บทที่ 4

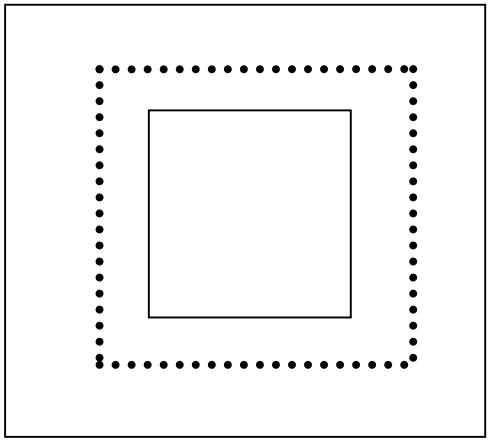
ผลและการอภิปรายผล

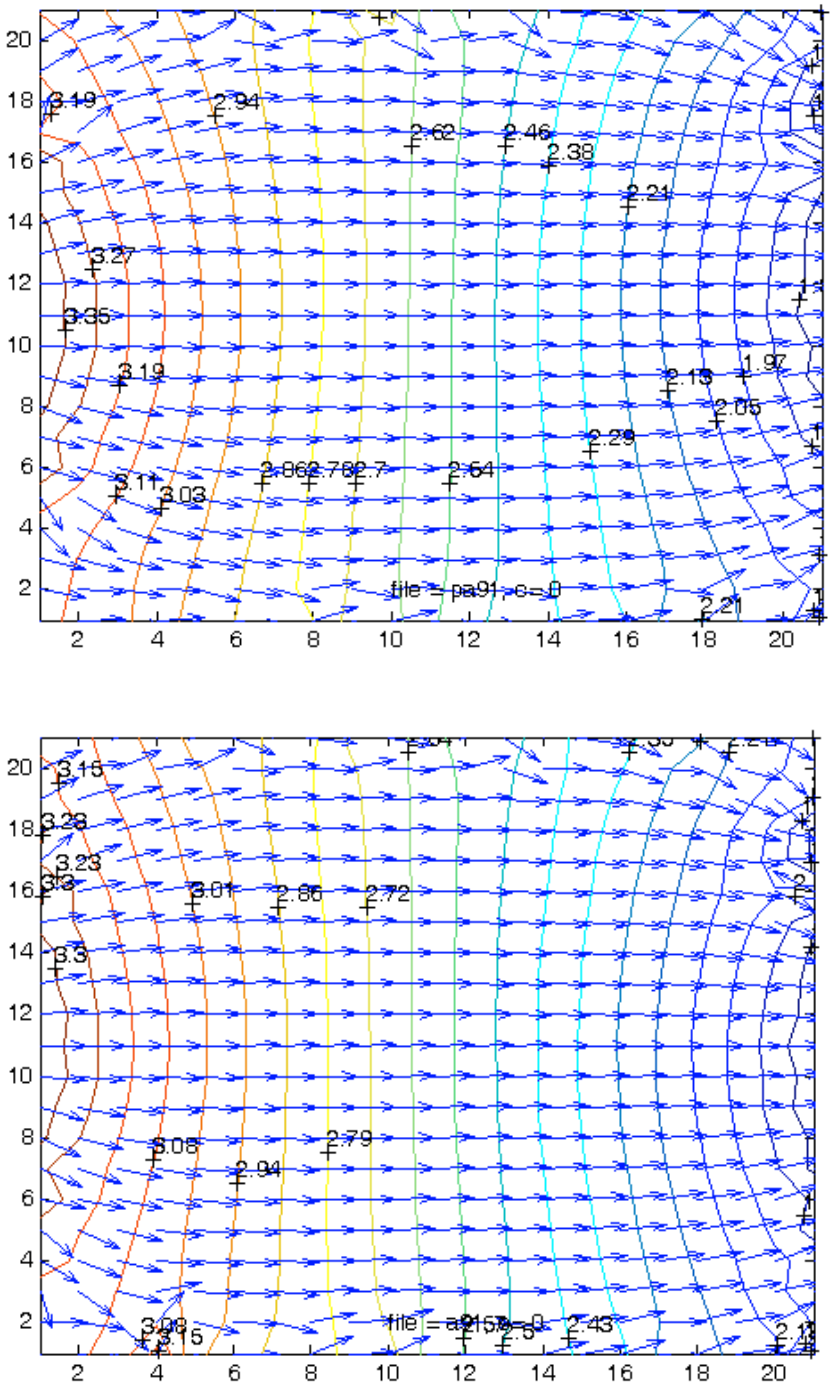
บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้รับจากการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในถาดน้ำของชุดทดลองสนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติที่ต่อเชื่อมโยงเข้ากับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ใช้หลักการคำนวณด้วยสมการลาปลาซ โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขต นำผลการคำนวณข้อมูลที่ได้มาพล็อตหาเส้นสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์กราฟของเส้นแรงไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง โดยอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของไอออนในสนาม ไฟฟ้า สำหรับผลการทดลองที่ได้ เปรียบเทียบกราฟของเส้นแรงไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ช่วงเวลาต่างๆ ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยใช้ความเข้มข้นต่างๆ กันและประมวลผลข้อมูลโดยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ โดยกราฟเส้นแรงไฟฟ้าที่พล็อต ได้แสดงถึงขอบเขตของหัววัดทั้ง 80 หัว แต่ละหัววางห่างกัน 0.5 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

1. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า บวกและลบ โดยใช้ความเข้มข้นต่างๆ กัน และช่วงเวลาต่างๆกัน
2. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ โดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M.
3. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก โดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M.
4. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ โดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M.
5. การทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ความ เข้มข้น 1.0 M. ในช่วงเวลา 3000 วินาที

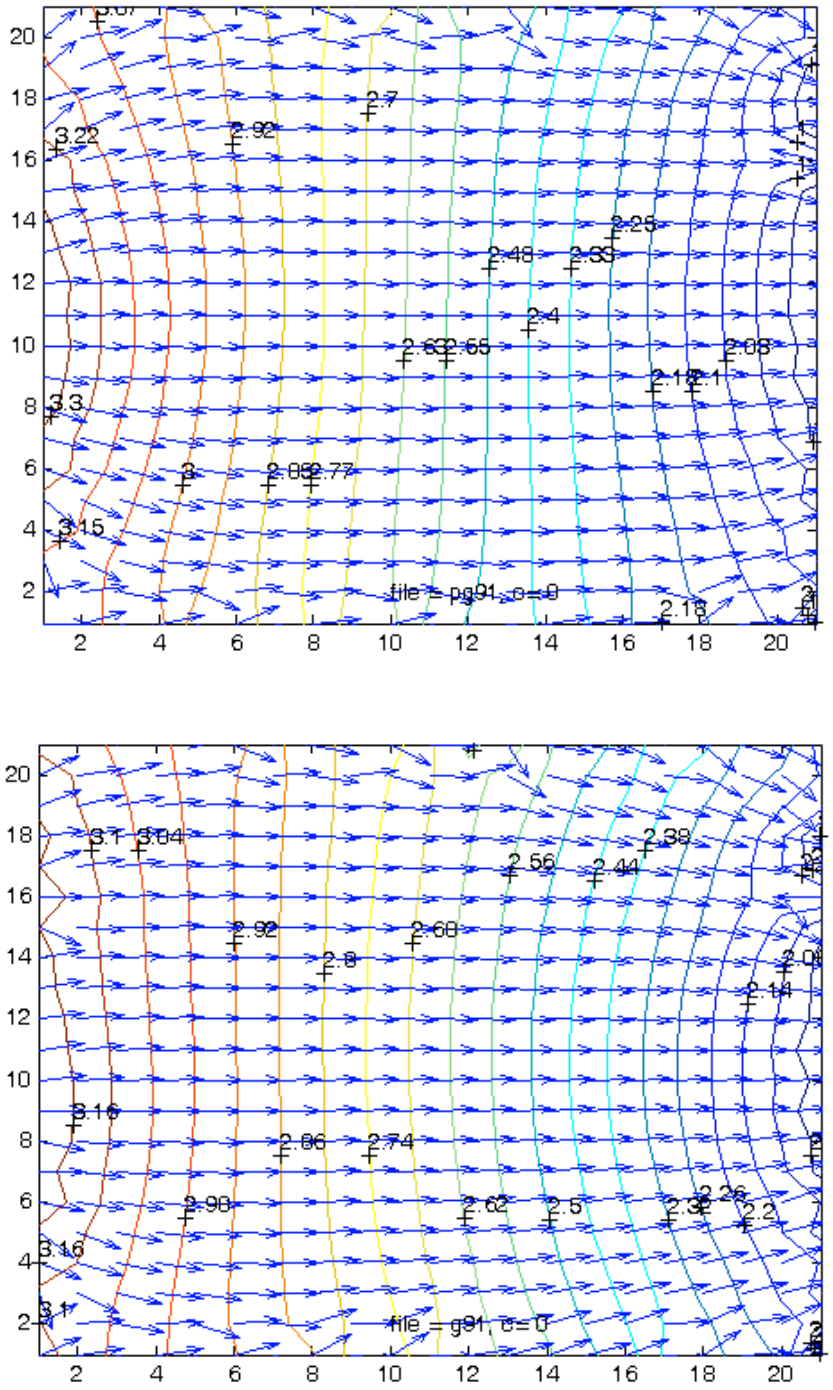
1. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ โดยใช้ความเข้มข้นต่างๆ กัน และช่วงเวลาต่างๆ กัน

ผลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก จ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ โดยใช้ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.05 M., 0.2 M. และ 1.0 M. จะเห็นความแตกต่างของกราฟก่อนหยดสารละลายและหลังหยดสารละลายน้อยมาก ผู้ทำงานวิจัยได้นำผลการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นต่างๆ ในส่วนของการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เวลา 30 วินาที มาแสดงเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของกราฟเส้นแรงไฟฟ้า โดยกราฟเส้นแรงไฟฟ้าที่แสดงดังต่อไปนี้ ทั้งแกน x (แนวนอน) และแกน y (แนวตั้ง) แสดงถึงตำแหน่งของหัววัด จำนวน 80 หัว ซึ่งแต่ละหัววางห่างกัน 0.5 เซนติเมตร ดังนี้ คือ

