

คำนำ

รายงานวิจัยฉบับนี้ นำเสนอผลการศึกษาวิจัยเรื่องการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์กระตุ่นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการวิจัยรายได้คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2552 โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการแก้ปัญหาสมการสนามไฟฟ้า เพื่อนำมา ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบเพื่อนำไปใช้สำหรับการกระตุ่นเมล็ดพันธุ์ข้าว งานวิจัยชิ้นนี้ใช้เมล็ด พันธุ์ข้าวชนิด OC6 และพันธุ์พวงทอง เป็นตัวอย่างในการศึกษาสำหรับการกระตุ่นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วย สนามไฟฟ้า ใช้แรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวก กระแสตรงขั้วลบ และกระแสสลับ หลังจากนั้นได้นำเมล็ด พันธุ์ที่ผ่านการกระตุ่นไปเพาะเลี้ยงเพื่อศึกษาคูความยาวราก และอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์แต่ละ ชนิด เปรียบเทียบในกรณีที่ผ่านการกระตุ่นที่ระดับแรงดัน และเวลาต่างกักับกรณีที่ไม่ได้ผ่านการ กระตุ่น ผลการศึกษานำเสนออยู่ในรายงานฉบับนี้ สำหรับทีมผู้ช่วยนักวิจัยดังมีรายชื่อต่อไปนี้ นายนริศ แทนบุญ และนายนิชกร สุระพร ศึกษาวิจัยเรื่องการแก้สมการสนามไฟฟ้า นายปยุตวิริ ทองเขียว และนายพชร แดงรักษ์ เตรียมการทดสอบทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง นายธนวัฒน์ สว่างงาม นายบัญชา แยมสะอาด นายวิทยา กระต่ายจันทร์ นายสาธิต ปรัชญาชัย ศึกษาผล การกระตุ่นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้าสำหรับเมล็ดพันธุ์ OC6 นายวรเวฐน์ จงมนตรี นายบัณฑิต แก้วคง นายจุฑา แยมเพริศศรี และนางสาวอาภาศิริ คงอินทร์ ศึกษาผลการกระตุ่นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้าสำหรับเมล็ดพันธุ์พวงทอง และ รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล เป็นผู้ร่วมวิจัย โดยมีผู้ช่วยศาสตราจารย์นเรศเรษฐ พัฒนเดช เป็นหัวหน้าโครงการควบคุมงานวิจัยทั้งหมด

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์วิชัย ลี้มกาญจนะพงศ อาจารย์ประจำ ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำความรู้เกี่ยวกับการเพาะเมล็ดพันธุ์ข้าว ให้ความช่วยเหลือในการทำการ ทดลองปฏิบัติการเพาะพันธุ์ข้าวที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช และขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านที่เกี่ยวข้อง

และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนเรื่องงบประมาณการดำเนินงานทั้งหมด

RCH

S

๗15

· R5

ท 224ก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นเรศเรษฐ พัฒนเดช

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 116896

๖ ส.ป. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	I
สารบัญ.....	II
สารบัญภาพ.....	V
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 แนวทางการดำเนินงาน.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อิเล็กโทรสถนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	4
2.2 อิเล็กโทรสถนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	5
2.3 วิธีการคำนวณสนามไฟฟ้า.....	9
2.3.1 วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (FDM).....	13
2.3.2 วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM).....	18
2.3.2.1 การแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นอีลิเมนต์.....	18
2.3.2.2 การสร้างสมการของแต่ละอีลิเมนต์.....	20
2.3.2.3 การรวมสมการของอีลิเมนต์ภายในของขอบเขตปัญหา.....	24
2.3.2.4 การแก้สมการเพื่อหาผลลัพธ์.....	26
2.3.2.5 การกระจายแบบโพลิโนเมียล (Polynomial Expansion).....	29
2.3.2.6 สมการพัลส์ของและสมการลาปลาซ (Poisson's and Laplace's Equation).....	30
2.3.2.7 ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน (ϵ).....	31
2.4 กรณีศึกษาไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element) กับปัญหา ด้าน Electrostatic field	33
2.4.1 ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วย ไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้วิธีการคำนวณ.....	33

II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.2 ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	48
2.4.3 ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กรณีที่ลักษณะรูปร่างหรือมิติของปัญหาซับซ้อนมากขึ้น.....	55
2.5 อิลีกโทรดระนาบ.....	61
2.5.1 อิลีกโทรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile).....	61
2.5.2 อิลีกโทรดระนาบขอบโค้งบรูซ (Bruce profile).....	62
บทที่ 3 การออกแบบอิลีกโทรดและประกอบสร้าง.....	64
3.1 วิธีการออกแบบอิลีกโทรดขอบโค้งโรกอฟสกี.....	64
3.2 การออกแบบอิลีกโทรดเพื่อใช้ในการกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้า.....	74
3.3 การวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของอิลีกโทรดโดยโปรแกรม Comsol.....	75
3.4 อิลีกโทรดขอบโค้งที่ประกอบสร้างขึ้น.....	78
3.5 วิธีการทดลองการกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	79
3.4.1 การกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ.....	80
3.4.2 การกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวก.....	82
3.4.3 การกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับ.....	84
3.4.4 การเพาะเลี้ยงพันธุ์เมล็ดข้าว.....	86
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	88
4.1 ผลการทดสอบ.....	88
4.2 ผลการวัดค่าความยาวรากและอัตราการเจริญเติบโต.....	90
4.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวรากของเมล็ดพันธุ์ OC6.....	90
4.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวรากของเมล็ดพันธุ์พวงทอง.....	93
4.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ OC6.....	96
4.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพันธุ์พวงทอง.....	99

III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	103
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	103
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	108
เอกสารอ้างอิง.....	109



IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะอิเล็กโทรตสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field).....	5
2.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....	6
2.3 ลักษณะอิเล็กโทรตสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Hightly nonuniform field).....	6
2.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรตลักษณะต่างๆ.....	7
2.5 พื้นที่หน้าตัดของฉนวนที่เปลี่ยนแปลงจาก.....	9
2.6 การแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	14
2.7 การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย.....	18
2.8 อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม : การวนโหนด 1-2-3 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	20
2.9 ฟังก์ชันรูปทรงและของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม.....	22
2.10 การรวม 3 อิลิเมนต์เข้าด้วยกัน.....	24
2.11 โหนด 0 ที่ต่อกับโหนดอื่นๆจำนวน m โหนด.....	28
2.12 การแบ่งส่วนของปัญหาที่ไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน.....	32
2.13 ตัวอย่างการแก้ปัญหาแบบ 9 โหนด 8 อิลิเมนต์.....	33
2.14 อิลิเมนต์ที่ 1 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	34
2.15 อิลิเมนต์ที่ 2 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	35
2.16 อิลิเมนต์ที่ 3 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	36
2.17 อิลิเมนต์ที่ 4 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	37
2.18 อิลิเมนต์ที่ 5 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	38
2.19 อิลิเมนต์ที่ 6 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	39
2.20 อิลิเมนต์ที่ 7 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	40
2.21 อิลิเมนต์ที่ 8 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์.....	41
2.22 ตัวอย่างการแก้ปัญหาแบบ 16 โหนด 18 อิลิเมนต์.....	44
2.23 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการแบบสมมาตร.....	46
2.24 ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	49
2.25 กำหนดขนาดของพื้นที่ที่ต้องการ.....	50
2.26 แบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วน.....	50
2.27 การกำหนดขอบเขตของแรงดันก่อนคำนวณด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์โปรแกรม.....	51
2.28 การกำหนดลักษณะของอิลิเมนต์สำหรับการคำนวณ.....	51
2.29 ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า.....	52

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.30 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากโจทย์ตัวอย่างที่ 2.4.1.....	52
2.31 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์กรณี 16 โหนด.....	53
2.32 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมComsol กรณี 16 โหนด.....	53
2.33 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์กรณีแบบสมมาตร.....	54
2.34 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมComsol กรณีแบบสมมาตร.....	54
2.35 แบบหน้าตัดของปลายสายเคเบิลในกรณีก่อนเข้าหัวสาย.....	55
2.36 การกำหนดขอบเขตปัญหาของสายเคเบิลก่อนคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์.....	56
2.37 การกำหนดลักษณะอิลิเมนต์สำหรับการคำนวณ.....	56
2.38 ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในสายเคเบิล.....	57
2.39 แบบหน้าตัดกรณี Non-graded bushings.....	58
2.40 การกำหนดขอบเขตปัญหาของบุชชิงกรณี Non-graded bushings ก่อนคำนวณด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์โปรแกรม.....	59
2.41 การกำหนดลักษณะของอิลิเมนต์สำหรับการคำนวณ.....	59
2.42 ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในบุชชิงกรณี Non-graded bushings.....	60
2.43 เส้นขอบโค้งที่ค่า v มีค่าเท่ากับ $-\pi \leq v \leq \pi$ และค่า u มีค่าเท่ากับ $-\infty \leq u \leq \infty$	61
2.44 อิเล็กโทรดระนาบขอบโค้งบรูซ.....	62
2.45 พารามิเตอร์คุณลักษณะพิเศษที่นิยามโดยอิเล็กโทรดระนาบขอบโค้งบรูซ (Bruce profile).....	63
3.1 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดระนาบ โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 20 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 18505.9 \text{ V/m}$).....	64
3.2 เส้นขอบโค้งโรกอฟสกีที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Matlab ที่ค่า $v = 1.57$ และ $u = -20$	66
3.3 ผลการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{\pi}{2}$, $u = -20$ ระยะระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 20518 \text{ V/m}$).....	67

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.3 ผลการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{\pi}{2}$, $u = -20$ ระยะระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 20518$ V/m).....	67
3.4 เส้นขอบโค้งโรกอฟสกีที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Matlab ที่ค่า $0.1\pi \leq v \leq 0.9\pi$ และ $u = -20$	67
3.5 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 34510.43$ V/m).....	68
3.6 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{2\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 23048.46$ V/m).....	68
3.7 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{3\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 22956.10$ V/m).....	69
3.8 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{4\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 22571.61$ V/m).....	69
3.9 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{6\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 24632.64$ V/m).....	70
3.10 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{7\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 28497.50$ V/m).....	70
3.11 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{8\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 38148.26$ V/m).....	71

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการหมุนขบโค้ง (V) กับ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V	73
3.14 อิเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 1 ชั้น 2 ระบาย	74
3.15 อิเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 2 ระบาย	74
3.16 ผลการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดโรกอฟสกี แบบ 1 ชั้น 2 ระบายอิเล็กโทรด โดยที่ป้อนแรงดัน 100 V และ $d=80$ mm	75
3.17 การคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดโรกอฟสกี แบบ 2 ชั้น 3 ระบายอิเล็กโทรด โดยที่ป้อนแรงดัน 100 V และ $d=137$ mm	76
3.18 อิเล็กโทรดขบโค้งทอกลมรัศมี 2 นิ้ว	77
3.19 ผลการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดโรกอฟสกี แบบ 2 ชั้น 1ระบายอิเล็กโทรด โดยที่ป้อนแรงดัน 100 V และ $d=80$ mm ($E_{max}=1831.96$ V/m)	77
3.20 อิเล็กโทรดขบโค้งที่ประกอบสร้างขึ้น	78
3.21 วงจรทดสอบ	79
3.22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	80
3.23 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบ	81
3.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	82
3.25 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวก	83
3.26 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	84
3.27 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ	85
3.28 การเตรียมกระดาษที่ใช้ในการปลุก	86
3.29 การแบ่งเมล็ดข้าวออกเป็นชุดตามแรงดันและเวลาที่ใช้ในการทดลอง	86
3.30 ชุดเมล็ดข้าวระหว่างการทดสอบ	87
3.31 การวัดความยาวรากและหาอัตราการงอกของเมล็ด	87
4.1 ความยาวรากของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปรียบเทียบผลจากการกระตุ้น และไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าเมื่อปลุกเป็นเวลา 7 วัน	88
4.2 ลักษณะการงอกของข้าวที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ได้ผ่านการกระตุ้น	89

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวOC6).....	90
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกOC6).....	90
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวOC6).....	91
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกOC6).....	91
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวOC6).....	92
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกOC6).....	92
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง).....	93
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกพวงทอง).....	93
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง).....	94
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกพวงทอง).....	94

IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง)	95
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง)	95
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวOC6)	96
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกOC6)	96
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวOC6)	97
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกOC6)	97
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวOC6)	98
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกOC6)	98
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง)	99
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง)	99

X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง).....	100
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง).....	100
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง)	101
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง).....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย	2
2.1 การรวมค่าแต่ละอิเลิเมนต์เข้าด้วยกัน	42
2.2 ค่าที่ได้จากการรวมแต่ละอิเลิเมนต์เข้าด้วยกันจาก จำนวนทั้งหมด 8 อิเลิเมนต์	43
2.3 ค่าที่ได้จากการรวมแต่ละอิเลิเมนต์เข้าด้วยกันจาก จำนวนทั้งหมด 18 อิเลิเมนต์	45
2.4 ค่าที่ได้จากการรวมแต่ละอิเลิเมนต์เข้าด้วยกัน	47
3.1 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของขอบโค้งโรกอฟสกี ที่ระยะห่างระหว่าง อิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V	72
5.1 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวโดย พิจารณาจากความยาวรากสูงสุด	103
5.2 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวโดย พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุด	104
5.3 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกโดย พิจารณาจากความยาวรากสูงสุด	105
5.4 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกโดย พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุด	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก และการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้เกิดภาวะขาดแคลนอาหาร และอาหารมีราคาสูงขึ้นทั่วโลกจึงเป็นโอกาสดีที่ประชากรส่วนใหญ่ในประเทศไทยมีอาชีพและการดำรงชีวิตผูกพันกับการเกษตรมาช้านาน เรียกได้ว่าเป็นอาชีพที่คู่กับประเทศและเป็นที่ยึดกันทั่วโลก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเกษตรสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศปีละหลายพันล้านบาท ข้าวที่ส่งออกจากประเทศไทยนับว่าเป็นข้าวที่มีคุณภาพและมีรสชาติที่ดีมากเป็นที่นิยมทั่วไป ซึ่งการปลูกข้าวในประเทศไทยนั้นมีการปรับปรุงพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งภาครัฐและเอกชน เพื่อเพิ่มผลผลิตให้มีคุณภาพดีขึ้นและปริมาณมากขึ้น ในปัจจุบันการปลูกข้าวแบบนาดำและนาหว่านนั้น จำนวนครั้งต่อปีขึ้นอยู่กับระบบชลประทาน และปริมาณน้ำในแต่ละปี และเกษตรกรเองจะไม่นิยมเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวของตัวเองมาใช้ เนื่องจากติดปัญหาการเตรียมเมล็ดพันธุ์ สถานที่จัดเก็บ หรือราคาข้าวที่สูงขึ้นทำให้เกษตรกรรีบนำข้าวนั้นไปขายเพื่อเก็งกำไรทำให้เกิดการขาดแคลนเมล็ดพันธุ์ โดยส่วนใหญ่เกษตรกรจะนิยมซื้อเมล็ดพันธุ์ข้าวจากพ่อค้าหรือโรงงานผลิตเมล็ดพันธุ์ แต่จากปัญหาที่กล่าวมาทำให้เกิดการขาดแคลนเมล็ดพันธุ์ข้าว ทำให้ผู้ผลิตเมล็ดพันธุ์ต้องเร่งผลิต การใช้เครื่องปรับปรุงคุณภาพเมล็ดข้าวจะช่วยให้ช่วยในการผลิตเร็วยิ่งขึ้นและเมล็ดพันธุ์เองก็มีคุณภาพสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวไม่ทันต่อความต้องการของเกษตรกร กรมพัฒนาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้ริเริ่มโครงการปรับปรุงคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าซึ่งในทางวิจัยเบื้องต้นแล้วพบว่าให้ผลดีในระดับหนึ่งที่น่าสนใจ

การกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้านั้นยังเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ สำหรับเทคโนโลยีของประเทศไทย ทางกลุ่มผู้วิจัยจึงได้นำเสนอโครงการวิจัยเพื่อออกแบบสร้างเครื่องกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าซึ่งจะใช้เป็นโครงการนำร่องในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเพื่อใช้ในโรงงานผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับวิจัยปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าว ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 เครื่องกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวสามารถนำไปใช้ในโรงงานผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าว เพื่อปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ข้าวในขณะที่รับเร่งผลิตเมล็ดพันธุ์เพื่อป้องกันปัญหาเกษตรกรขาดแคลนเมล็ดพันธุ์และปัญหาเมล็ดพันธุ์ด้อยคุณภาพอันเนื่องจากการเร่งรีบในการผลิต

1.3 เพื่อเป็นการบูรณาการความรู้ทางวิทยาศาสตร์ การเกษตร ทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ให้เกิดประโยชน์ใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีสนามไฟฟ้า การแก้ปัญหาสนามไฟฟ้าและการคำนวณสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดระนาบรูปทรงต่างๆ
2. ออกแบบและสร้างอิเล็กโทรดระนาบแบบขอบโค้งโรกอฟสกี
3. ทำการทดสอบการกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดระนาบแบบขอบโค้งโรกอฟสกี
4. ทำการทดลองเพาะเมล็ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า
5. ทำการวิเคราะห์ผลและรายงานฉบับสมบูรณ์

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ทำการออกแบบและพัฒนาสร้างเครื่องปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าว
2. ทดสอบการทำงานของเครื่องปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าว
3. ทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าว
4. สรุปผลที่ทำการศึกษาทั้งหมดหาความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อไป
5. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์เสนอต่อคณะวิศวกรรมศาสตร์

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												หมายเหตุ
	ปี 2551						ปี 2552						
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	
ทำการขั้นตอน													
1)	←————→												
2)				←————→									
3)						←————→							
4)											←————→		
5)											←————→		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

1. สามารถเข้าใจการแก้ปัญหาสนามไฟฟ้าและคำนวณสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ระนาบรูปทรงต่างๆได้
2. สามารถออกแบบสร้างอิเล็กทรอนิกส์ระนาบได้
3. สามารถนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ไปออกแบบปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ ให้มีคุณภาพมีผลผลิตในอัตราที่สูงขึ้น
4. สามารถผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเครื่องปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวจำหน่ายให้กับเกษตรกรในราคาย่อมเยา
5. สามารถให้บริการปรับปรุงคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้าของเกษตรกรในราคาย่อมเยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีสนามไฟฟ้า

2.1 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [1]

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าทุก ๆ จุด ในช่วงระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

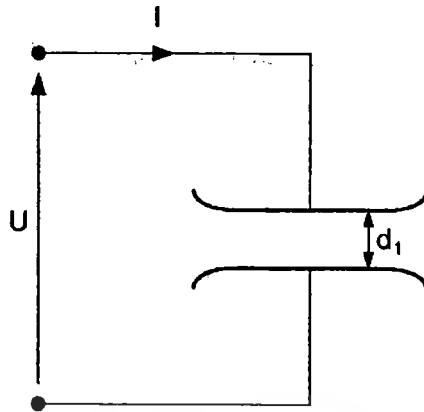
เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ. จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด
 E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

นั่นหมายความว่า เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวนหรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวนนี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรกดาวนนั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวนนี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ซึ่งเรียกว่า ความคงทนทางไฟฟ้าของการฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้เสมอ



รูปที่ 2.1 ลักษณะอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

2.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังในรูป 2.2 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีคำนิยามว่า

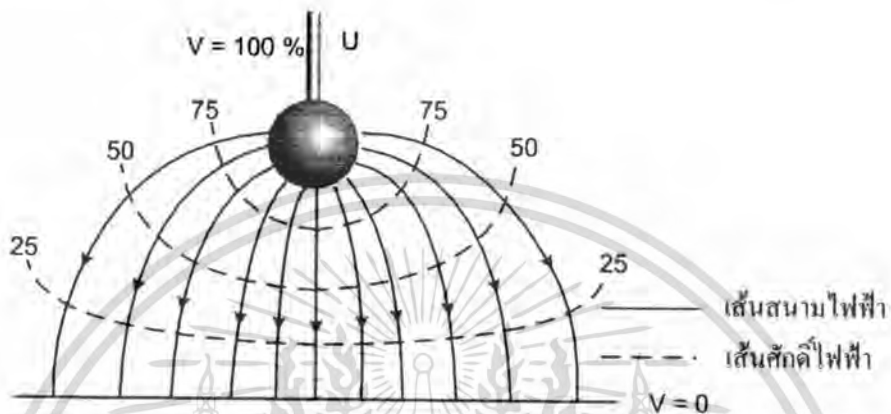
$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.4)$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

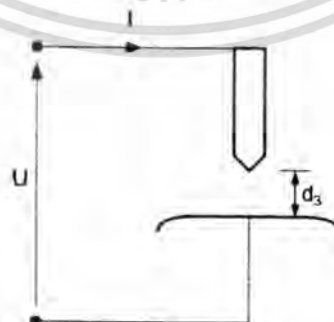
$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \quad (2.5)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (predischage) เกิดก่อนเบรกดาวน์ กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b



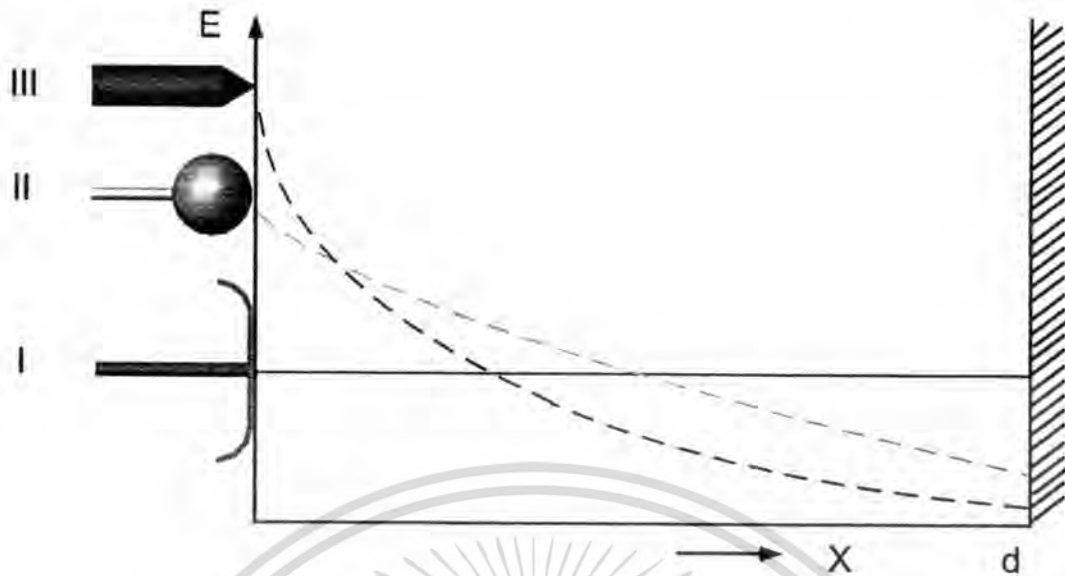
รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

ในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูป 2.3 เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูป 2.4 อิเล็กโทรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.3 ลักษณะอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ในบริเวณใกล้ๆ ผิวอิเล็กโทรด คือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด) เรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์เรียกว่ากระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสพรีดีสชาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ (2.3) แต่ η' จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.5) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ (2.5) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta'} \quad (2.6)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด
 U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.6) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีไม่มีประจุค้าง ระหว่างอิเล็กโทรด (free of space charge) หรือกล่าวง่ายๆ ก็คือ สมการ (2.6) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มเกิด (starting voltage, threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแก๊ป

ฉนวนระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะถูกเบรกดาวขึ้น (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรืออาจจะเกิดโคโรนาขึ้นเมื่อฉนวนก๊าซได้รับแรงดันถึงค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวขึ้นจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มเกิด) ค่าแรงดันเริ่มเกิดจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta \quad (2.7)$$

เมื่อ

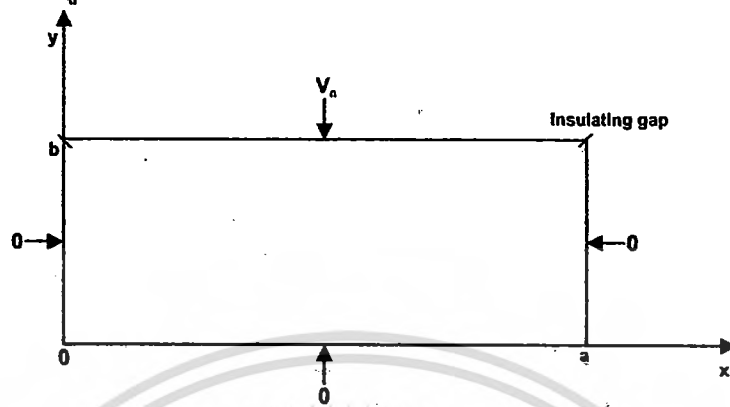
U_i คือ แรงดันเริ่มเกิด

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มเกิด U_i

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวขึ้นนี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้าง ว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มเกิด หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนค่าแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด แล้วยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ

2.3 วิธีการคำนวณสนามไฟฟ้า Laplace's Equations [2]

เมื่อเราพิจารณาปัญหาของการจนวนที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากมีพื้นที่หน้าตัด แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยให้



รูปที่ 2.5 พื้นที่หน้าตัดของจนวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

กำหนดให้ทั้งสามด้านของจนวนนี้มีแรงดัน 0 โวลต์ ขณะที่ด้านที่มีค่าแรงดัน V_0 คงที่ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าปัญหาขอบเขต สมการอนุพันธ์ย่อยที่ใช้แก้ปัญหานี้คือ

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (2.8)$$

เงื่อนไขขอบเขตหลัก

$$V(0, y) = 0 \quad (2.9a)$$

$$V(a, y) = 0 \quad (2.9b)$$

$$V(x, 0) = 0 \quad (2.9c)$$

$$V(x, b) = V_0 \quad (2.9d)$$

กำหนดให้

$$V(x, y) = X(x)Y(y) \quad (2.10)$$

แทนค่านี้ในสมการ (2.8) และหารด้วย XY เป็น

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = 0$$

หรือ

$$\frac{X''}{X} = -\frac{Y''}{Y} = \lambda \quad (2.11)$$

ซึ่ง λ คือค่าคงที่การแยก ดังนั้นจึงแยกเป็นสมการได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X'' - \lambda X = 0 \quad (2.12)$$

$$Y'' + \lambda Y = 0 \quad (2.13)$$

เพื่อแก้ปัญหา ของสมการ(2.12) และ (2.13) ที่เป็น สมการเชิงอนุพันธ์แบบสามัญ เราจะต้องใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตของสมการ (2.9) อย่างไรก็ตามเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้ต้องสามารถเปลี่ยนรูปได้เพื่อที่จะได้สามารถประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับสมการด้านบน เนื่องจาก $V = XY$,

$$V(0, y) = 0 \rightarrow X(0) = 0 \quad (2.14a)$$

$$V(a, y) = 0 \rightarrow X(a) = 0 \quad (2.14b)$$

$$V(x, 0) = 0 \rightarrow Y(0) = 0 \quad (2.14c)$$

$$V(x, b) = V_0 \rightarrow X(x)Y(b) = V_0 \quad (2.14d)$$

พบว่ามีเพียงแต่เงื่อนไขที่เป็นเอกพันธ์เท่านั้นที่สามารถแยกสมการได้ ซึ่งมีความเป็นไปได้อยู่ 3 กรณีที่สามารถแก้สมการ (2.12) นั่นก็คือ $\lambda = 0, \lambda > 0$ และ $\lambda < 0$ กรณีที่ 1 ถ้า $\lambda = 0$ สมการ (2.12) จะเป็น

$$X'' = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{d^2 X}{dx^2} = 0 \quad (2.15)$$

ที่มีผลเฉลย

$$X(x) = a_1 x + a_2 \quad (2.16)$$

ซึ่ง a_1 และ a_2 เป็นค่าคงที่ เมื่อแทนเงื่อนไขขอบเขตของสมการ (2.14a) และสมการ (2.14b),

$$X(0) = 0 \rightarrow a_2 = 0$$

$$X(a) = 0 \rightarrow a_1 = 0$$

ดังนั้น $X(x) = 0$ เป็นผลเฉลยไม่แท้ แสดงให้เห็นว่ากรณี $\lambda = 0$ ยอมรับไม่ได้
กรณีที่ 2 ถ้า $\lambda > 0$ หรือ $\lambda = \alpha^2$ สมการ (2.12) จะเป็น

$$X'' - \alpha^2 X = 0 \quad (2.17)$$

ด้วยสมการช่วยคือ $m^2 - \alpha^2 = 0$ หรือ $m = \pm \alpha$ ดังนั้นผลเฉลยทั่วไปคือ

$$X = b_1 e^{-\alpha x} + b_2 e^{\alpha x} \quad (2.18)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = b_3 \sinh \alpha x + b_4 \cosh \alpha x \quad (2.19)$$

เมื่อใส่ขอบเขตเงื่อนไขเข้าไปเพื่อหาค่า b_3 และ b_4

$$X(0) = 0 \quad \rightarrow \quad b_4 = 0$$

$$X(a) = 0 \quad \rightarrow \quad b_3 = 0$$

เนื่องจาก $\sinh \alpha x$ ไม่มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ $\alpha > 0$ ดังนั้น $X(x) = 0$ เป็นผลเฉลยไม่แท้ และเราสามารถสรุปได้ว่ากรณี $\lambda > 0$ ไม่เป็นจริง
กรณีที่ 3 ถ้า $\lambda < 0$ หรือ $\lambda = -\beta^2$ สมการ (2.12) จะเป็น

$$X'' + \beta^2 X = 0 \quad (2.20)$$

ด้วยสมการช่วยคือ $m^2 + \beta^2 = 0$ หรือ $m = \pm j\beta$ ดังนั้นผลเฉลยสมการ (2.20) คือ

$$X = A_1 e^{j\beta x} + A_2 e^{-j\beta x} \quad (2.21a)$$

หรือ

$$X = B_1 \sin \beta x + B_2 \cos \beta x \quad (2.21b)$$

เมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตเข้าไป

$$X(0) = 0 \quad \rightarrow \quad B_2 = 0$$

$$X(a) = 0 \quad \rightarrow \quad \sin \beta a = 0 = \sin n\pi$$

หรือ

$$\beta = \frac{n\pi}{a}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.22)$$

เนื่องจาก B_1 ไม่สามารถละทิ้งได้ เมื่อมันไม่เป็นผลเฉลยไม่แท้ อย่างไรก็ตาม $\sin \beta a$ สามารถละทิ้งได้ โดยปราศจากการทำให้มันมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจะพบว่าเซตที่มีค่าไม่สิ้นสุดของ discrete value ของ λ ในสมการ (2.12) จะมีผลเฉลยที่แท้จริงได้ เช่น

$$\lambda = -\beta^2 = -\frac{n^2 \pi^2}{a^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมันคือ eigen values ของปัญหาดังกล่าวและยังสอดคล้องกับ eigen functions คือ

$$X_n(x) = \sin \beta x = \sin \frac{n\pi x}{a} \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.23) พบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องรวมค่าที่เป็นลบของ n เพราะทำให้ผลอันเดียวกันกับเซตของ eigen values แต่เราจะไม่รวม $n=0$ เนื่องจากมันจะให้ผลเฉลยไม่แท้ $X=0$ เช่นเดียวกับที่แสดงให้ดูในกรณีที่ 1 เมื่อ $\lambda=0$ เมื่อรู้วิธีหา λ เราก็สามารถแก้สมการ(2.13) เพื่อหา $Y_n(y)$ ซึ่งเหมือนกับหา $X_n(x)$ นั่นคือ เราจะแก้สมการ

$$Y'' - \beta^2 Y = 0 \quad (2.25)$$

เหมือนกับสมการ (2.17) ซึ่งผลเฉลยของมันคือสมการ (2.19) ดังนั้นผลเฉลยของสมการ (2.25) จะอยู่ในรูป

$$Y_n(y) = a_n \sinh \frac{n\pi y}{a} + b_n \cosh \frac{n\pi y}{a} \quad (2.26)$$

