สามารถลดปัญหา osmolarity ที่สูงได้ สาเหตุที่ไม่สามารถดึงผลิตภัณฑ์ออกมาได้นั้นเพราะโมดูลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีขนาดพื้นที่ใช้งานเล็กมากจึงไม่สามารถแยกกรรมจะออกมาให้อัตราการแยกสัมพันธ์กับอัตราการผลิตกรรมในถังหมักได้ ทั้งนี้ถ้าต้องการนำเอากระบวนการอิเล็กโทรไลต์มาใช้ควบคู่กับถังหมักขนาด 5 ลิตรจะต้องมีการเพิ่มขนาดของโมดูลและเพิ่มพื้นที่การใช้งานของเยื่อแผ่นให้สัมพันธ์กับถังหมัก นั่นหมายถึงอัตราการแยกและอัตราการผลิตควรจะสอดคล้องกัน ดังนี้

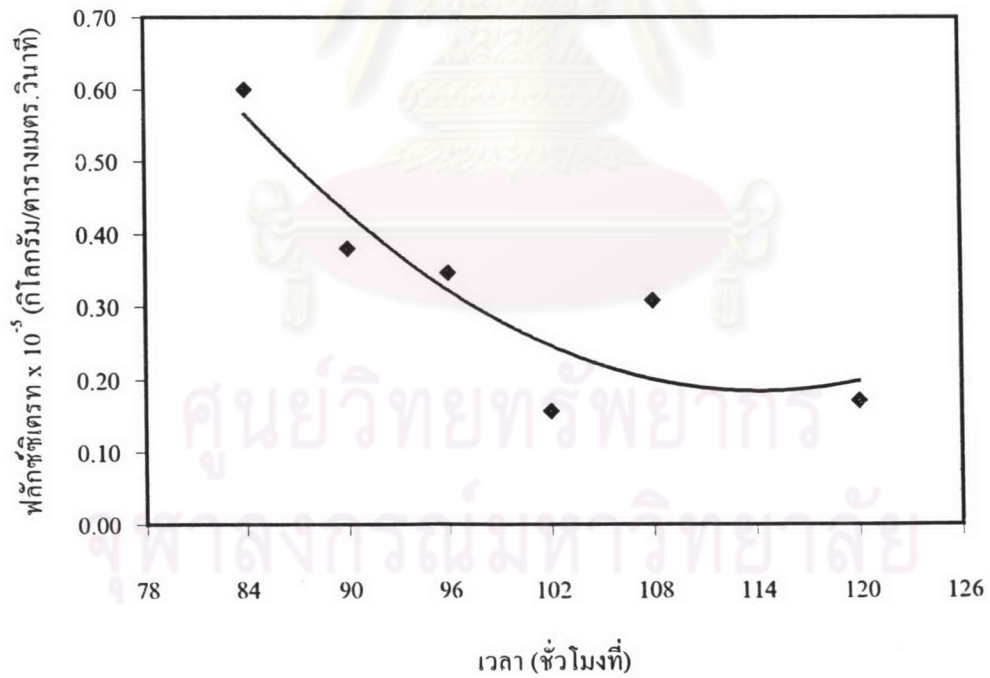
ในส่วนของการหมัก อัตราการผลิตสูงสุดเท่ากับ 0.88 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง แสดงว่า ในถังหมักที่มีปริมาตรน้ำหมัก 3 ลิตร จะผลิตกรรมได้ 2.64 กรัมต่อชั่วโมง ในส่วนของอิเล็กโทรไลต์ ฟลักซ์เฉลี่ยสำหรับการดำเนินระบบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เท่ากับ 0.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตร.วินาที หรือ 11.88 กรัมต่อตารางเมตร.ชั่วโมง แสดงว่า การแยกกรรม 11.88 กรัมต่อชั่วโมง ต้องใช้เยื่อแผ่นขนาด 1 ตารางเมตร ฉะนั้นถ้าต้องการแยกให้ได้ 2.64 กรัมต่อชั่วโมงต้องใช้เยื่อแผ่นขนาด 0.22 ตารางเมตรหรือประมาณ 0.7 เมตร x 0.3 เมตร



รูปที่ 3.63 รูปแบบการผลิตกรรมและอัตราการผลิตกรรมในถังหมักขนาด 5 ลิตรเมื่อใช้ควบคู่กับอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 3.64 ความเข้มข้นของกรดมะนาวและโซเดียมซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 3.65 ฟลักซ์ซัลเฟตที่เวลาต่างๆของการใช้อิเล็กโทรไลต์ควบคุมการหมัก