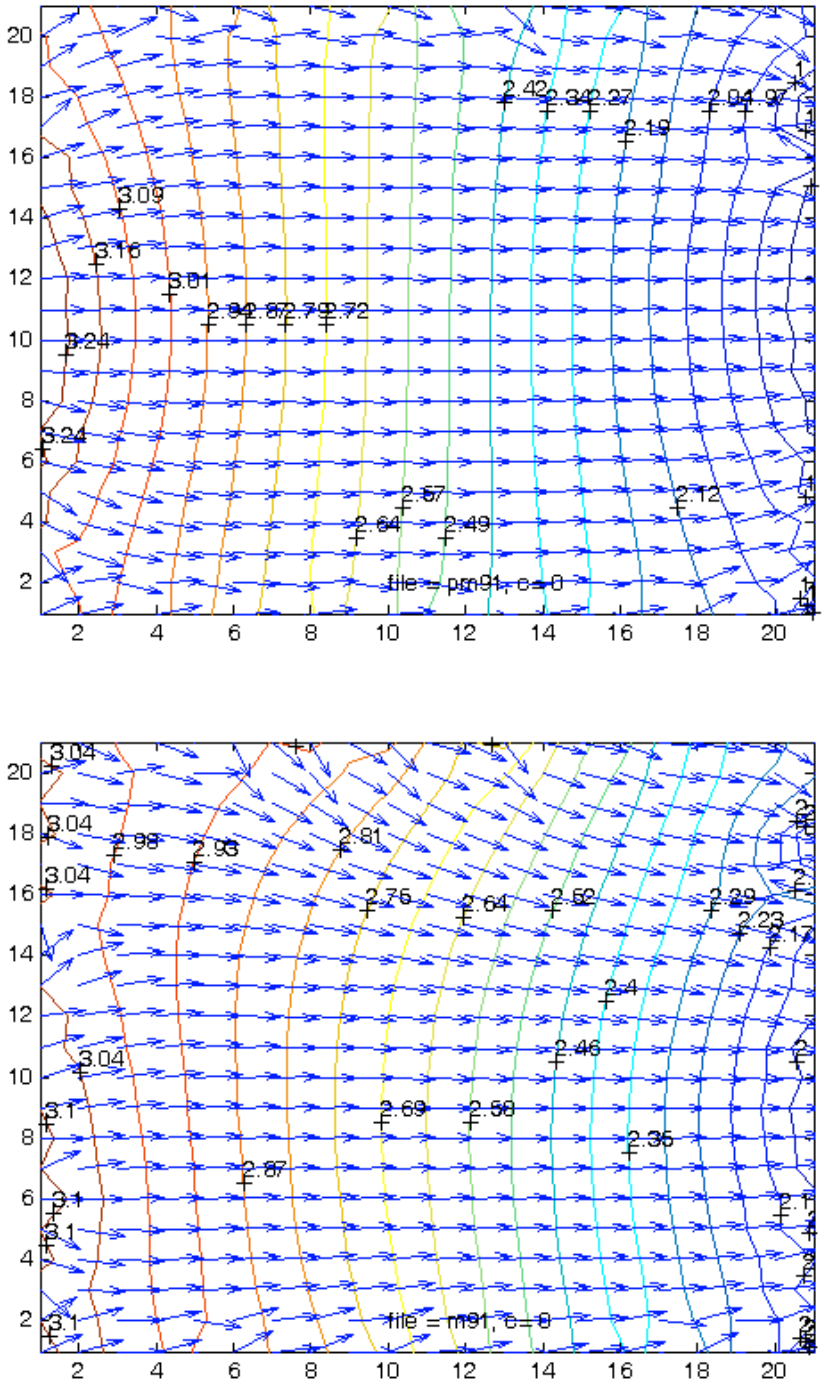




ภาพที่ 24 แสดงความแตกต่างของเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนและหลัง การหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 M. ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 30 วินาที



ภาพที่ 25 แสดงความแตกต่างของเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนและหลัง
การหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.2 M.
ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 30 วินาที



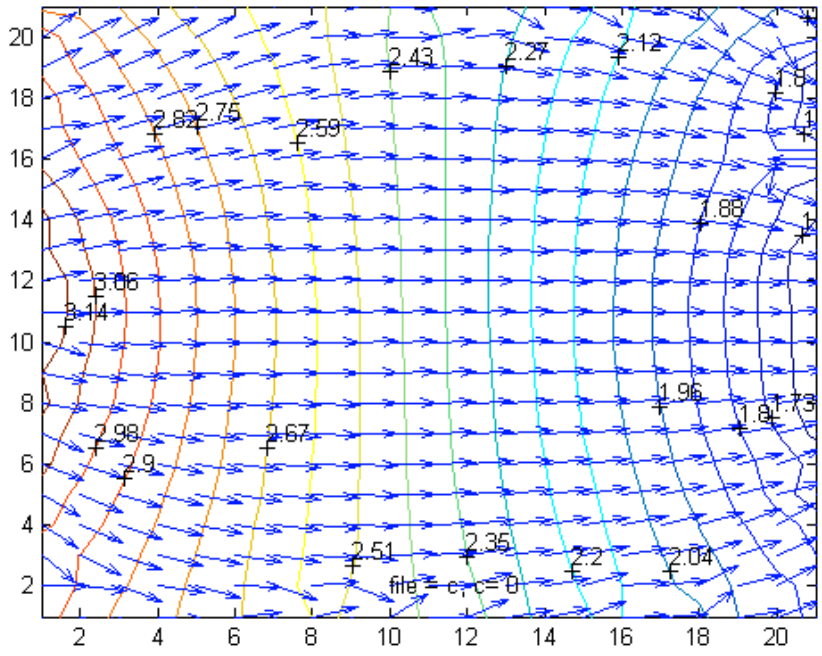
ภาพที่ 26 แสดงความแตกต่างของเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนและหลัง
การหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1.0 M.
ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 30 วินาที

2. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ

โดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M.

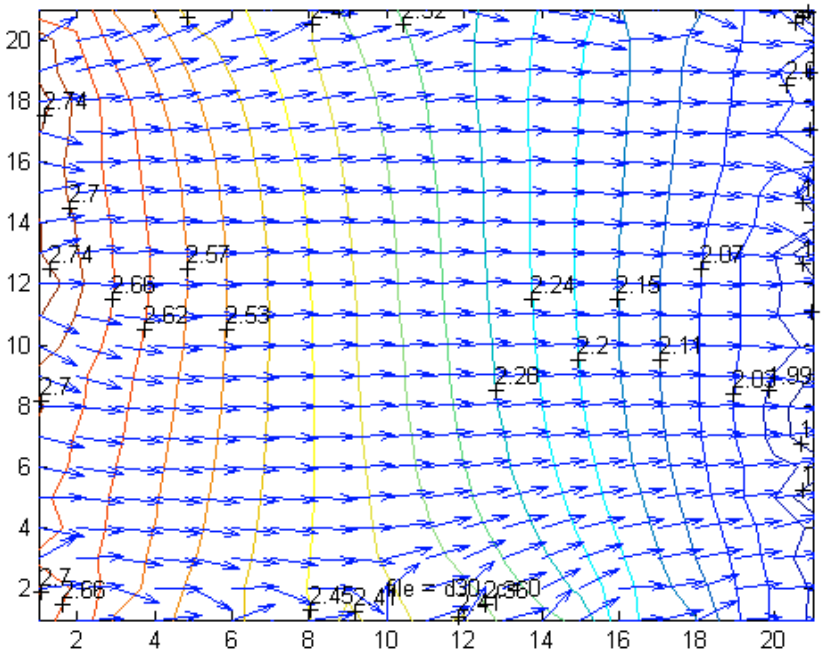
จากผลการทดลอง เมื่อใช้ความเข้มข้น 0.05 M. , 0.2 M. ที่เวลา 30-300 วินาที จะเห็นความแตกต่างของกราฟก่อนและหลังหยดสารละลายน้อยมาก ผู้ทำวิจัย จึงทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M. และใช้เวลาทดลองตั้งแต่ 0-3000 วินาที ดังแสดงใน ภาคผนวก ฉ

เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ สารละลายโซเดียมคลอไรด์จะเพิ่มความนำไฟฟ้าในถาดน้ำ โดยจะลดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้าบวกมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้าลบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 27 - 29



ภาพที่ 27 แสดงกราฟของเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ

ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าบวก = 3.14 โวลต์
ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าลบ = 1.66 โวลต์
ความแตกต่างค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง = 1.48 โวลต์

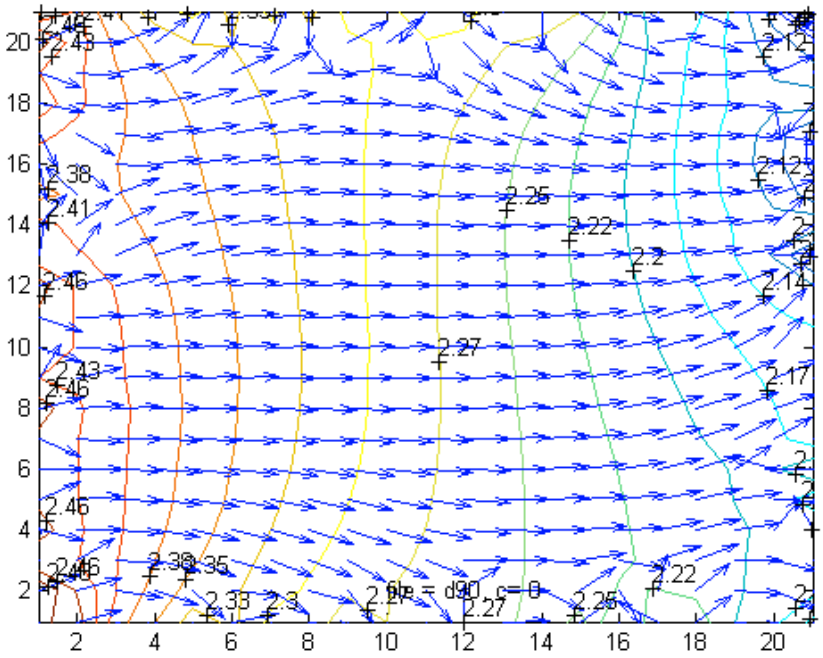


ภาพที่ 28 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 30 วินาที

ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าบวก = 2.74 โวลต์

ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าลบ = 1.95 โวลต์

ความแตกต่างค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง = 0.79 โวลต์



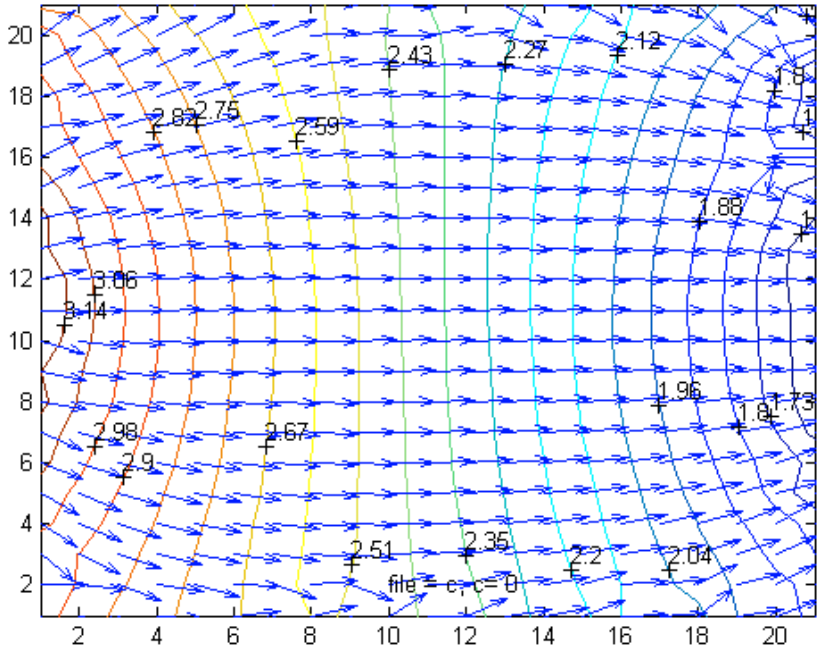
ภาพที่ 29 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 90 วินาที

ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าบวก = 2.46 โวลต์

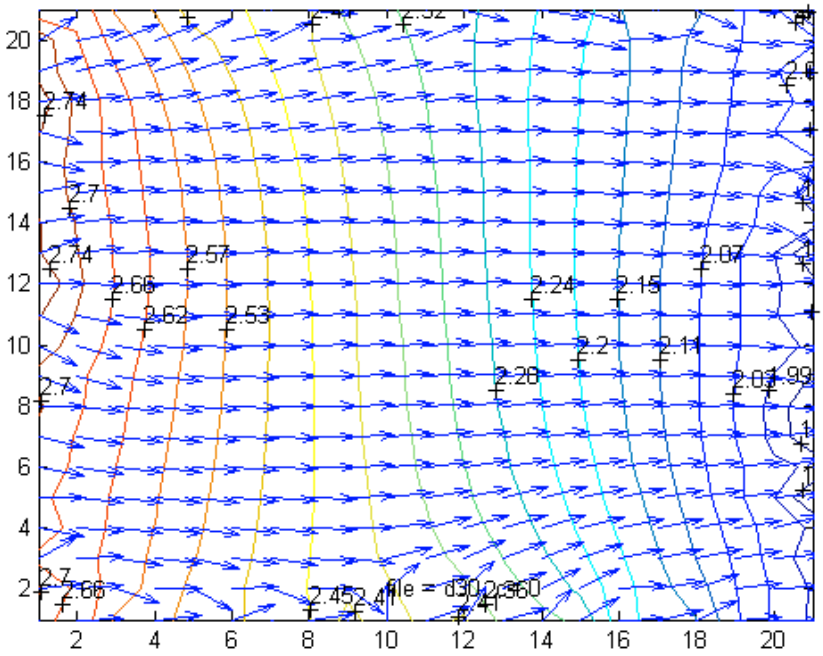
ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าลบ = 2.12 โวลต์