แทนเงื่อนไขขอบเขต ของสมการ(2.14c)

$$Y(0) = 0 \quad \rightarrow \quad b_n = 0$$

ดังนั้น

$$Y_n(y) = a_n \sinh \frac{n\pi y}{a} \quad (2.27)$$

แทนสมการ (2.24) และสมการ (2.27) ลงในสมการ (2.10) เราจะได้

$$V_n(x, y) = X_n(x)Y_n(y) = a_n \sin \frac{n\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi y}{a} \quad (2.28)$$

ซึ่งเพียงพอที่สมการ (2.8) และเงื่อนไขขอบเขตที่เป็นเอกพันธ์ของสมการ (2.9a), (2.9b) และ (2.9c) โดยหลักการ superposition, การรวมกันแบบเชิงเส้นของผลเฉลย V_n , แต่ละค่าที่แตกต่างกันของ n และค่าสัมประสิทธิ์ a_n ซึ่งทั้งหมดนี้เราจะหาผลเฉลยของสมการ (2.8) ได้ ดังนั้นเราอาจแสดงการหาผลเฉลย V ของสมการ (2.8) อีกครั้ง โดยใช้อนุกรมอนันต์ แทนเข้าไปในฟังก์ชัน V_n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi y}{a} \quad (2.29)$$

ตอนนี้เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a_n ได้โดยแทนเงื่อนไขขอบเขตที่เป็น Inhomogeneous ในสมการ (2.9d) ลงในสมการ (2.29) เราจะได้

$$V(x, b) = V_0 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi b}{a} \quad (2.30)$$

ซึ่งเมื่อใส่องค์ประกอบฟูเรียร์ที่เป็นไซน์ ให้ V_0 ดังนั้น

$$a_n \sinh \frac{n\pi b}{a} = \frac{2}{b} \int_0^b V_0 \sin \frac{n\pi x}{a} dx = \frac{2V_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$$

หรือ

$$a_n = \begin{cases} \frac{4V_0}{n\pi} \frac{1}{\sinh \frac{n\pi b}{a}}, & n = \text{odd}, \\ 0, & n = \text{even} \end{cases} \quad (2.31)$$

แทนสมการ (2.31) ในสมการ (2.29) ได้ผลเฉลยที่สมบูรณ์คือ

$$V(x, y) = \frac{4V_0}{\pi} \sum_{n=\text{odd}} \frac{\sin \frac{n\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi y}{a}}{n \sinh \frac{n\pi b}{a}} \quad (2.32a)$$

โดยแทนที่ n ด้วย $2k-1$ สมการ (2.32a) อาจเขียนได้เป็น

$$V(x, y) = \frac{4V_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2k-1)\pi x}{a} \sinh \frac{(2k-1)\pi y}{a}}{(2k-1) \sinh \frac{(2k-1)\pi b}{a}}, \quad n = 2k-1 \quad (2.32b)$$

2.3.1 วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (FDM) [3]

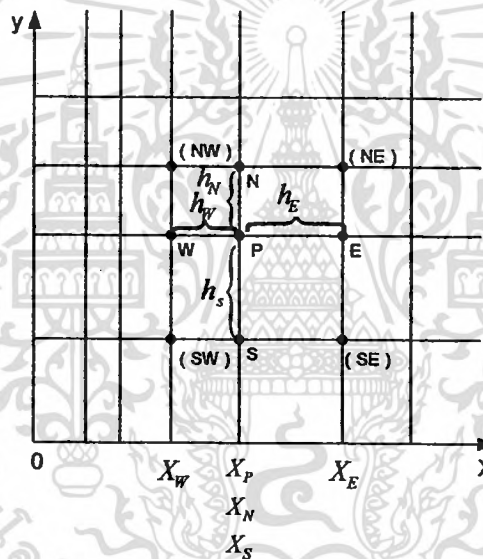
หลักการเบื้องต้นที่จะกล่าวในที่นี้เป็นหลักการที่ใช้ในสนามไฟฟ้า 2 มิติที่อธิบายได้ด้วยสมการลาปลาซหรือสมการพัวส์ซอง โดยสนามไฟฟ้านี้อยู่ในแกนระนาบพิกัด x-y และกำหนดเงื่อนไขขอบบนพื้นที่ในระนาบให้

วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (FDM) เป็นวิธีหนึ่งสำหรับแก้สมการอนุพันธ์ย่อยซึ่งใช้พื้นฐานของ finite difference approximation สำหรับหาอนุพันธ์ การแก้สมการด้วยวิธีนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบ่งพื้นที่ที่จะแก้ปัญหให้เป็นตาข่ายซึ่งจะทำให้เกิดจุดตัด n จุด
2. ใช้สมการอนุพันธ์ย่อยเพื่อหา partial difference formula ซึ่งเกี่ยวข้องกับจุดข้างเคียงของจุดต่างๆ ในตาข่าย
3. แก่สมการ n สมการที่มีตัวแปรไม่ทราบค่า n ตัวซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่จุดตัดแต่ละจุด

ในการแบ่งพื้นที่ที่จะแก้ปัญหให้เป็นตาข่าย (Grid or net) โดยถือว่าที่จุดตัด (node) ต่างๆ ของตาข่ายเป็นจุดการกระจายของศักย์ไฟฟ้า ในการแบ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเงื่อนไขขอบเขตและลักษณะของพื้นที่ที่จะแก้ปัญห โดยปกติแล้วจะแบ่งตาข่ายให้อยู่ในรูปเหลี่ยมที่สม่ำเสมอกล่าวคือเป็นสี่เหลี่ยม, สามเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยม ถ้าแบ่งตาข่ายให้อยู่ในรูปเหลี่ยมไม่สม่ำเสมอแล้วจะไม่สามารถแทนสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ดังนั้นเพื่ออธิบายวิธี FDM นี้ เข้าใจจะใช้ตาข่ายที่แบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในรูปที่ 2.6 เป็นรูปการแบ่งพื้นที่บนระบบระนาบพิกัด x - y เป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากอย่างไม่สม่ำเสมอ (ด้านของสี่เหลี่ยมไม่เท่ากัน) โดยด้านของสี่เหลี่ยมจะขนานกับแกนระนาบและแกนตั้งฉาก (x, y) จุดตัดในรูปที่ 2.6 นี้จุดที่จะพิจารณาคือจุดตัด P ซึ่งมีจุดตัดข้างเคียงในแนวขนานและแนวตั้งฉาก 4 จุดคือ N, W, S และ E ในการพิจารณารั้งนี้สมมติว่าจุดข้างเคียง 4 จุดนี้เป็นจุดของเงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าคือ $\phi(N)$, $\phi(W)$, $\phi(S)$ และ $\phi(E)$ เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ทราบค่าที่ซึ่งสนามไฟฟ้ากระจายอย่างต่อเนื่อง เราสามารถเขียนสมการของศักย์ไฟฟ้าที่จุด (x, y) ได้โดยใช้ Taylor's series ได้ดังสมการ(2.33)

$$\begin{aligned}
\varphi(x, y) = & \varphi(P) + \frac{1}{1!} [(x - x_p)\varphi_x(P) + (y - y_p)\varphi_y(P)] \\
& + \frac{1}{2!} [(x - x_p)^2\varphi_{xx}(P) + 2(x - x_p)(y - y_p)\varphi_{xy}(P) + (y - y_p)^2\varphi_{yy}(P)] \\
& + \frac{1}{3!} [(x - x_p)^3\varphi_{xxx}(P) + 3(x - x_p)^2(y - y_p)\varphi_{xxy}(P) \\
& + 3(x - x_p)(y - y_p)^2\varphi_{xyy}(P) + (y - y_p)^3\varphi_{yyy}(P)] \\
& + R'_{xy}(P)
\end{aligned} \tag{2.33}$$

เมื่อ $R'_{xy}(P)$ คือ อันดับที่สูงขึ้นที่เหลือจากการกระจายอนุกรม

$$\begin{aligned}
\varphi_x(P) &= \left[\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \right]_P \\
\varphi_y(P) &= \left[\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right]_P \\
\varphi_{xy}(P) &= \left[\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x \partial y} \right]_P \quad \text{etc.}
\end{aligned}$$

ศักย์ไฟฟ้าทุกจุดที่อยู่ในบริเวณใกล้ๆ กับ P สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ (2.33) ดังกล่าวซึ่งให้ความแม่นยำเพียงพอ การพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าในนั้น จากผลการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ ดังกล่าวเมื่อพจน์ของการกระจายที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ลำดับสาม ไม่ได้นำมาพิจารณาแล้วนั้น หรือการที่ไม่พิจารณาพจน์ของตัวแปรที่เกิดจากการคูณด้วยพจน์ของระยะทางสั้นๆ h ที่ยกกำลังสามหรือมากกว่า ทำให้สามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่โหนด E, W, S และ N ได้ตามสมการที่ (2.34) โดยกำหนดให้ระยะ $(x - x_p)$ และ $(y - y_p)$ ถูกแทนด้วยค่าระยะ hE, hW, hS และ hN ที่เหมาะสมตามลำดับ

$$\varphi(E) = \varphi(P) + hE\varphi_x(P) + \frac{1}{2}hE^2\varphi_{xx}(P) \tag{2.34a}$$

$$\varphi(W) = \varphi(P) + hW\varphi_x(P) + \frac{1}{2}hW^2\varphi_{xx}(P) \tag{2.34b}$$

$$\varphi(N) = \varphi(P) + hN\varphi_y(P) + \frac{1}{2}hN^2\varphi_{yy}(P) \tag{2.34c}$$

$$\varphi(S) = \varphi(P) + hS\varphi_y(P) + \frac{1}{2}hS^2\varphi_{yy}(P) \tag{2.34d}$$

นำสมการ (2.34a)+(2.34b) และ (2.34c)+(2.34d) จะได้สมการดังนี้

$$\varphi(E) + \varphi(W) - 2\varphi(P) = (hE - hW)\varphi_x(P) + \frac{1}{2}(hE^2 + hW^2)\varphi_{xx}(P) \tag{2.35a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมาณขั้นต้น ให้ศักย์ไฟฟ้าในระหว่างจุดตัดกระจายอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น เราสามารถประมาณหาอนุพันธ์ของ $\varphi_x(P)$ และ $\varphi_y(P)$ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\varphi_x(P) &= \frac{\partial \varphi_{(x,y)}}{\partial x} \\ &= \frac{hW}{hE(hE+hW)}\varphi(E) + \frac{(hE-hW)}{hEhW}\varphi(P) - \frac{hE}{hW(hE+hW)}\varphi(W) \quad (2.36a)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi_y(P) &= \frac{\partial \varphi_{(x,y)}}{\partial y} \\ &= \frac{hS}{hN(hN+hS)}\varphi(N) + \frac{(hN-hS)}{hNhS}\varphi(P) - \frac{hN}{hS(hN+hS)}\varphi(S) \quad (2.36b)\end{aligned}$$

แทนค่าสมการ (2.36a) ลงในสมการ (2.35a) และทำทำนองเดียวกัน แทนค่าสมการ (2.36b) ลงในสมการ (2.35b) จะได้สมการ

$$\varphi_{xx}(P) = \frac{2\varphi(E)}{\{hE(hE+hW)\}} + \frac{2\varphi(W)}{\{hW(hE+hW)\}} - \frac{2\varphi(P)}{(hE \cdot hW)} \quad (2.37a)$$

$$\varphi_{yy}(P) = \frac{2\varphi(N)}{\{hN(hN+hS)\}} + \frac{2\varphi(S)}{\{hS(hN+hS)\}} - \frac{2\varphi(P)}{(hN \cdot hS)} \quad (2.37b)$$

จากสมการ (2.37a) และ (2.37b) เราสามารถจะแก้สมการหาศักย์ไฟฟ้าที่จุด P ได้ โดยใช้ลักษณะสมบัติของการกระจายของสนามไฟฟ้าด้วยสมการลาปลาซหรือพัวซองสองมิติคือ

$$\nabla^2 \varphi = \varphi_{xx} + \varphi_{yy} = 0 \rightarrow \text{Laplacian}$$

$$\nabla^2 \varphi = \varphi_{xx} + \varphi_{yy} = -F(x,y) \rightarrow \text{Poisson}$$

เมื่อ $F(x,y) = \rho/\epsilon$ สำหรับสนามไฟฟ้าสถิตย์ที่ซึ่งตัวกลางมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ และมีการกระจายของประจุ (Charge density) มีความเข้ม $\rho(x,y)$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.37a) และ (2.37b) ลงในสมการการกระจายของศักย์ไฟฟ้า จะได้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\frac{2\varphi(E)}{\{hE(hE+hW)\}} + \frac{2\varphi(W)}{\{hW(hE+hW)\}} - \frac{2\varphi(P)}{(hE \cdot hW)} + \frac{2\varphi(N)}{\{hN(hN+hS)\}} + \frac{2\varphi(S)}{\{hS(hN+hS)\}} - \frac{2\varphi(P)}{(hN \cdot hS)} = -F(P)$$

$$D_{EP}\varphi(E) + D_{WP}\varphi(W) + D_{NP}\varphi(N) + D_{SP}\varphi(S) + D_{PP}\varphi(P) + \frac{1}{2}F(P) = 0 \quad (2.38)$$

โดยที่

$$D_{EP} = \frac{1}{[hE(hE+hW)]} \quad ; \quad D_{WP} = \frac{1}{[hW(hE+hW)]}$$

$$D_{NP} = \frac{1}{[hN(hN+hS)]} \quad ; \quad D_{SP} = \frac{1}{[hS(hN+hS)]}$$

$$D_{PP} = -\left[\frac{1}{(hE \cdot hW)} + \frac{1}{(hN \cdot hS)} \right]$$

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่จุด P จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varphi(P) = \frac{\left[\varphi(E) \cdot D_{EP} + \varphi(W) \cdot D_{WP} + \varphi(N) \cdot D_{NP} + \varphi(S) \cdot D_{SP} + \frac{1}{2}F(P) \right]}{-D_{PP}} \quad (2.39)$$

แต่เพื่อง่ายต่อการคำนวณและความเข้าใจ ขณะทำการคำนวณควรแบ่งตาข่ายของพื้นที่ที่ต้องการคำนวณเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งผลจะทำให้

$$hE = hW = hN = hS = h$$

ดังนั้นสมการที่ (2.39) สามารถลดรูปลงได้ดังนี้

$$\varphi(E) + \varphi(W) + \varphi(N) + \varphi(S) - 4\varphi(P) + h^2 F(P) = 0 \quad (2.40)$$

$$\varphi(P) = \frac{1}{4} [\varphi(E) + \varphi(W) + \varphi(N) + \varphi(S) + h^2 F(P)] \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำหรืออิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่(2.41) จะเห็นได้ว่าสามารถหาค่าศักย์ที่จุด P ได้ถ้าทราบค่าศักย์ไฟฟ้าของจุดข้างเคียง ดังนั้นในการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าในพื้นที่ที่ต้องการจะสามารถทำได้โดยหาเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในบริเวณสนามไฟฟ้านั้นก่อนซึ่งจะอาศัยสมการที่ (2.39) ในการหาโดยการแบ่งพื้นที่ออกเป็นตาข่ายถ้าให้จุดตัดของสนามไฟฟ้าทั้งหมดมี n จุดจะสามารถสร้างสมการได้ n สมการโดยการเขียนสมการในรูปเมตริกได้ดังนี้

$$[D]\{\phi\} = \{d\} \quad (2.42)$$

โดยที่ $[D]$; เมตริกที่มีมิติ $n \times n$

$\{\phi\}$; potential vector ที่ไม่ทราบค่า

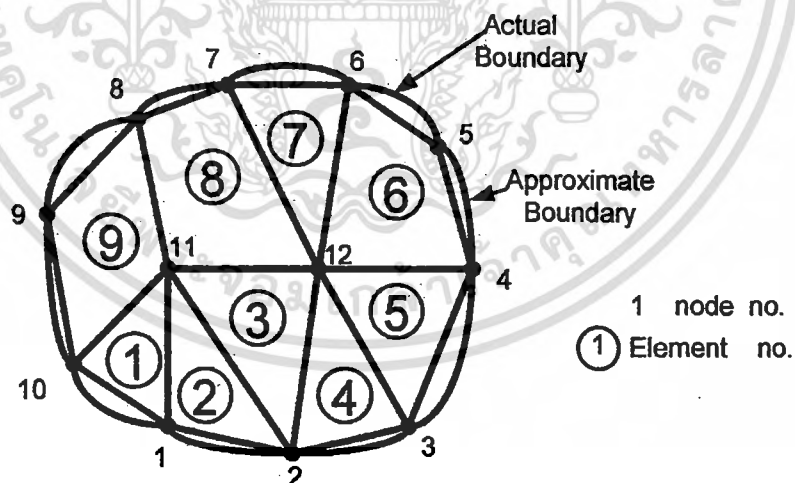
$\{d\}$; potential vector ของจุดตัดในเงื่อนไขขอบเขต