ความแตกต่างค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง = 0.34 โวลต์

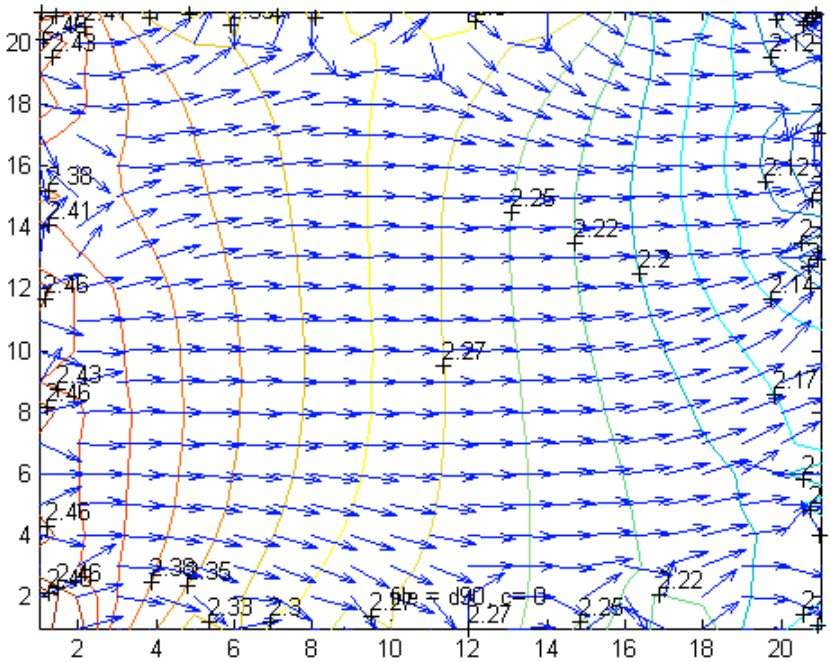
ในส่วนของกราฟของเส้นแรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงและเข้าสู่สภาพเดิมอย่างรวดเร็ว ใช้เวลาประมาณ 240 วินาที โดยโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าตรงกันข้าม โดยจำนวนไอออนที่เคลื่อนที่ไปบริเวณขั้วไฟฟ้านั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพความแรงของขั้วไฟฟ้า โดยไอออนที่ไม่ได้ถูกขั้วไฟฟ้าดึงดูดไปจะกระจายเรียงกันทั่วถาดน้ำในสภาพสมดุล ดังภาพที่ 30 - 35



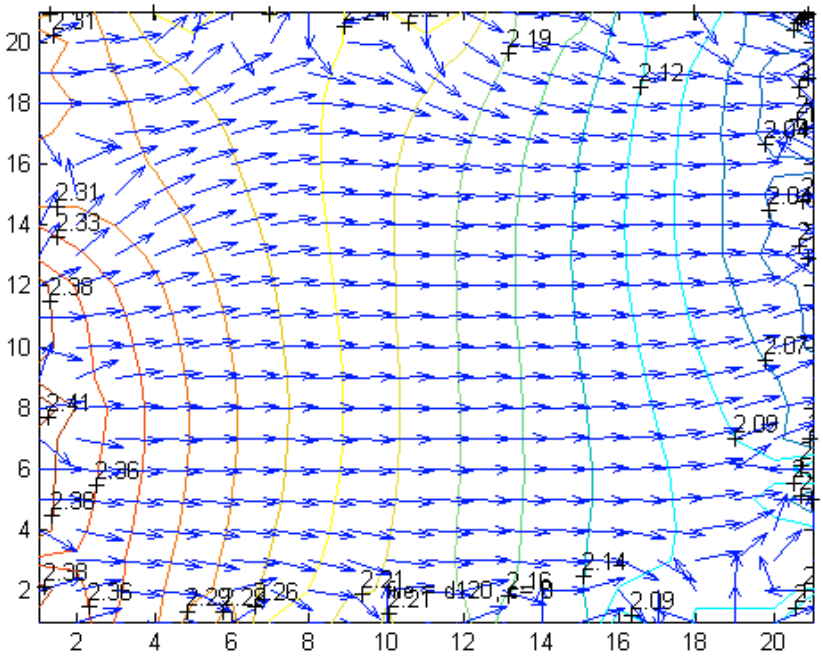
ภาพที่ 30 แสดงกราฟของเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ



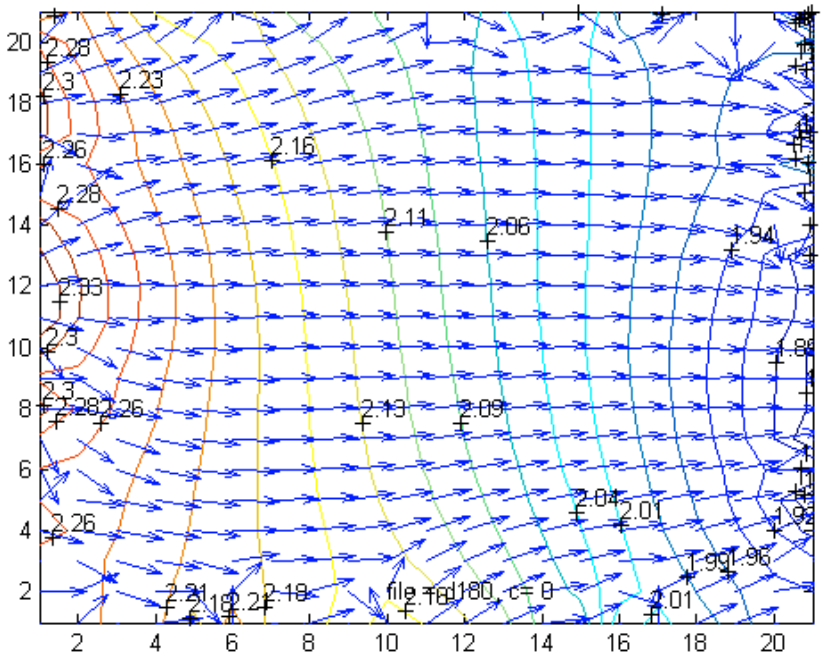
ภาพที่ 31 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 30 วินาที



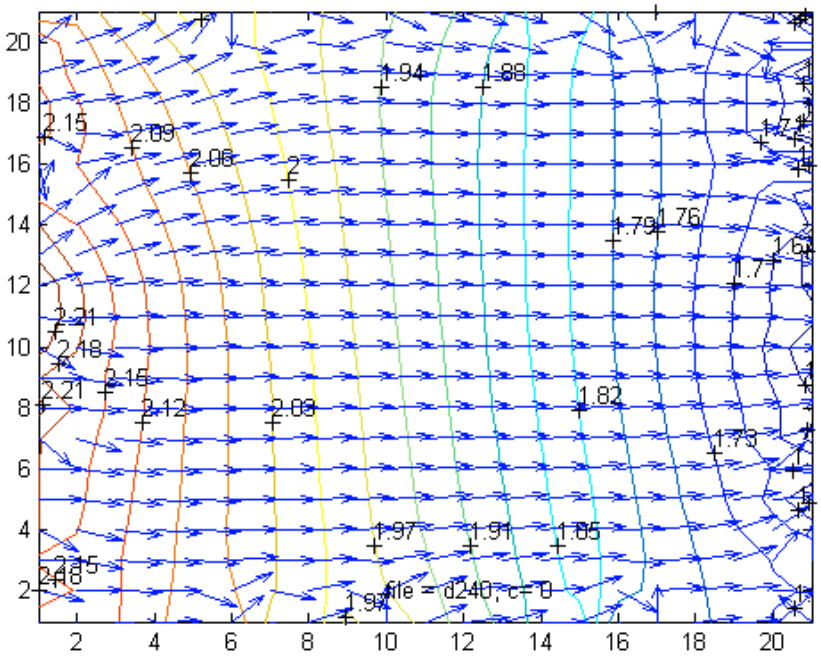
ภาพที่ 32 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 90 วินาที



ภาพที่ 33 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 120 วินาที



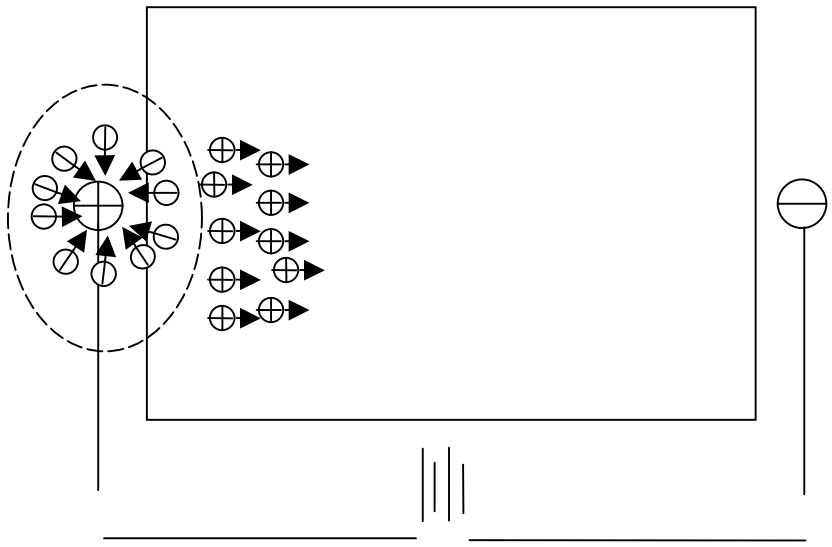
ภาพที่ 34 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 180 วินาที



ภาพที่ 35 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ในการเก็บข้อมูล 240 วินาที

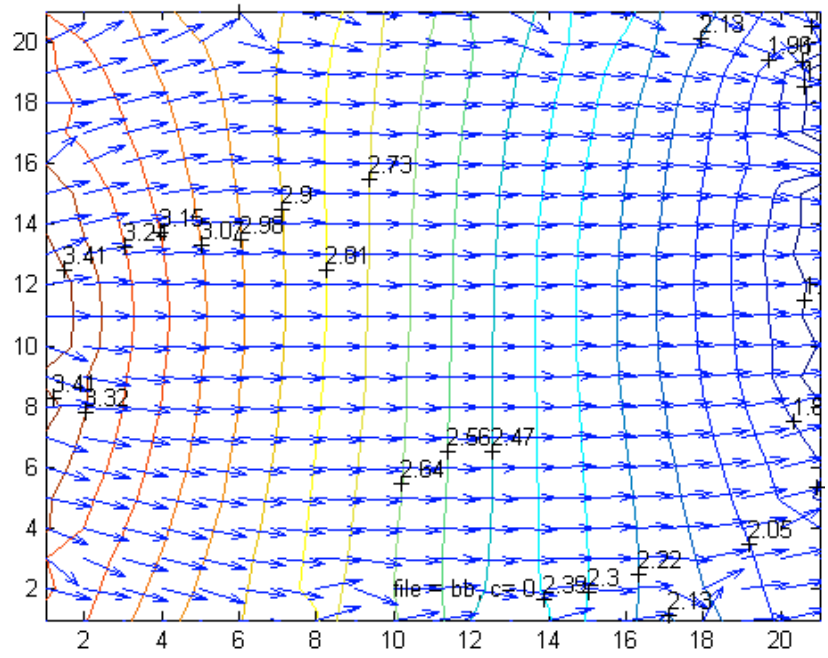
3. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก โดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M.