หลังจากแก้สมการที่(2.42) โดยวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ เช่น วิธี Gaussian elimination, Gauss-Jordan ผลลัพธ์จากการแก้สมการคือศักย์ไฟฟ้าที่จุดตัดในสนามไฟฟ้า

2.3.2 วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM)

2.3.2.1 การแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นเอลิเมนต์

ทำการแบ่งบริเวณของปัญหาที่พิจารณาออกเป็นส่วนย่อยหรือเอลิเมนต์ที่รูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย

ในรูปที่ 2.7 บริเวณของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นอิลิเมนต์ 9 ชั้นซึ่งไม่ซ้อนทับกัน (สามเหลี่ยม 6 ชั้นและสี่เหลี่ยม 3 ชั้น) และประกอบด้วย 12 โหนด เมื่อทำการหาค่าศักดาไฟฟ้าโดยประมาณภายในอิลิเมนต์ e คือ V_e แล้วทำการเชื่อมโยงการกระจายศักดาไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์หลายๆอิลิเมนต์จะทำให้ศักดาไฟฟ้ามีความต่อเนื่องภายในขอบเขตของอิลิเมนต์ (Inter element boundary) ค่าตอบโดยประมาณของบริเวณทั้งหมดของปัญหาที่พิจารณาคือ

$$V(x,y) = \sum_{e=1}^N V_e(x,y) \quad (2.43)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนอิลิเมนต์ที่บริเวณของปัญหาถูกทำการแบ่ง
รูปแบบทั่วไปที่ใช้ในการประมาณค่า V ภายในอิลิเมนต์ เป็นสมการการประมาณค่าแบบโพลิโนเมียล (Polynomial Approximation)

$$V_e(x,y) = a+bx+cy \quad (2.44)$$

สมการที่ 2.44 ใช้ในกรณีที่ เป็นอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

$$V_e(x,y) = a+bx+cy+dxy \quad (2.45)$$

สมการที่ 2.45 ใช้ในกรณีที่ เป็นอิลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม

ค่าศักดาไฟฟ้า โดยปกติแล้วภายในอิลิเมนต์จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ส่วนภายนอกจะเท่ากับศูนย์ โดยข้อเท็จจริงจะพบว่าอิลิเมนต์รูปที่นิยมใช้มากจะเป็นอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม เนื่องจากการปรับแต่งรูปร่างของอิลิเมนต์ให้เข้ากับขอบเขตของปัญหาทำได้ง่ายกว่าอิลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นในโครงการนี้จะใช้อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมในการพิจารณา สังเกตว่าการตั้งสมมติฐานให้ การแปรผันเชิงเส้น (Linear variation) ของภายในรูปสามเหลี่ยมเป็นดังสมการที่ 2.44 เหมือนกับเป็นการสมมติว่าสนามไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์เป็นแบบสม่ำเสมอจะได้สมการสนามไฟฟ้าเป็น

$$\vec{E}_e = -\nabla V_e = -(ba_x + ca_y) \quad (2.46)$$

2.3.2.2 การสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนต์

พิจารณาอิลิเมนต์พื้นฐานรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.8 ค่าศักจไฟฟ้า ณ โหนด 1, 2, 3 คือ V_{e1}, V_{e2}, V_{e3} ตามลำดับ จากสมการที่ 2.44 จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

ค่า a, b, c สามารถได้จาก

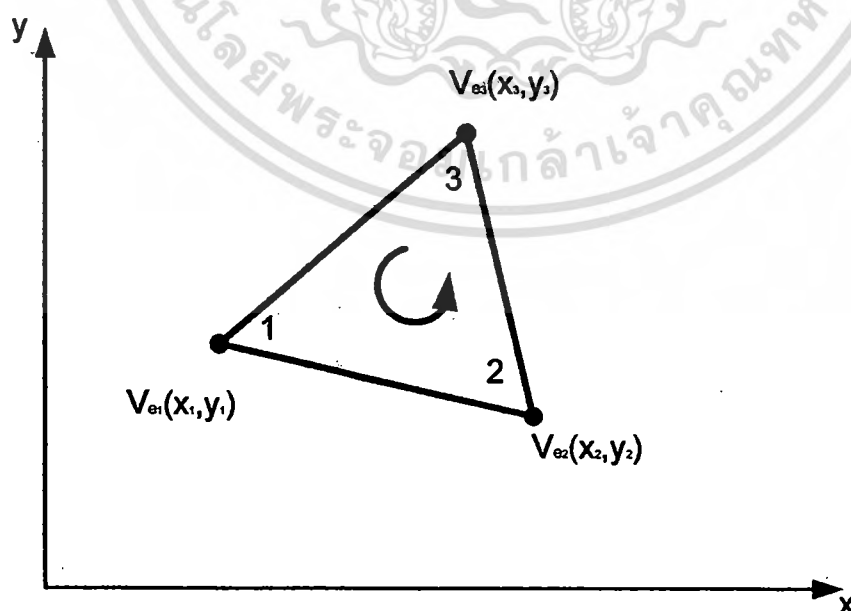
$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.44

$$V_e = [1 \quad x \quad y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้

$$V_e = [1 \quad x \quad y] \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2 y_3 - x_3 y_2) & (x_3 y_1 - x_1 y_3) & (x_1 y_2 - x_2 y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$



รูปที่ 2.8 อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม: การวางโนหนด 1-2-3 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (2.50a)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (2.50b)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (2.50c)$$

และ A เป็นพื้นที่ของอิลิเมนต์

$$2A = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)$$

หรือ

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (2.51)$$

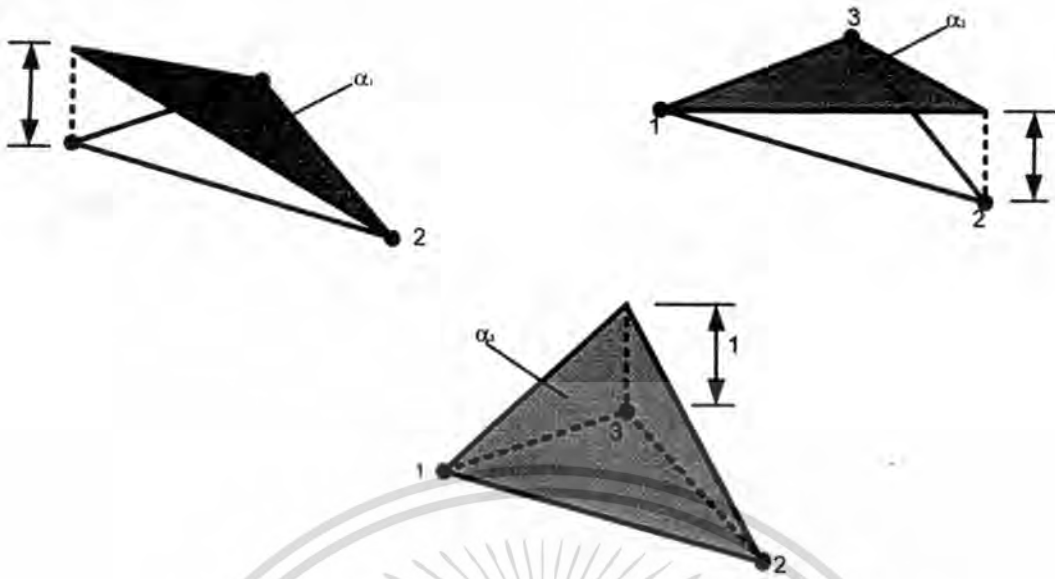
ค่าของ A จะเป็นบวกถ้าการรวมโหนดมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (เริ่มต้นจากโหนดใดก็ได้) ดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 2.8 สังเกตว่าสมการที่ 2.49 ให้ค่าศักดาไฟฟ้า ณ จุด (x, y) ใดๆ ภายในอิลิเมนต์ที่รู้ค่าศักดาไฟฟ้าที่มุมของมัน สิ่งนี้เองที่ต่างจาก วิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference method) เนื่องจากรู้ค่าเฉพาะตำแหน่ง x, y (grid point) เท่านั้น และข้อสังเกตอีกอย่างคือ ค่า α เป็นฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเชิงเส้นเรียกว่า อิลิเมนต์เซปฟังก์ชัน (element shape function) ซึ่งคุณสมบัติดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha_i(x_j, y_j) &= 1 && \text{เมื่อ } i = j \\ &= 0 && \text{เมื่อ } i \neq j \end{aligned} \quad (2.52a)$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (2.52b)$$

ตัวอย่างของฟังก์ชันรูปทรง แสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันรูปทรงและของอีลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

พลังงานต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่สัมพันธ์กับอีลิเมนต์ e คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |E_e|^2 dS = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 dS \tag{2.53}$$

เมื่อ สมมติให้บริเวณของปัญหาในลักษณะสองมิติที่พิจารณาไม่มีประจุอิสระ ($\rho_v = 0$) แต่ จากสมการที่ 2.49 พบว่า

$$\nabla V_e = \sum_{j=1}^3 V_{ej} \nabla \alpha_j \tag{2.54}$$

แทนสมการที่ 2.54 ลงในสมการที่ 2.53

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon V_{ei} [\int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dS] V_{ej} \tag{2.55}$$

ถ้านิยามให้

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dS \tag{2.56}$$

จะสามารถเขียนสมการที่ 2.55 ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V_e]^T [C^{(e)}] [V_e] \quad (2.57)$$

ซูบเปอร์สคริปต์ T คือการทรานสโพสดีเมตริกซ์และ

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.58a)$$

และ

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (2.58b)$$

เมตริกซ์ $[C^{(e)}]$ นี้จะเรียกว่า เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์ (Stiffness matrix) สมาชิกของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์อาจจะถูกพิจารณาเป็นการจับคู่ระหว่างโหนด i และ j โดยหาค่าได้จากสมการที่ (2.50) และ (2.56) ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} C_{12}^{(e)} &= \int \bar{N} \alpha_1 \bar{N} \alpha_2 dS \\ &= \frac{1}{4A^2} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \int dS \\ &= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \end{aligned} \quad (2.59a)$$

$$C_{13}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)] \quad (2.59b)$$

$$C_{23}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)] \quad (2.59c)$$

$$C_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2] \quad (2.59d)$$

$$C_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2] \quad (2.59e)$$

$$C_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] \quad (2.59f)$$

และ

$$C_{21}^{(e)} = C_{12}^{(e)}, C_{31}^{(e)} = C_{13}^{(e)}, C_{32}^{(e)} = C_{23}^{(e)} \quad (2.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 การรวมสมการของอีลิเมนต์ภายในของขอบเขตปัญหา

จากการเริ่มพิจารณาในอีลิเมนต์พื้นฐานดังกล่าวข้างต้น ขั้นตอนต่อไปคือการรวบรวมอีลิเมนต์เหล่านั้นกับปัญหาทั้งหมดที่พิจารณาในตอนเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่งพลังงานที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการรวมอีลิเมนต์ คือ

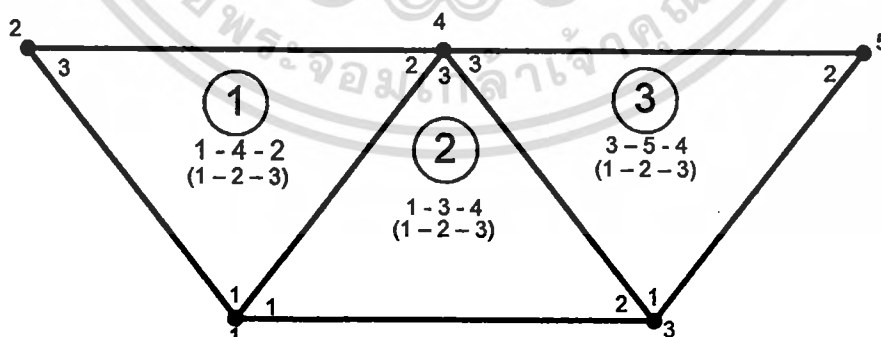
$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V]^T [C] [V] \quad (2.61)$$

เมื่อ

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

n เป็นจำนวนโหนด, N เป็นจำนวนอีลิเมนต์และ $[C]$ เรียกว่า เมตริกซ์สัมประสิทธิ์โอบอล (global coefficient matrix) เป็นการรวมของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์ย่อยๆ เข้าด้วยกัน

กระบวนการซึ่งเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์ (global coefficient matrix) แต่ละตัวถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้าง เมตริกซ์สัมประสิทธิ์โอบอล นั้นจะแสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 2.10 พิจารณา โครงข่ายไฟไนต์อีลิเมนต์ซึ่งประกอบด้วยอีลิเมนต์ 3 ชิ้นดังรูปตัวเลขโหนด 1,2,3,4 และ 5 เป็นโอบอลโหนดและโหนด $i-j-k$ เรียกว่า โลกอลโหนด ซึ่งก็คือโหนด 1-2-3 ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.10 การรวม 3 อีลิเมนต์เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$i-j-k$ เป็นการระบุโหนดโลคอล (local numbering) ซึ่งคือ 1-2-3 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ในอีลิเมนต์ที่ 3 การนับแบบโลคอล (local numbering) จะลำดับ โดยเริ่มจากโหนดใดๆ ของอีลิเมนต์แล้วนับทวนเข็มนาฬิกา สำหรับอีลิเมนต์ที่ 3 สามารถเลือก 4-3-5 แทน 3-5-4 ก็ได้ ดังนั้นจะเห็นว่าลำดับตัวเลขไม่ได้มีลักษณะเดียว แต่มีข้อจำกัดว่าต้องเป็นการลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สมมติให้ใช้ตัวเลขดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะได้ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์โกลบอล (global coefficient matrix) จาก

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

ซึ่งจะได้เมตริกซ์ 5×5 เนื่องจากรูปที่ 2.10 มีโหนดทั้งหมด 5 โหนด ($n=5$) เนื่องจากดังกล่าวมาแล้วว่า C_{ij} เป็นการจับคู่ระหว่างโหนด i และโหนด j ค่าของ C_{ij} สามารถหาได้เนื่องจากข้อเท็จจริงที่ว่า การกระจายของศักดาไฟฟ้าต้องต่อเนื่องตลอด (inter element boundary) องค์ประกอบที่ตำแหน่ง i, j ใดๆ ใน $[C]$ มาจากทุกๆ อีลิเมนต์ที่มีโหนด i, j ตัวอย่างในรูปที่ 2.10 อีลิเมนต์ในรูปที่ 2.10 อีลิเมนต์ที่ 1 และ 2 มีโหนดที่ร่วมกันอยู่คือโหนด 1 ดังนั้น

$$C_{11} = C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} \quad (2.64a)$$

ส่วนโหนด 2 เป็นของอีลิเมนต์ 1 เท่านั้น

$$C_{22} = C_{33}^{(1)} \quad (2.64b)$$

โหนด 4 ประกอบใหม่ด้วยอีลิเมนต์ 1,2,3 ดังนั้น

$$C_{44} = C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} \quad (2.64c)$$

โหนด 1 และ 4 เป็นอีลิเมนต์ 1 และ 2 พร้อมๆกัน

$$C_{14} = C_{41} = C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} \quad (2.64d)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่มีการจับคู่(หรือต่อถึงกันโดยตรง)ระหว่างโหนด 2 และ 3

$$C_{23} = C_{32} = 0 \quad (2.64e)$$

ทำเช่นนี้ต่อเนื่องกันไปจะได้เทอมต่างๆในเมตริกสัมประสิทธิ์โกลบอล (Global coefficient matrix) จากรูปที่ 2.11 คือ

$$\begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} & C_{11}^{(3)} & C_{12}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & C_{32}^{(1)} & 0 \\ C_{21}^{(2)} & 0 & C_{22}^{(2)} + C_{11}^{(3)} & C_{23}^{(2)} + C_{13}^{(3)} & C_{12}^{(3)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{31}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{32}^{(2)} + C_{31}^{(3)} & C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} & C_{32}^{(3)} \\ 0 & 0 & C_{21}^{(3)} & C_{23}^{(3)} & C_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

สังเกตว่า เมตริกสัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์ (Element coefficient matrix) มีการทับซ้อน โหนดที่เชื่อมต่อกับอีลิเมนต์และในเมตริกสัมประสิทธิ์โกลบอล (global coefficient matrix) $[C]$ มี 27 เทอม (ทุกๆ 3 อีลิเมนต์จะประกอบด้วย 9 เทอม) และมีคุณสมบัติของ $[C]$ มีดังต่อไปนี้

- 1) จะเป็นเมตริกสมมาตร $C_{ij} = C_{ji}$ เหมือน เมตริกสัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์ (element coefficient matrix)
- 2) เมื่อ $C_{ij} = 0$ ถ้าไม่มีการจับคู่กันของโหนด i และ j เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ากรณีที่อีลิเมนต์จำนวนใดๆ $[C]$ จะเบาบางลงเนื่องจากเทอมที่เป็นศูนย์มากขึ้น
- 3) เป็นซิงกูลาร์เมตริก (singular matrix ;detc=0)

2.3.2.4 การแก้สมการเพื่อหาผลลัพธ์

สมการลาปลาซ(หรือพัลส์ซอง) จะสามารถหาคำตอบที่สอดคล้องได้เมื่อพลังงานรวมที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหาที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุดด้วยเหตุนี้ เมื่อเราทำการพาร์เชียลเดริเวทีฟ (partial derivatives) ค่าพลังงาน W เทียบกับค่าต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทุกๆโหนดจะได้ว่า

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = \frac{\partial W}{\partial V_2} = \dots = \frac{\partial W}{\partial V_n} = 0$$

หรือ

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0, \quad \text{เมื่อ } k = 1, 2, \dots, n \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่นจากตัวอย่างในรูปที่ 2.10 การทำให้ $\frac{\partial W}{\partial V_1} = 0$ จะแทนสมการที่ 2.63 ลงในสมการที่ 2.61 แล้วทำการ partial derivative W เทียบกับ V_1 พบว่า

$$0 = \frac{\partial W}{\partial V_1} = 2V_1C_{11} + V_2C_{12} + V_3C_{13} + V_4C_{14} + V_5C_{15} + V_2C_{21} + V_3C_{31} + V_4C_{41} + V_5C_{51}$$

หรือ

$$0 = V_1C_{11} + V_2C_{12} + V_3C_{13} + V_4C_{14} + V_5C_{15} \quad (2.67)$$

โดยทั่วไปแล้ว $\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0$ นำไปสู่

$$0 = \sum_{i=1}^n V_i C_{ik} \quad (2.68)$$

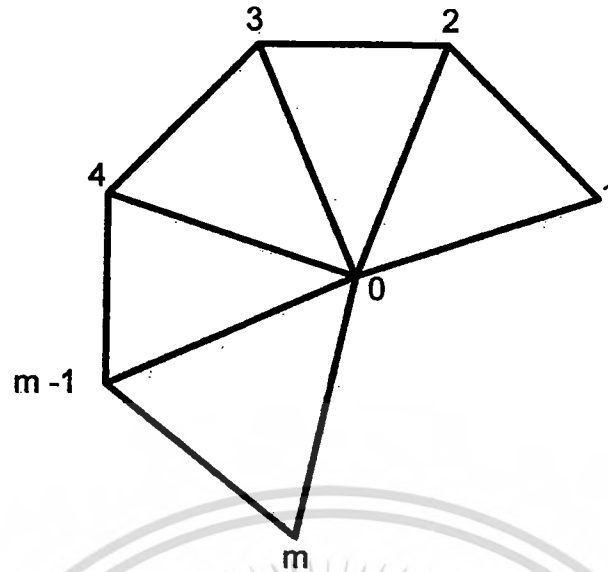
เมื่อ n เป็นจำนวนโหนดภายใน โครงข่าย (mesh) สมการที่ 2.68 เป็นสมการสำหรับทุกๆ โหนด $k=1, 2, \dots, n$ เราจะได้เซตของสมการที่เป็นคำตอบของปัญหาสามารถหาค่าของ $[V]^T = [V_1, V_2, \dots, V_n]$ ได้ มีวิธี 2 วิธีเหมือนกับที่ใช้ในการแก้ปัญหของสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Equation) ได้จากสมการลาปลาซ (หรือพัวส์ซอง) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

A) Iteration Method : สมมติโหนด 0 ต่อเชื่อมกับโหนด m โหนดดังแสดงในรูปที่ 2.11 ใช้แนวคิดจากสมการที่ 2.66

$$0 = V_0C_{00} + V_1C_{01} + V_2C_{02} + \dots + V_mC_{0m}$$

หรือ

$$V_0 = \frac{-1}{C_{00}} \sum_{k=1}^m V_k C_{ok} \quad (2.69)$$



รูปที่ 2.11 โหนด 0 ที่ต่อกับโหนดอื่นๆจำนวน m โหนด

ดังนั้นถ้ารู้ค่าศักดาไฟฟ้าที่โหนดที่ต่อกับโหนด 0 จะสามารถหาค่า V_0 ได้ด้วยสมการที่ 2.69 กระบวนการซ้ำ เริ่มต้นโดยการตั้งค่าศักดาไฟฟ้าที่ Free Node (ตำแหน่งที่ไม่รู้ค่าศักดาไฟฟ้า) ให้เท่ากับ 0 หรือเท่ากับค่าเฉลี่ยของศักดาไฟฟ้า

$$V_{ave} = \frac{1}{2}(V_{min} + V_{max}) \quad (2.70)$$

เมื่อ V_{min} และ V_{max} เป็นค่าศักดาไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดที่ Fixed Node (ตำแหน่งที่ไม่รู้จักค่าศักดาไฟฟ้า) ตามลำดับ ด้วยค่าเริ่มต้นเหล่านี้เอง ค่าศักดาไฟฟ้าที่ Free node จะถูกคำนวณโดยสมการที่ 2.69 เมื่อจบการทำซ้ำครั้งแรกเมื่อค่าใหม่จะถูกคำนวณออกมาเพื่อหาทุกๆ Free node ค่าในตอนแรกจะกลายเป็นค่าเก่าสำหรับการทำซ้ำ มีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

B) Band Matrix Method: ถ้า Free node ทั้งหมดถูกนับเป็นอันดับแรกแล้วจึงทำการนับ Fixed node สมการที่ 2.61 สามารถเขียนเป็น

$$W = \frac{1}{2} \epsilon [V_f V_p \begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fp} \\ C_{pf} & C_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

เมื่อ f และ p คือ free node และ fixed node ตามลำดับ V_p เป็นค่าคงที่ (ศักดาไฟฟ้าที่รู้ค่า) จะทำการดิฟโดยเทียบกับ V_f เท่านั้น จากสมการที่ 2.66 ถึง 2.71 จะได้ว่า

$$[C_{ff} \quad C_{fp} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix}] = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ
$$[C_{ff}][V_f] = -[C_{fp}][V_p] \quad (2.72)$$

สมการที่ 2.72 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$[A][V] = [B] \quad (2.73a)$$

หรือ

$$[V] = [A]^{-1}[B] \quad (2.73b)$$

เมื่อ $[V] = [V_f]$, $[A] = [C_{ff}]$, $[B] = -[C_{fp}][V_p]$ เมื่อ $[A]$ เป็นนอชิงกูลาร์เมตริกซ์ สักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่งของโหนดที่รู้ค่าศักดาไฟฟ้า สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2.73a สามารถหาได้โดยใช้ Gaussian elimination นอกจากนี้ $[V]$ ในสมการที่ 2.73b ยังสามารถหาได้จากการใช้อินเวอร์สเมตริกซ์ถ้าขนาดเมตริกซ์ที่จะทำการอินเวอร์สไม่ใหญ่เกินไป

สังเกตว่าตั้งแต่สมการที่ 2.53 เป็นต้นมาคำตอบจำกัดใช้กับปัญหาสองมิติที่เกี่ยวข้องกับลาปลาซ $\nabla^2 V = 0$ แนวคิดพื้นฐานที่นี้สามารถนำไปสู่การใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสมการพัวส์ซอง ($\nabla^2 V = -\rho_v / \epsilon$, $\nabla^2 A = -\mu J$) หรือสมการของคลื่น ($\nabla^2 \phi - \gamma^2 \phi = 0$)

2.3.2.5 การกระจายแบบโพลิโนเมียล (Polynomial Expansion)

ในการหาค่าคำตอบโดยประมาณของปัญหาในระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ นิยมใช้การกำหนดให้อยู่ในรูปการกระจายแบบโพลิโนเมียล เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถให้ค่าจำกัดความเกี่ยวกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่ซับซ้อนทางกายภาพ และในขณะเดียวกันเหมาะสำหรับการใช้งานกับฟังก์ชันที่เป็นการอนุพันธ์ และหาผลรวมในกรณีที่ทำให้การพิจารณาในเชิง 2 มิติการกระจายของสมการโพลิโนเมียลอันดับที่ m ของตัวแปร ϕ ที่ต้องการรู้ค่าคือ

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \alpha_6 y^2 + \dots + \alpha_n y^m$$

และ

$$\vec{E} = -\nabla V$$

แทนที่สมการ 2.74 จะได้สมการของพัลส์ของสำหรับตัวกลางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่เป็นเอกพันธ์ (nonhomogeneous) คือ

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = \rho_v \quad (2.75)$$

ถ้าตัวกลางเป็นเนื้อเดียวกัน หรือเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) สมการที่ 2.75 จะเปลี่ยนเป็น

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.76)$$

เมื่อ $\rho_v = 0$ (สำหรับบริเวณที่ไม่มีประจุ) สมการที่ 2.76 จะกลายเป็นสมการของลาปลาซคือ

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.77)$$

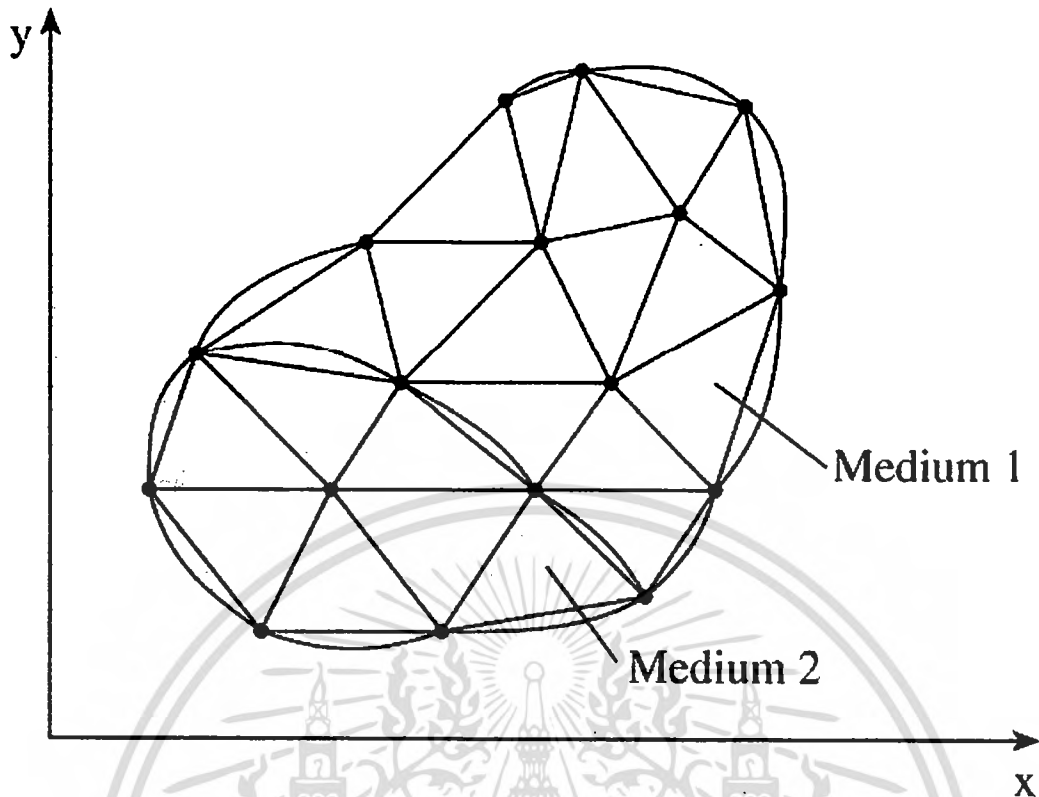
ในระบบคาร์ทีเซียนสามารถเขียนในรูปของตัวดำเนินการลาปลาซ ∇^2 ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.78)$$

จากสมการที่ 2.76 นำมาเขียนสมการพัลส์ของได้โดยแทนที่ด้านขวาของสมการเป็น $-\frac{\rho_v}{\epsilon}$

2.3.2. 7 ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน (ϵ)

ในการพิจารณาขอบเขตปัญหาที่สนใจนั้น ได้ทำการสมมติให้ปัญหาเป็นลักษณะเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Solution Region) ดังนั้นค่า ϵ จึงมีค่าคงที่ ส่วนกรณีที่มีปัญหาไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน (Nonhomogeneous Solution Region) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จำเป็นที่จะต้องทำการแบ่งส่วนเพื่อพิจารณา



รูปที่ 2.12 การแบ่งส่วนของปัญหาที่ไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน

การแบ่งส่วน (discretization) จะแบ่งพิจารณาไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element) ของแต่ละส่วนที่เป็นปัญหาเนื้อเดียวกันในกรณีนี้ สมการที่ 2.53 ยังคงใช้อยู่คือ

$$W_E = \frac{1}{2} \int \epsilon |\vec{E}|^2 ds = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 ds \quad (2.79)$$

ถ้า $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

สมการที่ 2.61 จะเปลี่ยนเป็น

$$W = \sum_{e=1}^N \frac{1}{2} \epsilon_0 [V_e]^T [C] [V] \quad (2.80)$$

และคุณสมบัติที่ 2.56 ด้วย ϵ_r คือ

$$C_{ij}^e = \epsilon_r \int \nabla \alpha_1 \nabla \alpha_2 ds \quad (2.81)$$

ส่วนขั้นตอนอื่นๆของการแก้ปัญหา ยังคงเหมือนเดิม

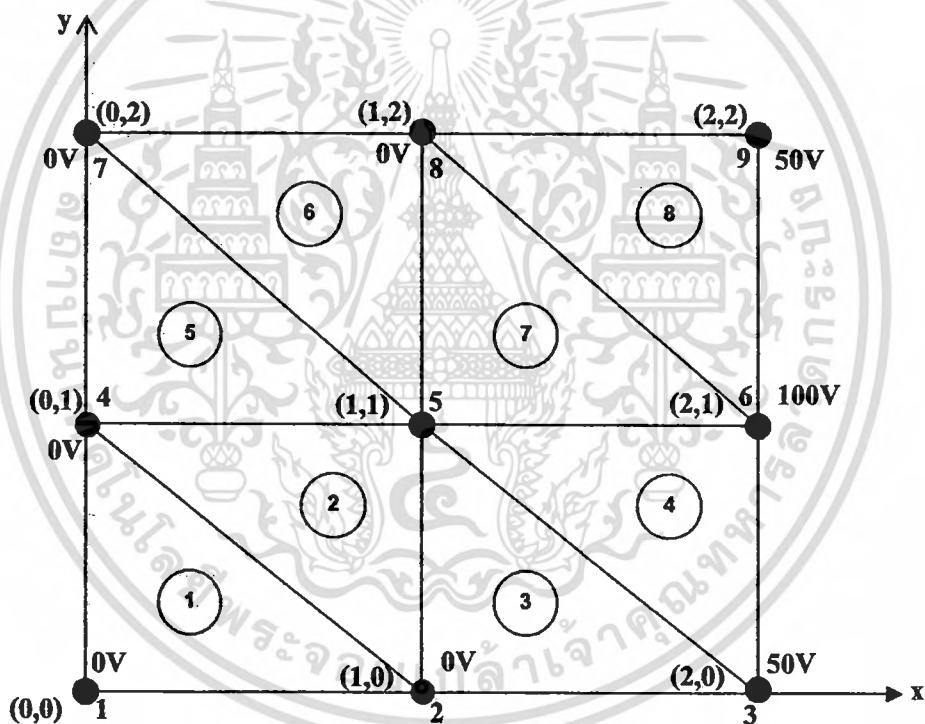
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กรณีศึกษาไฟไนต์อิลิเมนต์ (finite element) กับปัญหาด้าน Electrostatic field