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้รับทั้ง 80 ค่า มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นทุกๆค่า จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขจากสมการลาปลาซ เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในขอบเขตที่ต้องการดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ เนื่องมาจาก เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ไอออนลบจะไปรวมตัวบริเวณขั้วไฟฟ้าบวก โดยจำนวนของไอออนที่ไปรวมตัวบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบวกนี้ ขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้านั้นๆ ไอออนลบจะเกาะอยู่รอบๆขั้วไฟฟ้าบวก ทำให้บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าบวก มีจำนวนไอออนบวกเหลืออยู่ ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้าบวกนี้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าลบ ดังภาพที่ 32 ซึ่งไอออนบวกเหล่านี้ จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าลบต่อไป

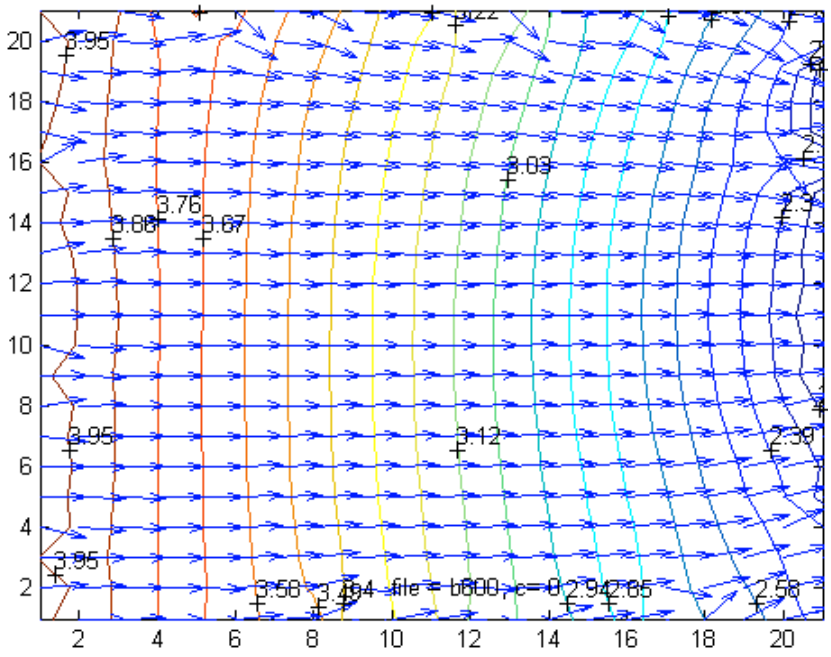


ภาพที่ 36 แสดงไอออนบวกที่เหลืออยู่บริเวณขั้วไฟฟ้าบวก

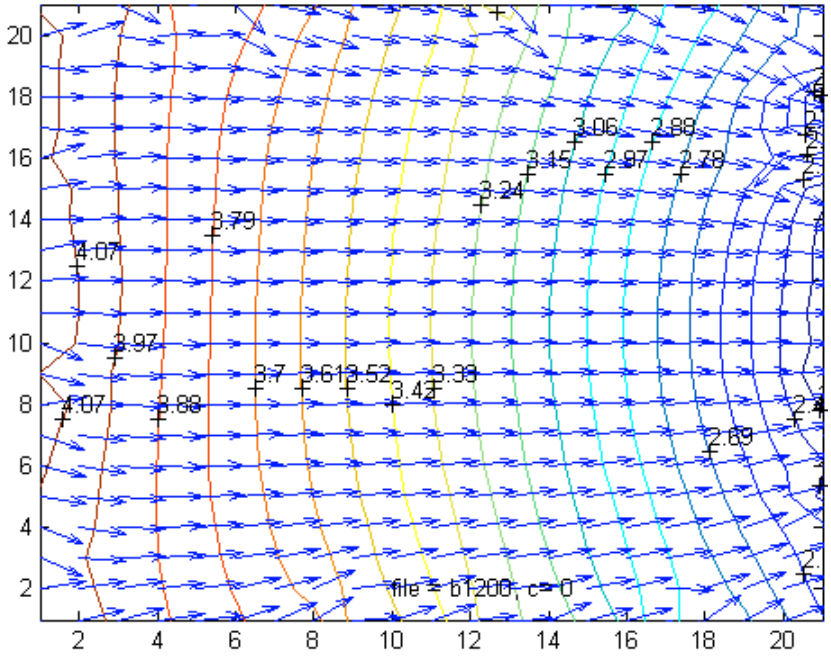
ในส่วนของเส้นแรงไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งที่หยดสารละลาย เส้นสมศักย์ มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงอย่างช้าๆ ซึ่งโดยปกติแล้ว เส้นสมศักย์จะเปลี่ยนแปลงตามขั้วของไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า บริเวณดังกล่าว มีการรวมตัวของไอออนอย่างหนาแน่น เสมือนว่า บริเวณดังกล่าว มีขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะเส้นตรง เส้นสมศักย์จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามลักษณะของขั้วไฟฟ้า และเส้นแรงไฟฟ้า เริ่มเข้าสู่สภาพเดิม ใช้เวลาประมาณ 4800 วินาที ซึ่งถือได้ว่ามี การเปลี่ยนแปลงช้ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับการหยดสารละลายตำแหน่งตรงกลาง ดังภาพที่ 37 - 45



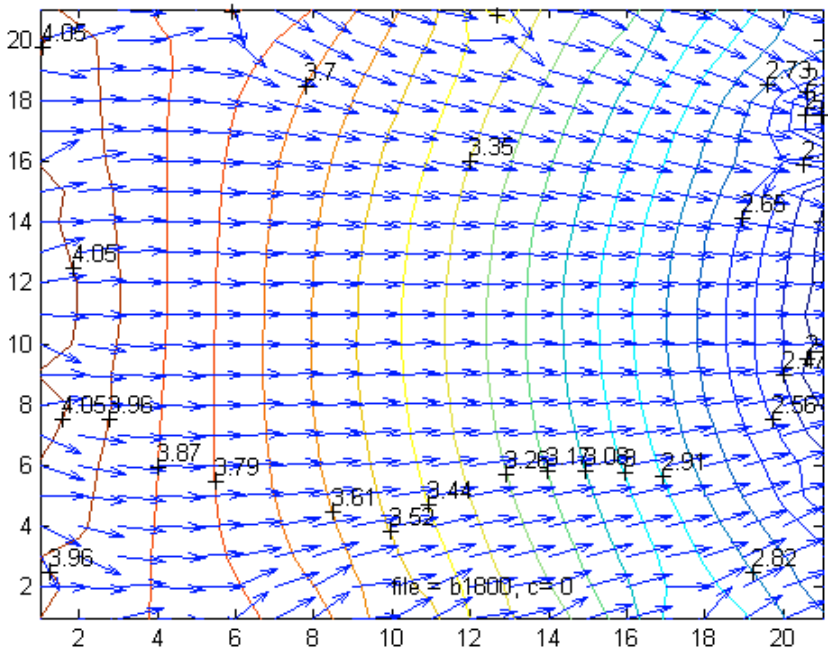
ภาพที่ 37 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก



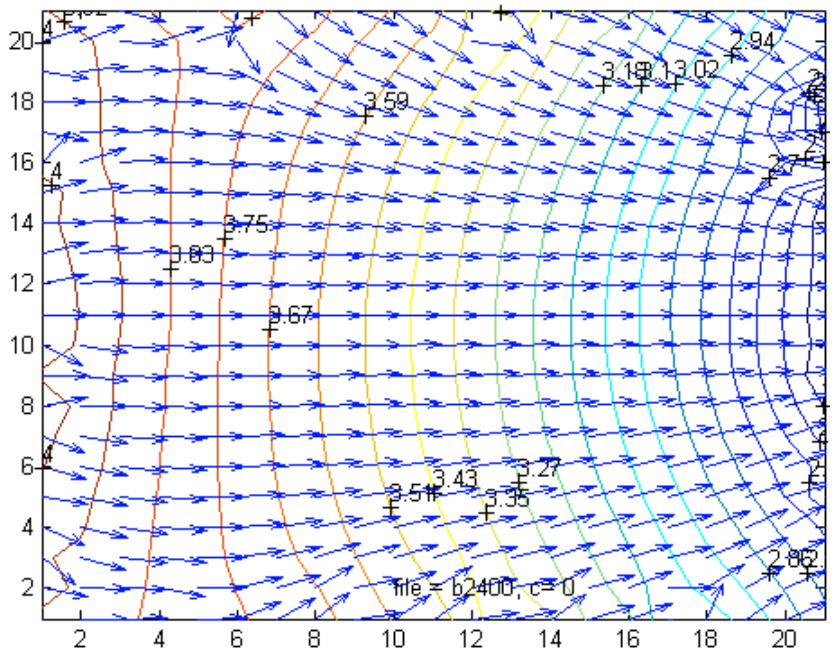
ภาพที่ 38 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 600 วินาที



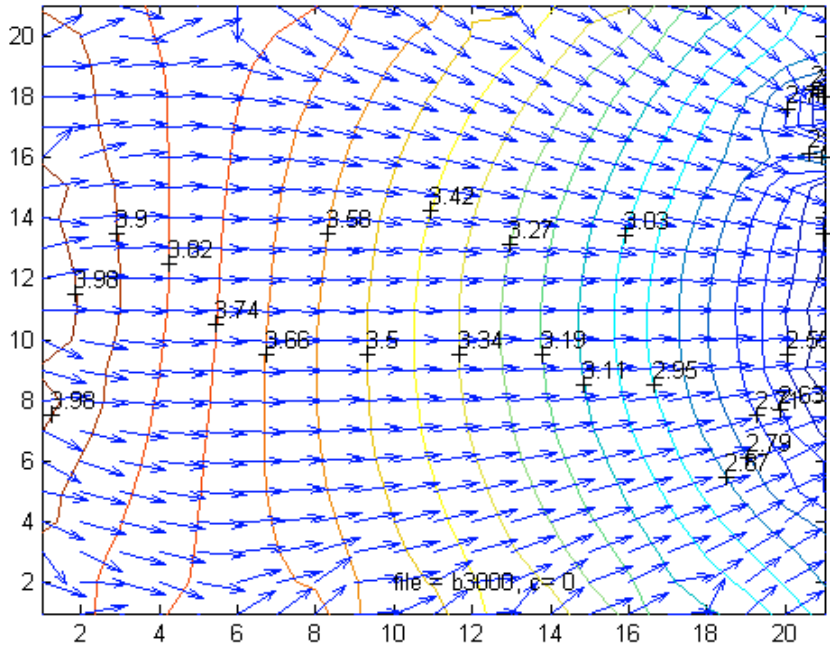
ภาพที่ 39 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 1200 วินาที



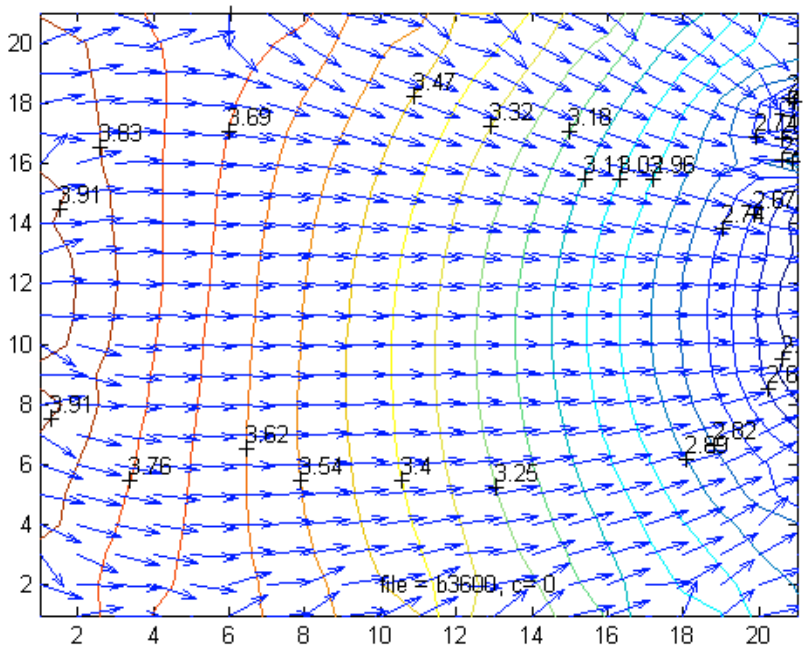
ภาพที่ 40 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 1800 วินาที