2.4.1 ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วยเทคนิคไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยใช้วิธีการคำนวณ

ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยใช้วิธีการคำนวณนี้จะมีตัวอย่างด้วยกันทั้งหมด 3 ตัวอย่างด้วยกันคือ กรณีแบบ 9 โหนด กรณีแบบ 16 โหนด และกรณีแบบสมมาตร กรณีที่หนึ่งคือกรณีแบบ 9 โหนดนี้จะแสดงโดยละเอียดทุกขั้นตอนส่วนกรณีแบบ 16 โหนด จะไม่ได้แสดงโดยละเอียดก็เพราะการคำนวณต่างๆ เหมือนกับแบบ 9 โหนดทุกอย่างจะต่างก็เพียงจำนวนโหนดเท่านั้น และวิธีการแบบสมมาตรจะมีวิธีการคิดที่แตกต่างออกไปจากแบบ 9 โหนด และ 16 โหนด ซึ่งจะได้เห็นในตัวอย่างการคำนวณที่จะได้แสดงต่อไปจากนี้โดยกำหนดรูปร่างและขอบเขตของปัญหาดังรูปที่ 2.13

วิธีการและขั้นตอนคำนวณด้วยมือ กรณีแบบ 9 โหนด



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการแก้ปัญหาแบบ 9 โหนด 8 อิลิเมนต์

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$$

$$C_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2]$$

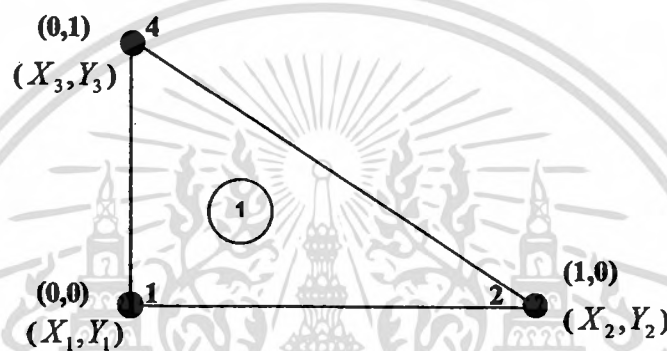
$$C_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2]$$

$$C_{12}^{(e)} = C_{21}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)]$$

$$C_{13}^{(e)} = C_{31}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)]$$

$$C_{23}^{(e)} = C_{32}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)]$$

อีลิเมนต์ที่ 1



รูปที่ 2.14 อีลิเมนต์ที่ 1 จากจำนวน 8 อีลิเมนต์

$$C_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(0-1)^2 + (0-1)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(1-0)^2 + (0-0)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(0-0)^2 + (1-0)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(e)} = C_{21}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(0-1)(1-0) + (0-1)(0-0)] = -\frac{1}{4A}$$

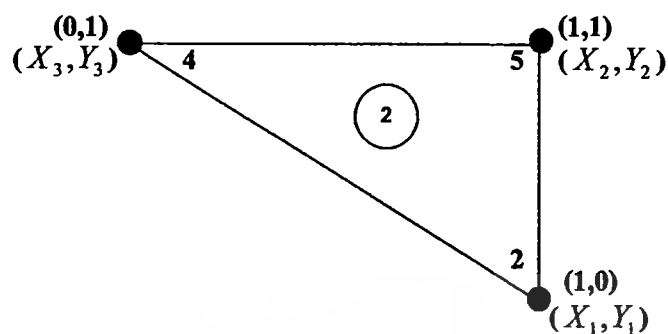
$$C_{13}^{(e)} = C_{31}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(0-1)(0-0) + (0-1)(1-0)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C_{23}^{(e)} = C_{32}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(1-0)(0-0) + (0-0)(1-0)] = 0$$

$$C^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & 0 & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีลิเมนต์ที่ 2



รูปที่ 2.15 อีลิเมนต์ที่ 2 จากจำนวน 8 อีลิเมนต์

$$C_{11}^{(2)} = \frac{1}{4A} [(1-1)^2 + (0-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{22}^{(2)} = \frac{1}{4A} [(1-0)^2 + (1-0)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{33}^{(2)} = \frac{1}{4A} [(0-1)^2 + (1-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(2)} = C_{21}^{(2)} = \frac{1}{4A} [(1-1)(1-0) + (0-1)(1-0)] = -\frac{1}{4A}$$

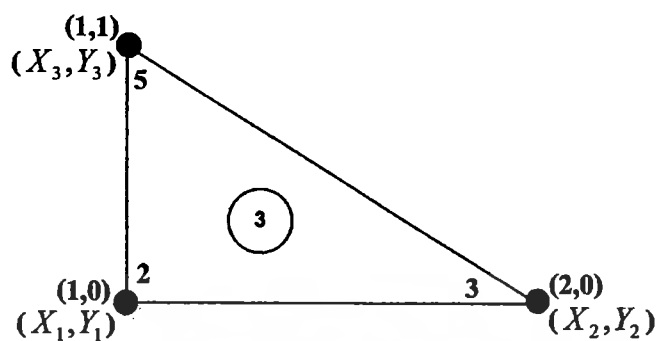
$$C_{13}^{(2)} = C_{31}^{(2)} = \frac{1}{4A} [(1-1)(0-1) + (0-1)(1-1)] = 0$$

$$C_{23}^{(2)} = C_{32}^{(2)} = \frac{1}{4A} [(1-0)(0-1) + (1-0)(1-1)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C^{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} \\ 0 & -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีลิเมนต์ที่ 3



รูปที่ 2.16 อีลิเมนต์ที่ 3 จากจำนวน 8 อีลิเมนต์

$$C_{11}^{(3)} = \frac{1}{4A} [(0-1)^2 + (1-2)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{22}^{(3)} = \frac{1}{4A} [(1-0)^2 + (1-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{33}^{(3)} = \frac{1}{4A} [(0-0)^2 + (2-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(3)} = C_{21}^{(3)} = \frac{1}{4A} [(0-1)(1-0) + (1-2)(1-1)] = -\frac{1}{4A}$$

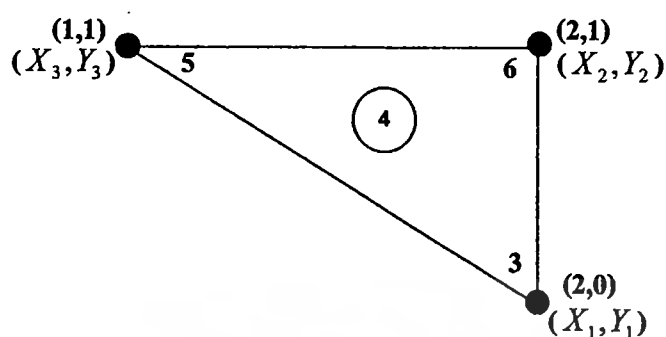
$$C_{13}^{(3)} = C_{31}^{(3)} = \frac{1}{4A} [(0-1)(0-0) + (1-2)(2-1)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C_{23}^{(3)} = C_{32}^{(3)} = \frac{1}{4A} [(1-0)(0-0) + (1-1)(2-1)] = 0$$

$$C^{(3)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & 0 & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิเมนต์ที่ 4



รูปที่ 2.17 อิทธิเมนต์ที่ 4 จากจำนวน 8 อิทธิเมนต์

$$C_{11}^{(4)} = \frac{1}{4A} [(1-1)^2 + (1-2)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{22}^{(4)} = \frac{1}{4A} [(1-0)^2 + (2-1)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{33}^{(4)} = \frac{1}{4A} [(0-1)^2 + (2-2)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(4)} = C_{21}^{(4)} = \frac{1}{4A} [(1-1)(1-0) + (1-2)(2-1)] = -\frac{1}{4A}$$

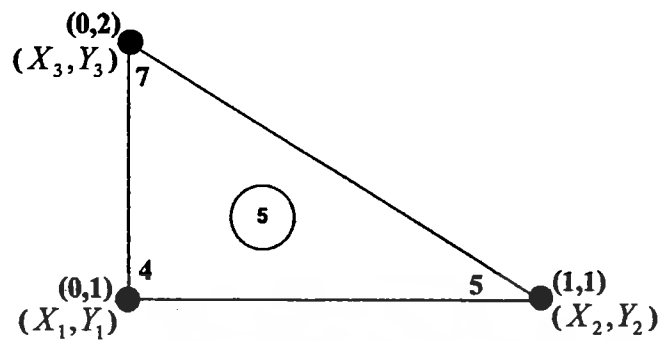
$$C_{13}^{(4)} = C_{31}^{(4)} = \frac{1}{4A} [(1-1)(0-1) + (1-2)(2-2)] = 0$$

$$C_{23}^{(4)} = C_{32}^{(4)} = \frac{1}{4A} [(1-0)(0-1) + (2-1)(2-2)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C^{(4)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} \\ 0 & -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิลิเมนต์ที่ 5



รูปที่ 2.18 อิลิเมนต์ที่ 5 จากจำนวน 8 อิลิเมนต์

$$C_{11}^{(5)} = \frac{1}{4A} [(1-2)^2 + (0-1)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{22}^{(5)} = \frac{1}{4A} [(2-1)^2 + (0-0)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{33}^{(5)} = \frac{1}{4A} [(1-1)^2 + (1-0)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(5)} = C_{21}^{(5)} = \frac{1}{4A} [(1-2)(2-1) + (0-1)(0-0)] = -\frac{1}{4A}$$

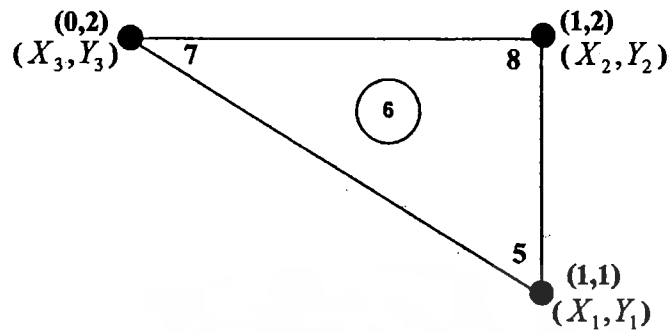
$$C_{13}^{(5)} = C_{31}^{(5)} = \frac{1}{4A} [(1-2)(1-1) + (0-1)(1-0)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C_{23}^{(5)} = C_{32}^{(5)} = \frac{1}{4A} [(2-1)(1-1) + (0-0)(1-0)] = 0$$

$$C^{(5)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & 0 & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีลิเมนต์ที่ 6



รูปที่ 2.19 อีลิเมนต์ที่ 6 จากจำนวน 8 อีลิเมนต์

$$C_{11}^{(6)} = \frac{1}{4A} [(2-2)^2 + (0-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{22}^{(6)} = \frac{1}{4A} [(2-1)^2 + (1-0)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{33}^{(6)} = \frac{1}{4A} [(1-2)^2 + (1-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(6)} = C_{21}^{(6)} = \frac{1}{4A} [(2-2)(2-1) + (0-1)(1-0)] = -\frac{1}{4A}$$

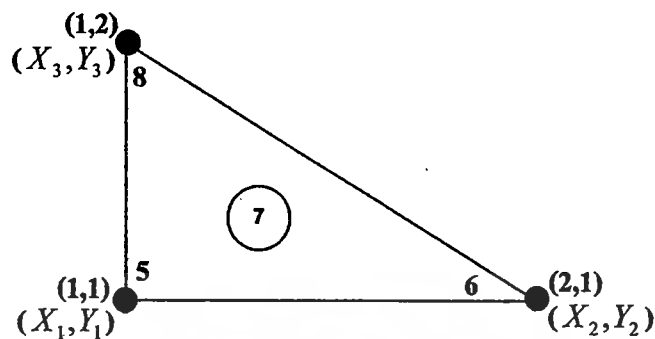
$$C_{13}^{(6)} = C_{31}^{(6)} = \frac{1}{4A} [(2-2)(1-2) + (0-1)(1-1)] = 0$$

$$C_{23}^{(6)} = C_{32}^{(6)} = \frac{1}{4A} [(2-1)(1-2) + (1-0)(1-1)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C^{(6)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} \\ 0 & -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีลิเมนต์ที่ 7



รูปที่ 2.20 อีลิเมนต์ที่ 7 จากจำนวน 8 อีลิเมนต์

$$C_{11}^{(7)} = \frac{1}{4A} [(1-2)^2 + (1-2)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{22}^{(7)} = \frac{1}{4A} [(2-1)^2 + (1-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{33}^{(7)} = \frac{1}{4A} [(1-1)^2 + (2-1)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(7)} = C_{21}^{(7)} = \frac{1}{4A} [(1-2)(1-1) + (1-2)(1-1)] = 0$$

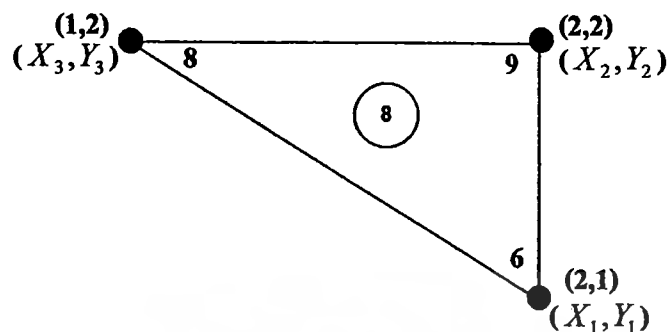
$$C_{13}^{(7)} = C_{31}^{(7)} = \frac{1}{4A} [(1-2)(1-1) + (1-2)(2-1)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C_{23}^{(7)} = C_{32}^{(7)} = \frac{1}{4A} [(2-1)(1-1) + (1-1)(2-1)] = 0$$

$$C^{(7)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2A} & 0 & -\frac{1}{4A} \\ 0 & \frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & 0 & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลที่ 8



รูปที่ 2.21 อิทธิพลที่ 8 จากจำนวน 8 อิทธิพล

$$C_{11}^{(8)} = \frac{1}{4A} [(2-2)^2 + (1-2)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{22}^{(8)} = \frac{1}{4A} [(2-1)^2 + (2-1)^2] = \frac{1}{2A}$$

$$C_{33}^{(8)} = \frac{1}{4A} [(1-2)^2 + (2-2)^2] = \frac{1}{4A}$$

$$C_{12}^{(8)} = C_{21}^{(8)} = \frac{1}{4A} [(2-2)(2-1) + (1-2)(2-1)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C_{13}^{(8)} = C_{31}^{(8)} = \frac{1}{4A} [(2-2)(1-2) + (1-2)(2-2)] = 0$$

$$C_{23}^{(8)} = C_{32}^{(8)} = \frac{1}{4A} [(2-1)(1-2) + (2-1)(2-2)] = -\frac{1}{4A}$$

$$C^{(8)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4A} & -\frac{1}{4A} & 0 \\ -\frac{1}{4A} & \frac{1}{2A} & -\frac{1}{4A} \\ 0 & -\frac{1}{4A} & \frac{1}{4A} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การรวมค่าแต่ละอิเลเมนต์เข้าด้วยกัน

$C_{11}^{(1)}$	$C_{12}^{(1)}$	$C_{13}^{(1)}$						
$C_{21}^{(1)}$	$C_{22}^{(1)} + C_{11}^{(2)} + C_{11}^{(3)}$	$C_{23}^{(1)} + C_{13}^{(2)}$	$C_{12}^{(3)}$					
	$C_{21}^{(3)}$	$C_{23}^{(3)} + C_{13}^{(4)}$	$C_{12}^{(4)}$					
$C_{31}^{(1)}$	$C_{32}^{(1)} + C_{31}^{(2)}$	$C_{33}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{11}^{(5)}$	$C_{32}^{(2)} + C_{12}^{(5)}$	$C_{13}^{(5)}$				
	$C_{21}^{(2)} + C_{31}^{(3)}$	$C_{22}^{(2)} + C_{33}^{(3)} + C_{33}^{(4)}$ $+ C_{22}^{(5)} + C_{11}^{(6)} + C_{11}^{(7)}$	$C_{32}^{(4)} + C_{12}^{(7)}$	$C_{23}^{(5)} + C_{13}^{(6)}$	$C_{12}^{(6)} + C_{13}^{(7)}$			
	$C_{21}^{(4)}$	$C_{23}^{(4)} + C_{21}^{(7)}$	$C_{22}^{(4)} + C_{22}^{(7)} + C_{11}^{(8)}$		$C_{23}^{(7)} + C_{13}^{(8)}$	$C_{12}^{(8)}$		
		$C_{31}^{(5)}$	$C_{32}^{(5)} + C_{31}^{(6)}$	$C_{33}^{(5)} + C_{33}^{(6)}$	$C_{32}^{(8)}$			
			$C_{21}^{(6)} + C_{31}^{(7)}$	$C_{23}^{(6)}$	$C_{22}^{(6)} + C_{33}^{(7)} + C_{33}^{(8)}$	$C_{32}^{(8)}$		
			$C_{21}^{(8)}$		$C_{23}^{(8)}$	$C_{22}^{(8)}$	$C_{33}^{(8)}$	$C_{32}^{(8)}$

ตารางที่ 2.2 ค่าที่ได้จากการรวมแต่ละอีลิเมนต์เข้าด้วยกันจากจำนวนทั้งหมด 8 อีลิเมนต์

$\frac{1}{2A}$	$-\frac{1}{4A}$		$-\frac{1}{4A}$					
$-\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$-\frac{1}{4A}$	$-\frac{1}{4A}$	$-\frac{1}{4A}$				
	$-\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{2A}$			$-\frac{1}{4A}$			
$-\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{A}$	$-\frac{1}{2A}$		$-\frac{1}{4A}$		
	$-\frac{1}{2A}$		$-\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$-\frac{1}{2A}$		$-\frac{1}{2A}$	
		$-\frac{1}{4A}$		$-\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$			$-\frac{1}{4A}$
			$-\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{2A}$	$-\frac{1}{4A}$	
				$-\frac{1}{2A}$		$-\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$-\frac{1}{4A}$
					$-\frac{1}{4A}$		$-\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{2A}$

เมื่อ

$$V1 = 0V, V2 = 0V, V3 = 50V, V4 = 0V, V5 = \text{ไม่ทราบค่า}, V6 = 100V, V7 = 0V, \\ V8 = 0V, V9 = 50V$$

ทำการแก้สมการ

$$\frac{2}{A}(V5) - \frac{1}{2A}(100) = 0$$

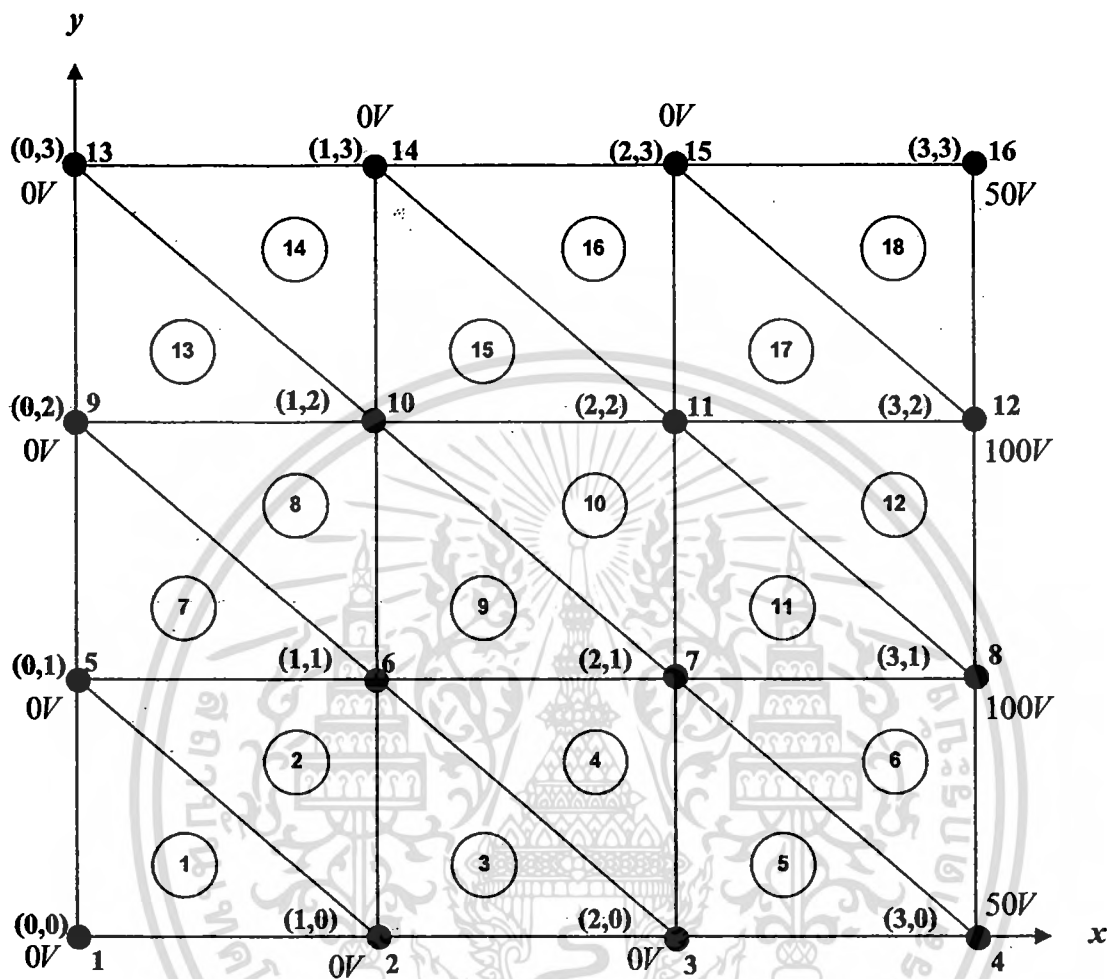
$$\frac{2}{A}(V5) = \frac{50}{A}$$

$$V5 = \left(\frac{50}{2}\right)\left(\frac{A}{A}\right)$$

$$V5 = 25V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการและขั้นตอนคำนวณด้วยมือ กรณีแบบ 16 โหนดกำหนดรูปร่างและขอบเขตของปัญหาดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการแก้ปัญหาแบบ 16 โหนด 18 อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าที่ได้จากการรวมแต่ละอิลิเมนต์เข้าด้วยกันจากจำนวนทั้งหมด 18 อิลิเมนต์

$\frac{1}{2A}$	$\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{4A}$														
$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{2A}$													
	$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$				$\frac{1}{2A}$											
		$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{2A}$					$\frac{1}{4A}$										
$\frac{1}{4A}$				$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{4A}$									
	$\frac{1}{2A}$			$\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$								
		$\frac{1}{2A}$			$\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$							
			$\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{2A}$	$\frac{1}{A}$					$\frac{1}{A}$						
				$\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{2A}$					$\frac{1}{4A}$					
					$\frac{1}{2A}$			$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$					$\frac{1}{2A}$				
						$\frac{1}{2A}$		$\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$						$\frac{1}{2A}$		
							$\frac{1}{4A}$			$\frac{1}{2A}$	$\frac{1}{A}$							$\frac{1}{A}$
								$\frac{1}{4A}$					$\frac{1}{2A}$	$\frac{1}{4A}$				
									$\frac{1}{2A}$					$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$		
										$\frac{1}{2A}$					$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$	
											$\frac{1}{4A}$					$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{2A}$	

เมื่อทำการแก้สมการ

$$V_1 = 50V, V_2 = 0V, V_3 = 0V, V_4 = 50V, V_5 = 0V, V_6 = \text{ไม่ทราบค่า}, V_7 = \text{ไม่ทราบค่า}, \\ V_8 = 100V, V_9 = 0V, V_{10} = \text{ไม่ทราบค่า}, V_{11} = \text{ไม่ทราบค่า}, V_{12} = 100V, V_{13} = 0V, \\ V_{14} = 0V, V_{15} = 0V, V_{16} = 50V$$

ทำการแก้สมการ

$$-\frac{1}{2A}(0) - \frac{1}{2A}(0) + \frac{2}{A}(V_6) - \frac{1}{2A}(V_7) - \frac{1}{2A}(V_{10}) = 0 \\ -\frac{1}{2A}(0) - \frac{1}{2A}(V_6) + \frac{2}{A}(V_7) - \frac{1}{2A}(100) - \frac{1}{2A}(V_{11}) = 0 \\ -\frac{1}{2A}(V_6) - \frac{1}{2A}(0) + \frac{2}{A}(V_{10}) - \frac{1}{2A}(V_{11}) - \frac{1}{2A}(0) = 0 \\ -\frac{1}{2A}(V_7) - \frac{1}{2A}(V_{10}) + \frac{2}{A}(V_{11}) - \frac{1}{2A}(100) - \frac{1}{2A}(0) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ค่า V ต่างๆดังนี้

$$V_6 = 12.5V$$

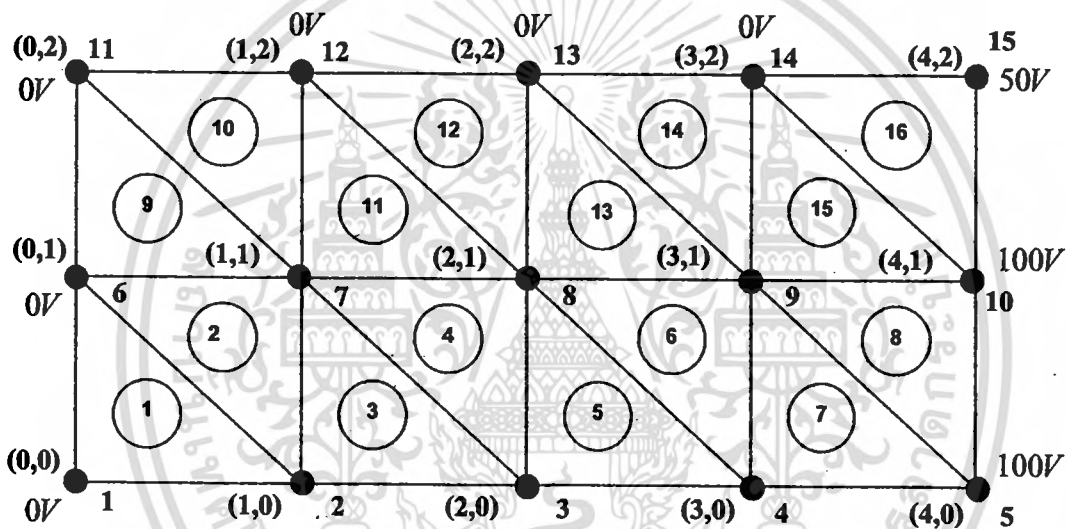
$$V_7 = 37.5V$$

$$V_{10} = 12.5V$$

$$V_{11} = 37.5V$$

วิธีการแบบสมมาตร

กรณีที่จะแก้ปัญหด้วยวิธีการแบบสมมาตรได้สามารถทำได้ทีพิจารณาสามารถแบ่งอิทธิเมนต์ออกมาแล้วต้องสมมาตรกัน ดังเช่นรูปจะทำการวิเคราะห์เพียงครึ่งเดียวของรูปที่ 2.22 โดยกำหนดรูปร่างและขอบเขตของปัญหาดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การแก้ปัญหด้วยวิธีการแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าที่ได้จากการรวมแต่ละอีลิเมนต์เข้าด้วยกัน

$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$				$\frac{1}{2A}$								
	$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$				$\frac{1}{2A}$							
		$\frac{1}{4A}$	$\frac{1}{A}$	$\frac{1}{4A}$				$\frac{1}{2A}$						
	$\frac{1}{2A}$					$\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$		
		$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$		
			$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$	$\frac{2}{A}$	$\frac{1}{2A}$				$\frac{1}{2A}$	

เมื่อ

$V1 = 0V, V2 = \text{ไม่ทราบค่า}, V3 = \text{ไม่ทราบค่า}, V4 = \text{ไม่ทราบค่า}, V5 = 100V, V6 = 0V,$
 $V7 = \text{ไม่ทราบค่า}, V8 = \text{ไม่ทราบค่า}, V9 = \text{ไม่ทราบค่า}, V10 = 100V, V11 = 0V,$
 $V12 = 0V, V13 = 0V, V14 = 0V, V15 = 50V$

ทำการแก้สมการ

$$\frac{1}{A}(V2) - \frac{1}{4A}(V3) - \frac{1}{2A}(V7) = 0$$

$$-\frac{1}{4A}(V2) + \frac{1}{A}(V3) - \frac{1}{4A}(V4) - \frac{1}{2A}(V8) = 0$$

$$-\frac{1}{4A}(V3) + \frac{1}{A}(V4) - \frac{1}{4A}(V5) - \frac{1}{2A}(V9) = 0$$

$$-\frac{1}{2A}(V2) + \frac{2}{A}(V7) - \frac{1}{2A}(V8) = 0$$

$$-\frac{1}{2A}(V3) - \frac{1}{2A}(V7) + \frac{2}{A}(V8) - \frac{1}{2A}(V9) = 0$$

$$-\frac{1}{2A}(V4) - \frac{1}{2A}(V8) + \frac{2}{A}(V9) - \frac{1}{2A}(V10) = 0$$

ได้ค่า V ต่างๆออกมาดังนี้

$$V2 = 9.8V$$

$$V3 = 25V$$

$$V4 = 52.6V$$

$$V7 = 7.1V$$

$$V8 = 18.7V$$

$$V9 = 42.8V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วยเทคนิคไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ [2]

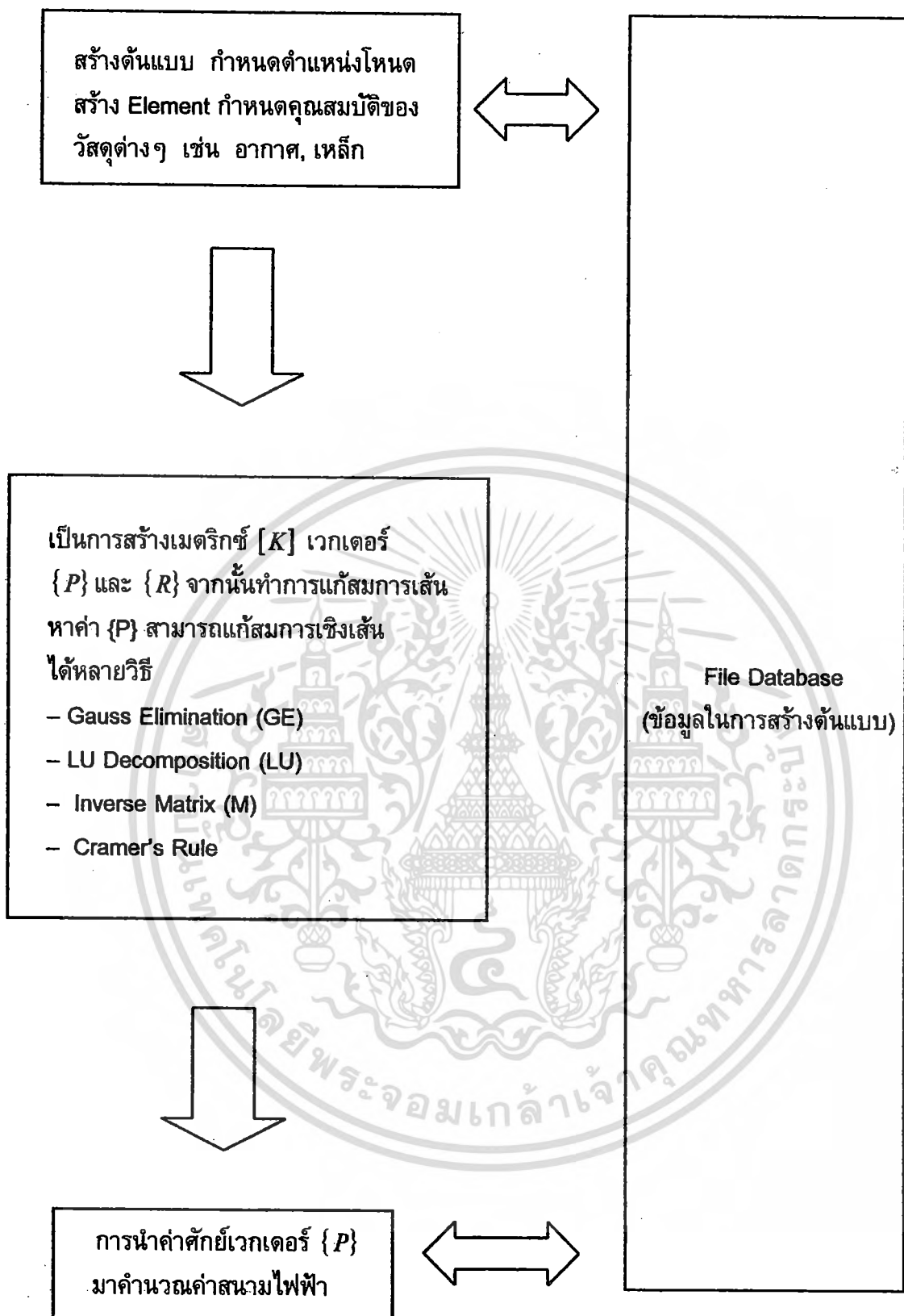
การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยเทคนิคไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นเป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) สามารถสรุปขั้นตอนเบื้องต้นได้ดังนี้ เริ่มต้นจากการมีต้นแบบรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ ทำการกำหนดขอบเขตที่ต้องการพิจารณา จากนั้นทำการแบ่งขอบเขตนั้นออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า อีลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีลักษณะเป็นอีลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (First order Triangular Element) ประกอบด้วยโหนด (Node) 3 โหนด อีลิเมนต์แบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะสามารถใช้กับขอบเขตที่มีรูปร่างต่างๆ ได้สะดวกและง่ายต่อการสร้างโปรแกรมการคำนวณ ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดค่าฟังก์ชันที่อยู่ในเทอมตัวแปรของสมการที่พิจารณาลงบนโหนดต่างๆ และทำการคำนวณหาค่าตัวแปรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมตามต้องการ โดยทั่วไปแล้ววิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถแสดงในรูปสมการ

$$[K] \{P\} = \{R\}$$

$[K]$ เป็นเมตริกซ์ $n \times n$ ของฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function) ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดทั้งหมด (n) ภายในขอบเขตที่พิจารณา