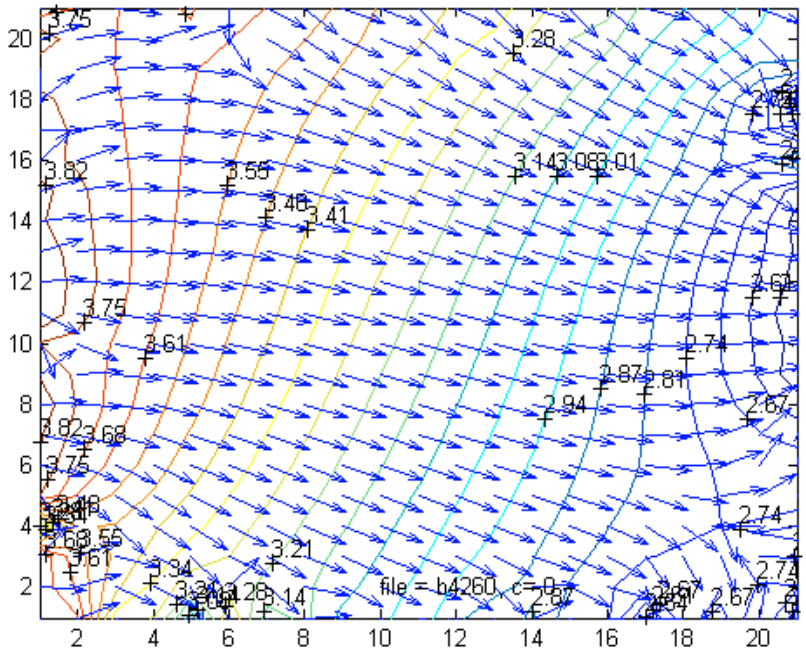
ภาพที่ 41 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 2400 วินาที



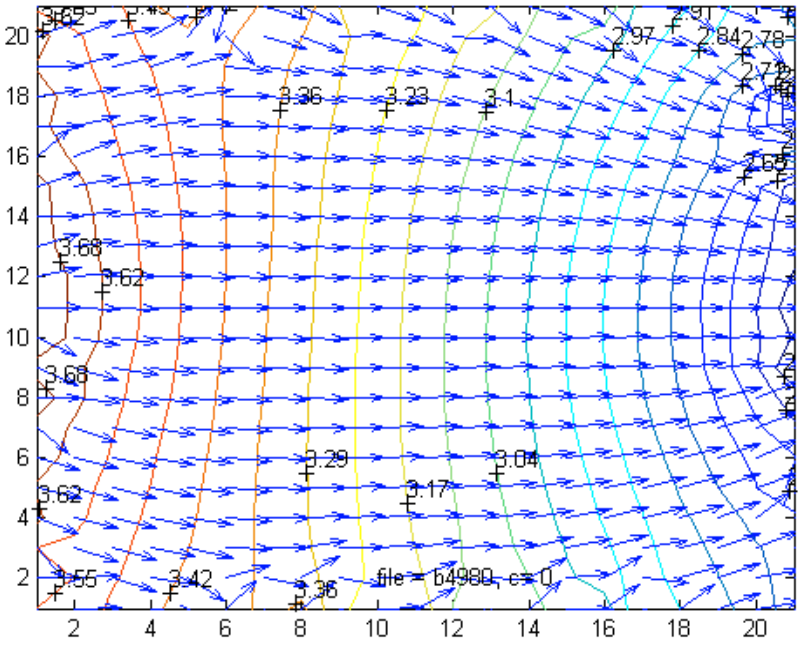
ภาพที่ 42 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 3000 วินาที



ภาพที่ 43 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 3600 วินาที



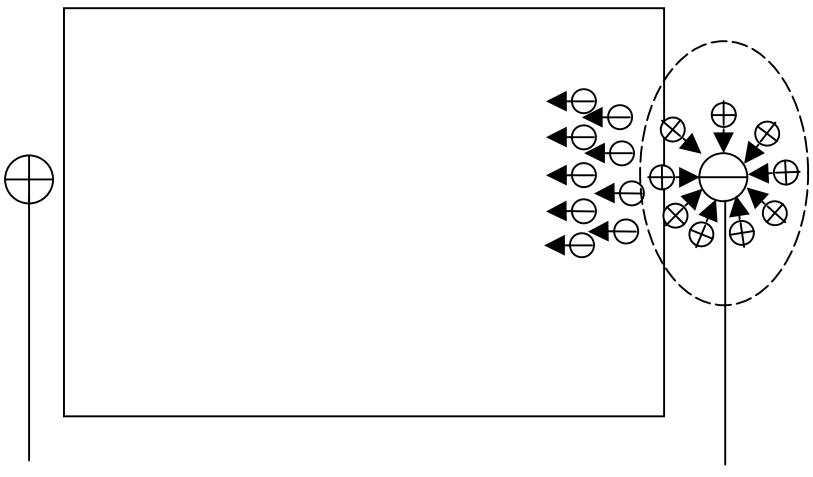
ภาพที่ 44 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 4200 วินาที

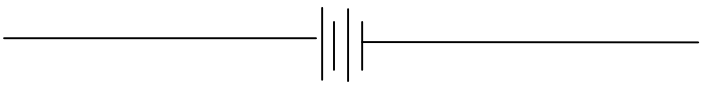


ภาพที่ 45 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก ในการเก็บข้อมูล 4800 วินาที

4. การทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ โดยใช้ความเข้มข้น 1.0 M.

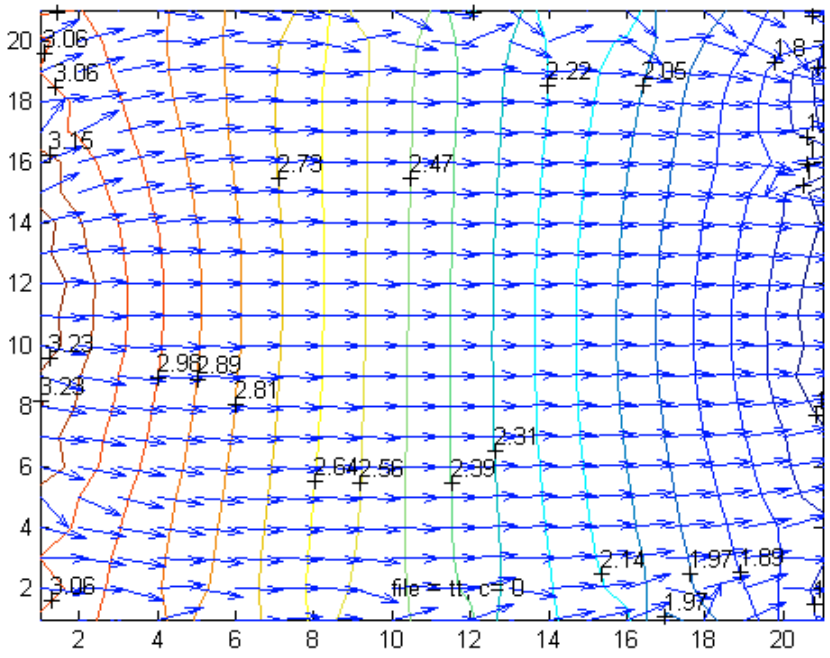
ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้รับทั้ง 80 ค่า มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ลดลงทุกๆค่า จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขจากสมการลาปลาซ เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในขอบเขตที่ต้องการ ดังกล่าวมีค่าลดลงด้วย ทั้งนี้ เนื่องมาจาก เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ไอออนบวกจะไปรวมตัวบริเวณขั้วไฟฟ้าลบ จึงทำให้บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าลบ มีจำนวนไอออนลบเหลืออยู่ จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้าลบนี้มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าบวก ดังภาพที่ 46 ซึ่งไอออนลบเหล่านี้ จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวกต่อไป



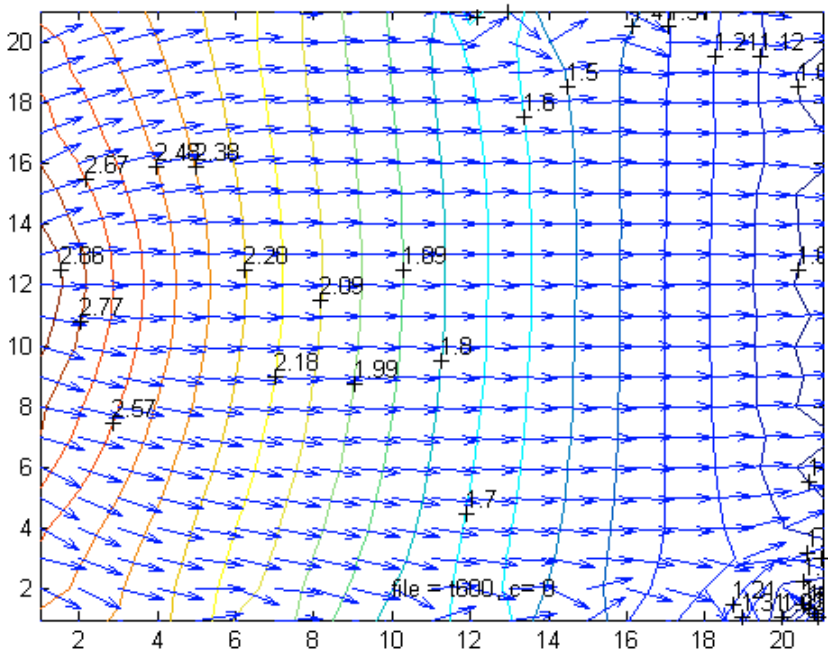


ภาพที่ 46 แสดงไอออนลบที่เหลืออยู่บริเวณขั้วไฟฟ้าลบ

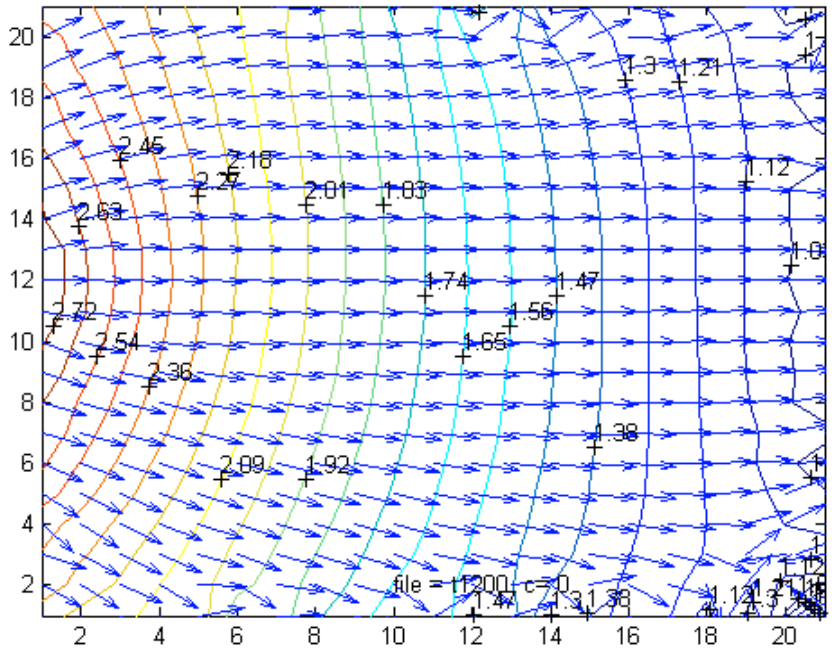
เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าลบ เส้นสมศักย์ จากเดิมซึ่งเป็นเส้นโค้งเข้าหาขั้วไฟฟ้าลบ เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ทั้งนี้มีผลมาจาก เมื่อหยดสารละลายลงในถาดน้ำ บริเวณที่หยดสารละลายจะมีไอออนอยู่หนาแน่น ขั้วไฟฟ้าจึงไม่มีผลต่อเส้นสมศักย์ แต่เส้นสมศักย์ที่เปลี่ยนแปลงจะได้รับผลมาจากไอออนของโซเดียมไอออน และคลอไรด์ไอออนแทน ดังภาพที่ 47 - 52



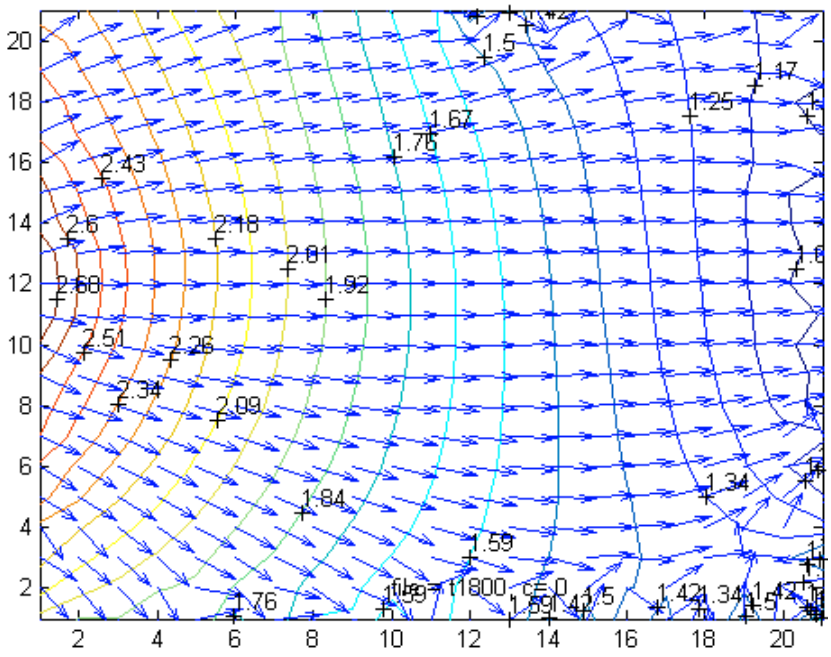
ภาพที่ 47 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ

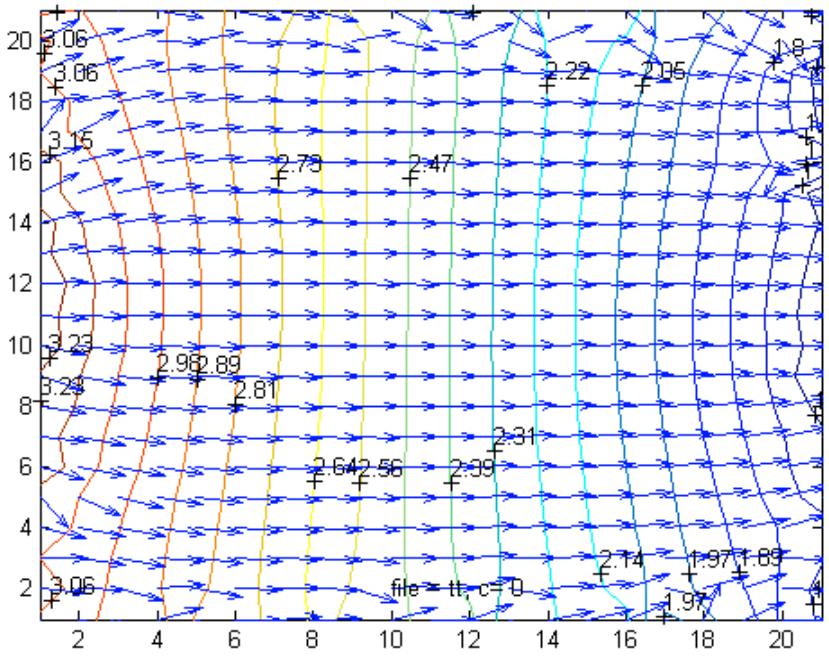


ภาพที่ 48 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 600 วินาที

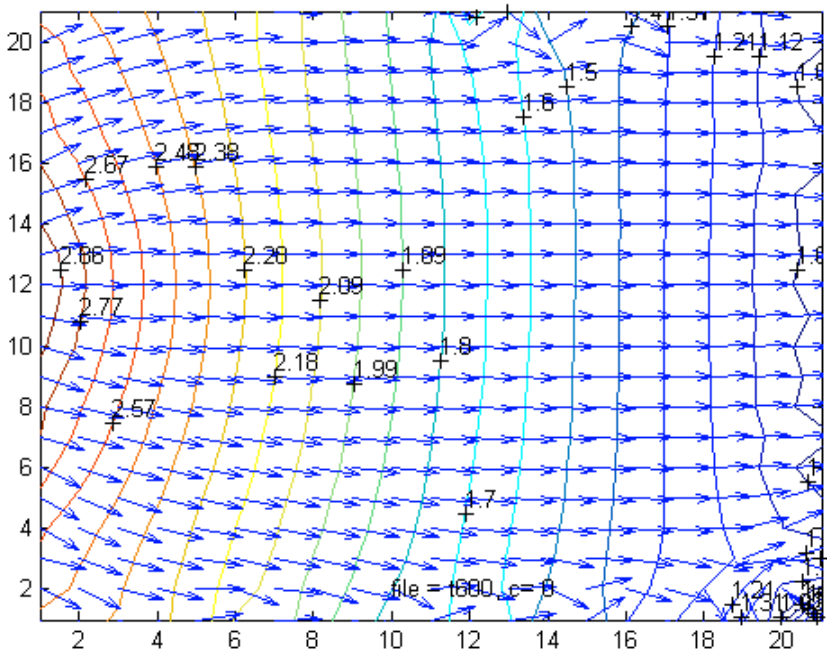


ภาพที่ 49 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 1200 วินาที


20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
1.5
1.17
1.25
1.67
1.75
2.43
2.6
2.18
2.01
1.92
2.51
2.26
2.34
2.09
1.84
1.34
1.59
1.76
1.42
1.34

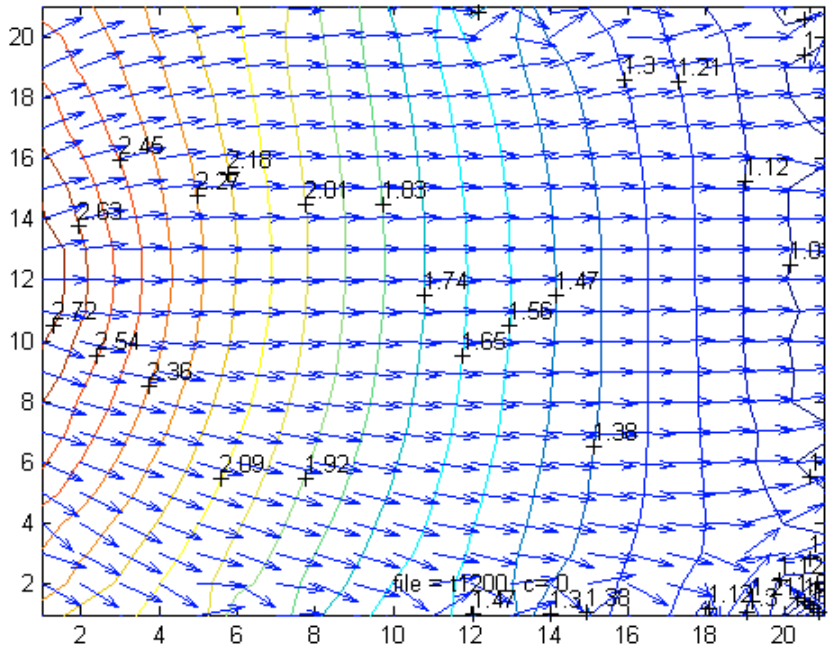


ภาพที่ 47 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า ก่อนการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ

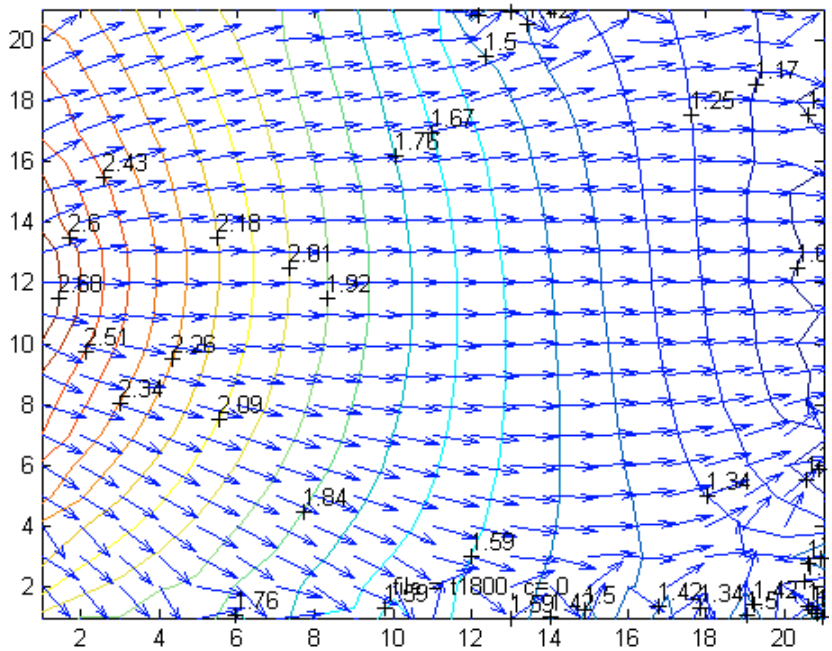


ภาพที่ 48 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์

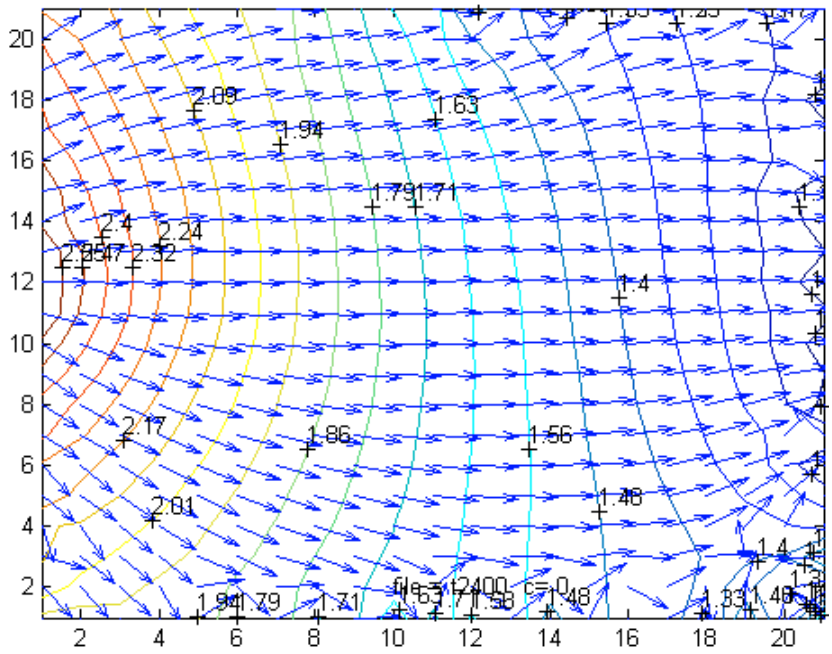
ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 600 วินาที



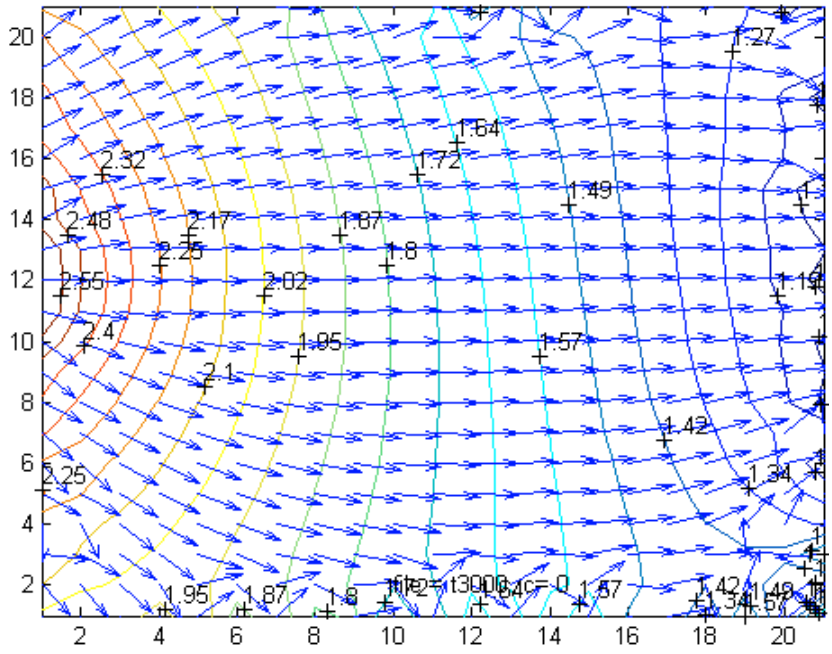
ภาพที่ 49 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 1200 วินาที



ภาพที่ 50 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 1800 วินาที



ภาพที่ 51 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 2400 วินาที



ภาพที่ 52 แสดงกราฟเส้นแรงไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้า หลังการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ในการเก็บข้อมูล 3000 วินาที

5. การทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที

5.1 ผลการทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที

เวลา (วินาที)	ค่ากระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์)					
	ขั้วบวก		ตรงกลาง		ขั้วลบ	
	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง
0	**145**	**-**	**135**	**-**	**178**	**-**
30	**173**	**28**	**158**	**33**	**208**	**30**
90	**175**	**30**	**181**	**46**	**214**	**36**
120	**178**	**33**	**202**	**67**	**219**	**41**
180	**180**	**35**	**235**	**100**	**223**	**45**
240	**182**	**37**	**274**	**139**	**227**	**49**
300	**184**	**39**	**327**	**192**	**232**	**54**
360	**186**	**41**	**372**	**237**	**236**	**58**
420	**188**	**43**	**396**	**261**	**239**	**61**
480	**190**	**45**	**408**	**273**	**242**	**64**
540	**192**	**47**	**409**	**274**	**245**	**67**
600	**194**	**49**	**405**	**270**	**248**	**70**
660	**195**	**50**	**399**	**264**	**250**	**72**
720	**197**	**52**	**389**	**254**	**252**	**74**
780	**198**	**53**	**381**	**246**	**255**	**77**
840	**200**	**55**	**373**	**238**	**257**	**79**
900	**201**	**56**	**365**	**230**	**259**	**81**
960	**202**	**57**	**358**	**223**	**261**	**83**

ตารางที่ 4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที (ต่อ)

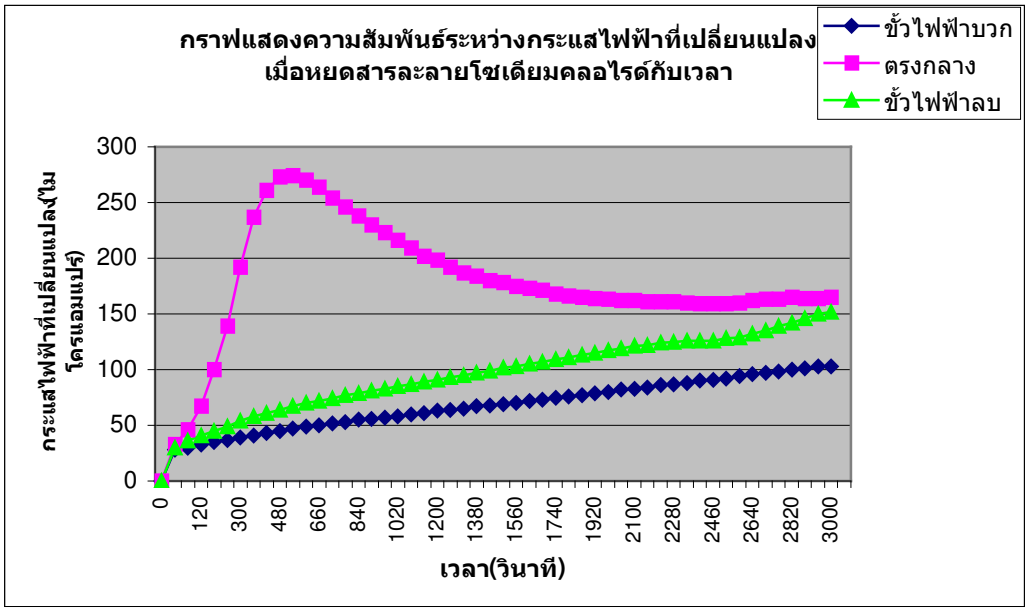
เวลา (วินาที)	**ค่ากระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์)**

	ขั้วบวก		ตรงกลาง		ขั้วลบ	
	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง
1020	203	58	351	216	263	85
1080	205	60	344	209	265	87
1140	206	61	337	202	267	89
1200	208	63	333	198	269	91
1260	209	64	327	192	271	93
1320	210	65	322	187	273	95
1380	212	67	319	184	275	97
1440	213	68	315	180	277	99
1500	214	69	313	178	280	102
1560	215	70	310	175	281	103
1620	217	72	308	173	283	105
1680	218	73	306	171	285	107
1740	220	75	303	168	287	109
1800	221	76	301	166	289	111
1860	222	77	300	165	291	113
1920	224	79	299	164	293	115
1980	225	80	298	163	295	117
2040	227	82	297	162	297	119
2100	228	83	297	162	299	121
2160	229	84	296	161	300	122
2220	231	86	296	161	302	124
2280	232	87	296	161	303	125
2340	233	88	295	160	304	126

ตารางที่ 4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที (ต่อ)

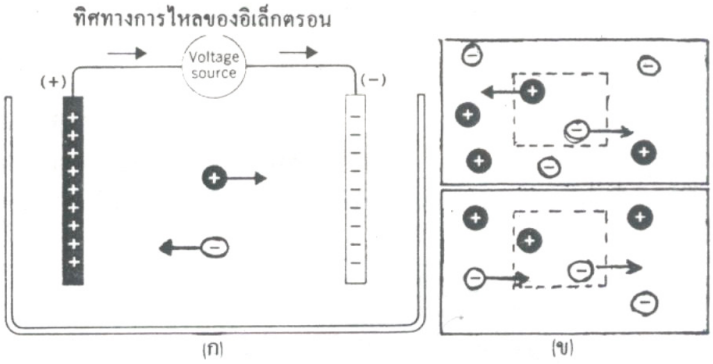
เวลา (วินาที)	ค่ากระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์)					
	ขั้วบวก		ตรงกลาง		ขั้วลบ	
	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง
2400	**235**	**90**	**294**	**159**	**304**	**126**
2460	**236**	**91**	**294**	**159**	**304**	**126**
2520	**237**	**92**	**294**	**159**	**306**	**128**
2580	**239**	**94**	**295**	**160**	**307**	**129**
2640	**241**	**96**	**297**	**162**	**310**	**132**
2700	**242**	**97**	**298**	**163**	**313**	**135**
2760	**243**	**98**	**298**	**163**	**317**	**139**
2820	**245**	**100**	**300**	**165**	**320**	**142**
2880	**246**	**101**	**299**	**164**	**324**	**146**
2940	**248**	**103**	**299**	**164**	**328**	**150**
3000	**248**	**103**	**300**	**165**	**330**	**152**

ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้หลังจากหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 0-540 วินาที ดังตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อหยดสารละลายตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้าลบโดยการพล็อตกราฟ จะเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาโดยหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้าลบ

ค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้ เนื่องมาจาก เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในถาดน้ำที่มีสนามไฟฟ้าอยู่ อิเล็กตรอนที่ไอออนลบให้กับขั้วไฟฟ้าบวก จะวิ่งออกจากขั้วบวกเข้าสู่ขั้วลบ โดยตลอดเวลาที่ไอออนเคลื่อนที่หรือมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ระบบจะต้องรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าเสมอ ดังนั้นทุกครั้งที่ไอออนลบหนึ่งไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ไอออนบวกหนึ่งไอออนจะต้องเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าลบทันที ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองก็เช่นกัน ทุกครั้งที่ไอออนลบให้อิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอนกับขั้วไฟฟ้าบวก จะต้องมีไอออนบวกที่ขั้วลบรับอิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอนทันทีเช่นกัน ดังนั้น เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการหยดสารละลายตำแหน่งอื่นๆ ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 แสดงการนำไฟฟ้า (ก) เซลล์ไฟฟ้า (ข) การคงไว้ซึ่งความเป็นกลางของประจุ

ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้หลังจากหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ขั้วไฟฟ้าบวก มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการหยดสารละลายตำแหน่งตรงกลางและตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ ทั้งนี้ เนื่องมาจาก เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ขั้วไฟฟ้าบวก ไอออนลบ (Cl^-) จะไปรวมตัวกันบริเวณขั้วไฟฟ้าบวก จะเกิดการนำไฟฟ้าโดยมีการเคลื่อนที่ของไอออนบวก (Na^+) และอิเล็กตรอนที่คลอไรด์ไอออน (Cl^-) ให้กับขั้วไฟฟ้าบวก และเมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ขั้วไฟฟ้าลบ ไอออนบวก (Na^+) จะไปรวมตัวที่บริเวณขั้วไฟฟ้าลบ จะเกิดการนำไฟฟ้าโดยมีการเคลื่อนที่ของไอออนลบ (Cl^-) และอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าลบให้กับโซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งจากค่าไอออนโมบิลิตีของคลอไรด์ไอออน (Cl^-) มีค่ามากกว่าค่าไอออนโมบิลิตีของโซเดียมไอออน (Na^+) ส่งผลให้ ในช่วงเวลาเท่ากันนั้น ค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรจากการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ (คลอไรด์ไอออน (Cl^-) เคลื่อนที่ไปขั้วไฟฟ้าบวก) มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมากกว่า การหยดสารละลายที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก (โซเดียมไอออน (Na^+) เคลื่อนที่ไปขั้วไฟฟ้าลบ)

5.2 ผลการทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที

เวลา (วินาที)	**ค่ากระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์)**

	ขั้วบวก		ตรงกลาง		ขั้วลบ	
	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง
0	**129**	**0**	**159**	**0**	**150**	**0**
30	**146**	**17**	**178**	**19**	**163**	**13**
90	**149**	**20**	**188**	**29**	**166**	**16**
120	**150**	**21**	**195**	**36**	**168**	**18**
180	**151**	**22**	**201**	**42**	**170**	**20**
240	**151**	**22**	**207**	**48**	**173**	**23**
300	**151**	**22**	**211**	**52**	**175**	**25**
360	**151**	**22**	**214**	**55**	**178**	**28**
420	**151**	**22**	**218**	**59**	**180**	**30**
480	**151**	**22**	**224**	**65**	**183**	**33**
540	**152**	**23**	**228**	**69**	**184**	**34**
600	**152**	**23**	**234**	**75**	**185**	**35**
660	**152**	**23**	**240**	**81**	**186**	**36**
720	**152**	**23**	**245**	**86**	**186**	**36**
780	**152**	**23**	**247**	**88**	**186**	**36**
840	**152**	**23**	**252**	**93**	**187**	**37**
900	**152**	**23**	**256**	**97**	**187**	**37**
960	**152**	**23**	**260**	**101**	**187**	**37**
1020	**153**	**24**	**262**	**103**	**187**	**37**
1080	**153**	**24**	**265**	**106**	**188**	**38**

ตารางที่ 5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที (ต่อ)

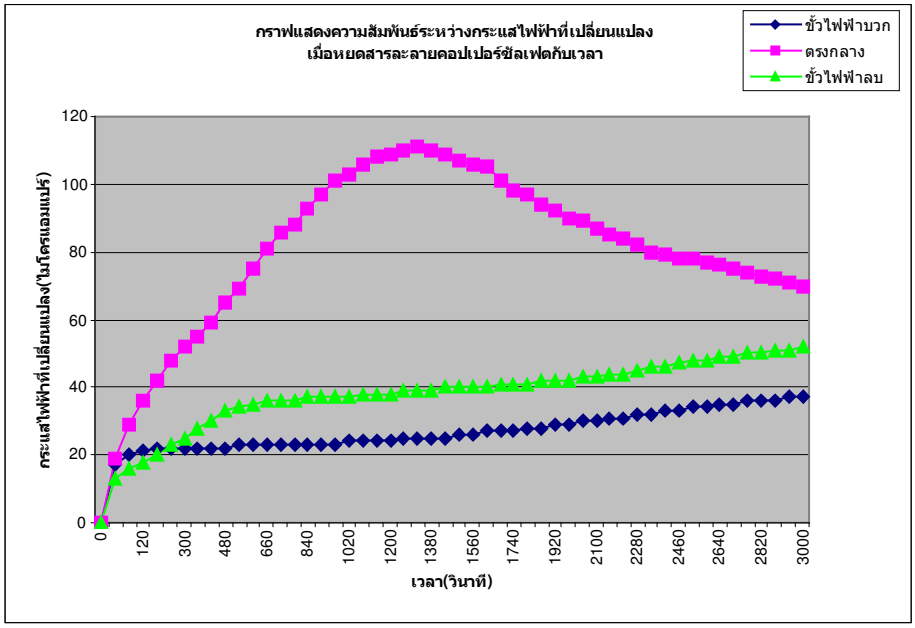
เวลา (วินาที)	**ค่ากระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์)**

	ขั้วบวก		ตรงกลาง		ขั้วลบ	
	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง
1140	153	24	267	108	188	38
1200	153	24	268	109	188	38
1260	154	25	269	110	189	39
1320	154	25	270	111	189	39
1380	154	25	269	110	189	39
1440	154	25	268	109	190	40
1500	155	26	266	107	190	40
1560	155	26	265	106	190	40
1620	156	27	264	105	190	40
1680	156	27	260	101	191	41
1740	156	27	257	98	191	41
1800	157	28	256	97	191	41
1860	157	28	253	94	192	42
1920	158	29	251	92	192	42
1980	158	29	249	90	192	42
2040	159	30	248	89	193	43
2100	159	30	246	87	193	43
2160	160	31	244	85	194	44
2220	160	31	243	84	194	44
2280	161	32	241	82	195	45
2340	161	32	239	80	196	46
2400	162	33	238	79	196	46
2460	162	33	237	78	197	47

ตารางที่ 5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดลองหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงเวลา 3000 วินาที (ต่อ)

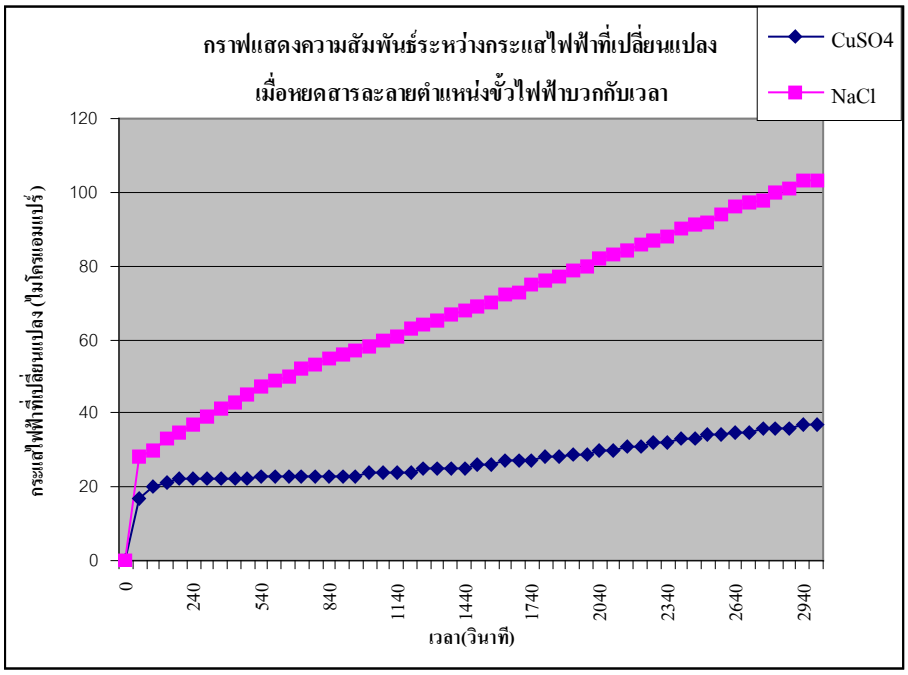
เวลา (วินาที)	ค่ากระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์)					
	ขั้วบวก		ตรงกลาง		ขั้วลบ	
	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง	I ที่วัดได้	I ที่เปลี่ยนแปลง
2520	**163**	**34**	**237**	**78**	**198**	**48**
2580	**163**	**34**	**236**	**77**	**198**	**48**
2640	**164**	**35**	**235**	**76**	**199**	**49**
2700	**164**	**35**	**234**	**75**	**199**	**49**
2760	**165**	**36**	**233**	**74**	**200**	**50**
2820	**165**	**36**	**232**	**73**	**200**	**50**
2880	**165**	**36**	**231**	**72**	**201**	**51**
2940	**166**	**37**	**230**	**71**	**201**	**51**
3000	**166**	**37**	**229**	**70**	**202**	**52**

การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการหยด สารละลายโซเดียมคลอไรด์ คือ ตำแหน่งตรงกลาง มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามากที่สุด ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ารองลงมา และตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวกมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด ดังภาพที่ 55

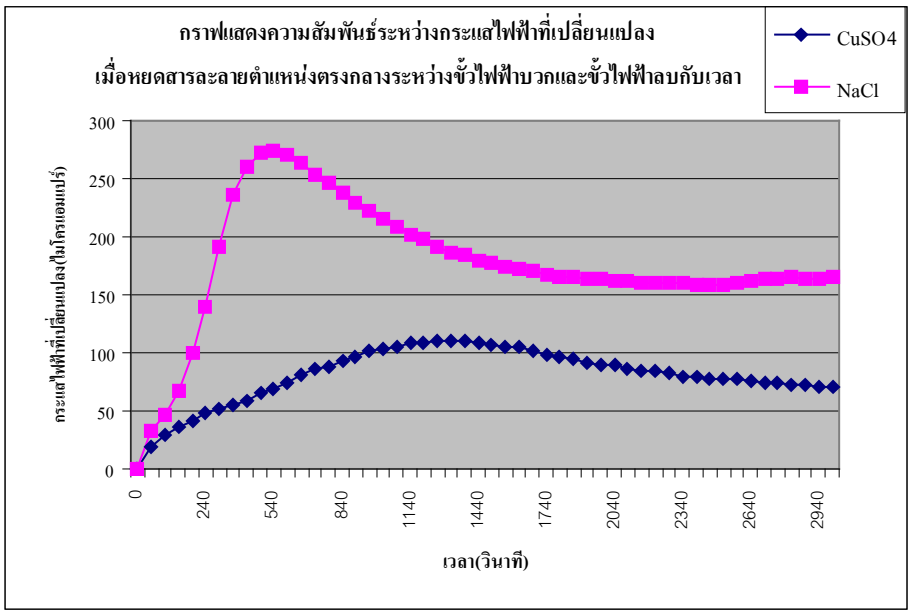


ภาพที่ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาโดยหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้าลบ

เมื่อเปรียบเทียบการหยดสารละลายชนิดต่างกัน โดยทำการหยดตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นได้ว่า สารละลายโซเดียมคลอไรด์จะมีการเพิ่มของค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่าสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต ทุกๆตำแหน่งที่หยด ดังภาพที่ 56,57 และ 58

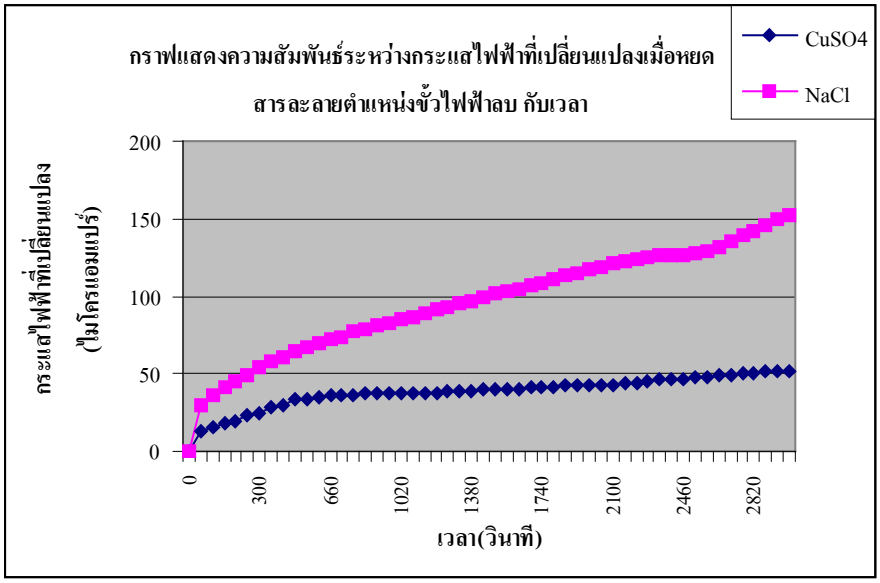


ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาโดยหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก



ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาโดยหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าบวก

และขั้วไฟฟ้าลบ



ภาพที่ 58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาโดยหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าลบ

จากกราฟ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามากกว่าการหยดสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ซึ่งถ้าพิจารณาค่า ไอออนโมบิลิตีของ Cl^- และ Na^+ มีค่าน้อยกว่าของ SO_4^{2-} และค่าสภาพนำไอออนิกของ Cl^- และ Na^+ ก็มีค่าน้อยกว่าของ SO_4^{2-} เช่นกัน ดังนั้น เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับกระบวนการอิเล็กโตรไลซิสที่ขั้วไฟฟ้าของสารละลายทั้งสอง จะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ดังนี้ คือ

กระบวนการอิเล็กโตรไลซิสของสารละลาย NaCl

ปฏิกิริยาที่ขั้วอาโนด (ออกซิเดชัน) : $2H2O\ (l) \rightarrow O2\ (g) + 4H^+ + 4e^-$

ปฏิกิริยาที่ขั้วคาโทด (รีดักชัน) : $4H2O\ (l) + 4e^- \rightarrow 2H2\ (g) + 4OH^-\ (aq)$

กระบวนการอิเล็กโตรไลซิสของสารละลาย $CuSO_4$

ปฏิกิริยาที่ขั้วอาโนด (ออกซิเดชัน) : $2H2O\ (l) \rightarrow O2\ (g) + 4H^+ + 4e^-$

ปฏิกิริยาที่ขั้วคาโทด (รีดักชัน) : $2Cu^{2+}\ (aq) + 4e^- \rightarrow 2Cu\ (s)$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ไอออนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา ไม่ได้มีเฉพาะ Cl^-, Na^+, SO_4^{2-}, Cu^{2+} แต่ยังมีไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำ คือ OH^- และ H^+ โดยทั้งไอออนนี้ มีค่าสภาพนำไอออนิกสูงกว่าไอออนอื่นๆ ดังตารางที่ 3

ดังนั้น เมื่อสังเกตจาก ไอออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้ว ทำให้ทราบว่ากระแสไฟฟ้า เกิดจากการนำไฟฟ้าของไอออนที่ขั้วไฟฟ้า ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่าสภาพนำไอออนิก ($\Omega^{-1}\,cm^2\,mol^{-1}$) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อทำการหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

สารละลายโซเดียมคลอไรด์		สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต	
ปฏิกิริยาที่ขั้วอาโนด	ปฏิกิริยาที่ขั้วคาโทด	ปฏิกิริยาที่ขั้วอาโนด	ปฏิกิริยาที่ขั้วคาโทด
$4H^+$	$4OH^-$	$4H^+$	$2Cu^{2+}$
ค่าสภาพนำไอออนิก = 4 x 349.8 = 1,399.2	ค่าสภาพนำไอออนิก = 4 x 199.2 = 796.8	ค่าสภาพนำไอออนิก = 4 x 349.8 = 1,399.2	ค่าสภาพนำไอออนิก = 4 x 56.6 = 226.4
รวม ค่าสภาพนำไอออนิก = 2,196 $\Omega^{-1}\,cm^2\,mol^{-1}$		รวม ค่าสภาพนำไอออนิก = 1,625.6 $\Omega^{-1}\,cm^2\,mol^{-1}$	

จากตารางที่ 6 ซึ่งเปรียบเทียบค่าสภาพนำไอออนิก จะเห็นว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีค่าสภาพนำไอออนิกโดยรวมสูงกว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต จึงทำให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์มีการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า