$\{P\}$ เป็นค่าศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) ของตัวแปร

$\{R\}$ เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันกระตุ้นที่กำหนดขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ขั้นตอนวิธีการคำนวณ สามารถอธิบายดังรูปที่ 2.24

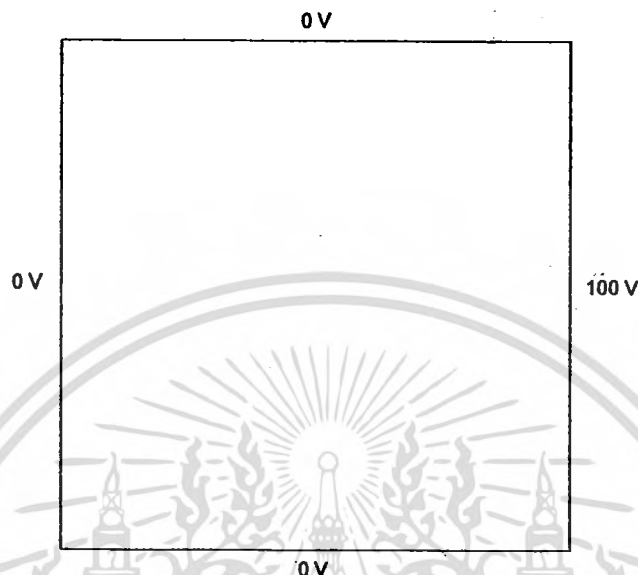


รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

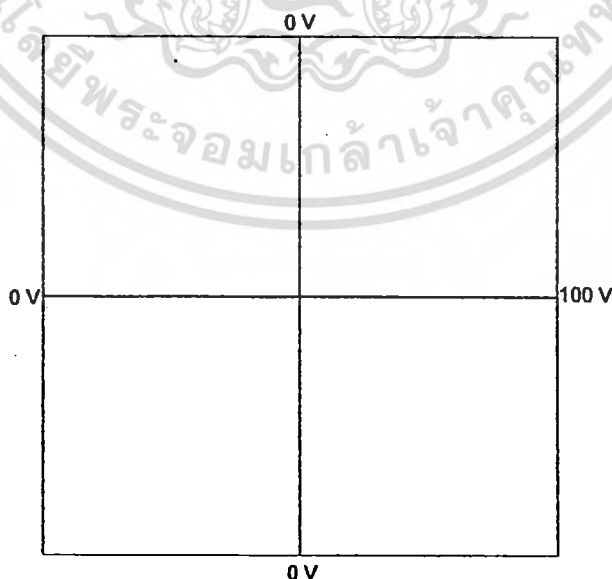
จากโจทย์ตัวอย่าง 2.4.1 เมื่อทำการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีวิธีการทำดังนี้โดยแสดงวิธีการทำดังรูปที่ 2.25 – 2.29

1) วาดรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ตามแบบจริง



รูปที่ 2.25 รูปร่างของปัญหา

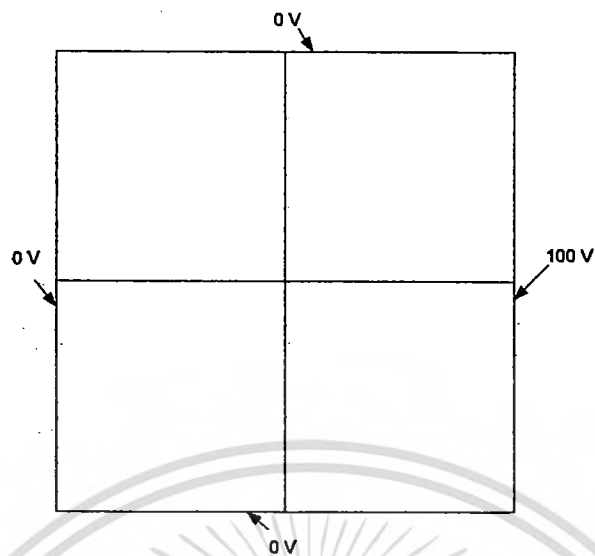
2) แบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วน (สำหรับข้อนี้ในการวิเคราะห์ปัญหาทั่วไปไม่จำเป็นต้องทำ แต่ในรายงานฉบับนี้ทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วนเพื่อใช้กำหนดจุดเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์)



รูปที่ 2.26 แบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วน

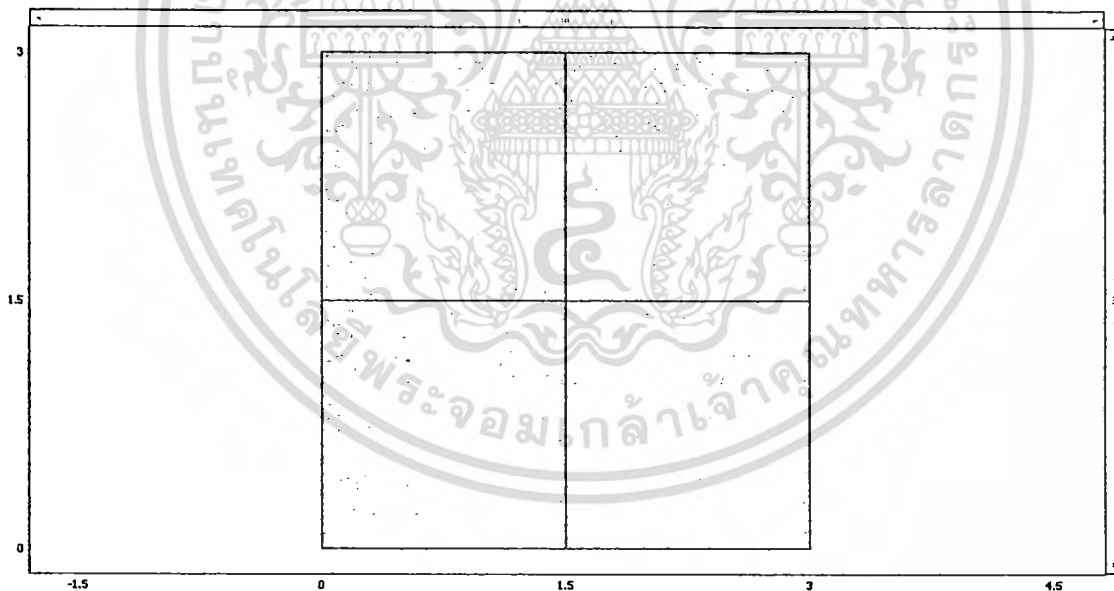
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงไป



รูปที่ 2.27 การกำหนดขอบเขตของแรงดันก่อนคำนวณด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์โปรแกรม

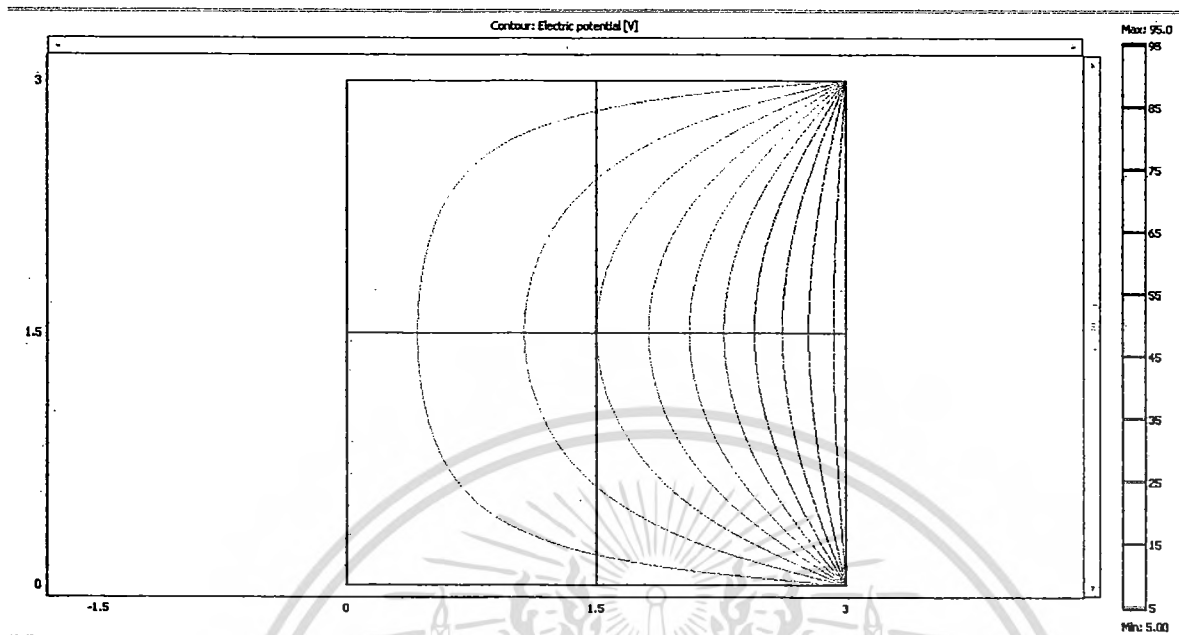
4) กำหนดลักษณะของอิลิเมนต์ย่อยเพื่อใช้สำหรับการคำนวณ



รูปที่ 2.28 การกำหนดลักษณะของอิลิเมนต์สำหรับการคำนวณ

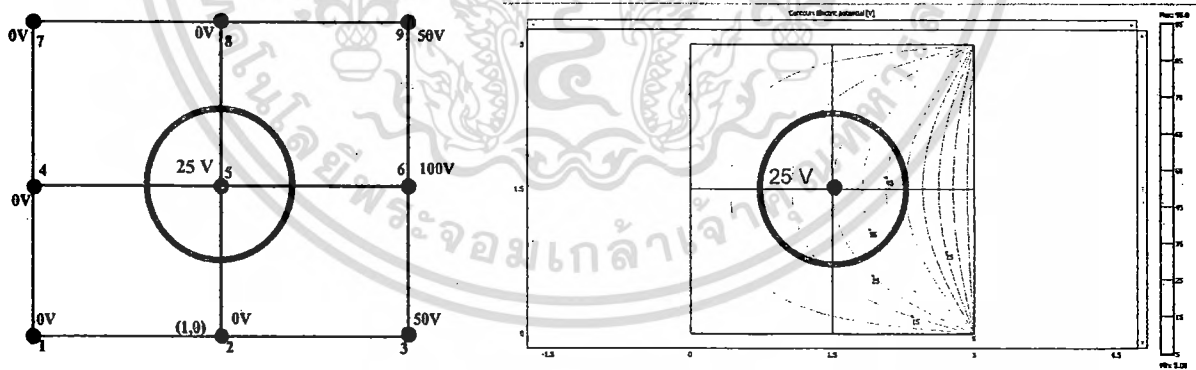
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) คำนวณโดยใช้โปรแกรม Comsol ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า

เปรียบเทียบคำตอบจากการใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณและการใช้โปรแกรม Comsol คำนวณโดยแสดงดังรูปที่ 2.30



ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการคำนวณ

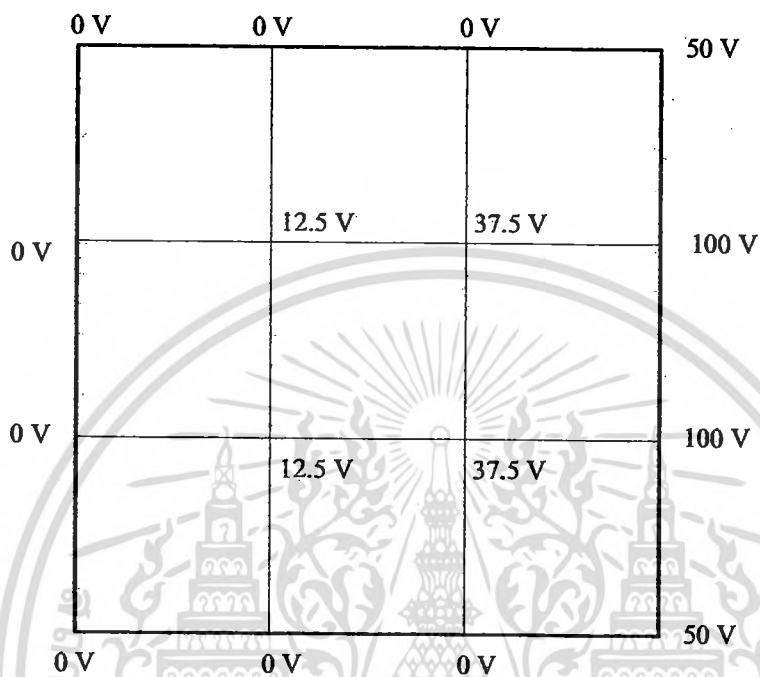
ผลลัพธ์ที่ได้จาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์

รูปที่ 2.30 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากโจทย์ตัวอย่างที่ 2.4.1

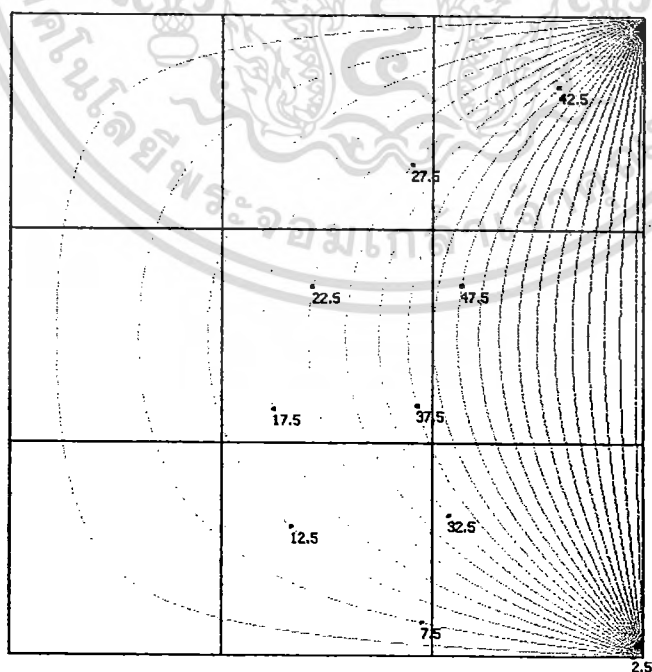
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของ 16 โหนดและแบบสมมาตรจะนำผลลัพธ์จากการคำนวณและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 2.31 – 2.34

กรณีแบบ 16 โหนด



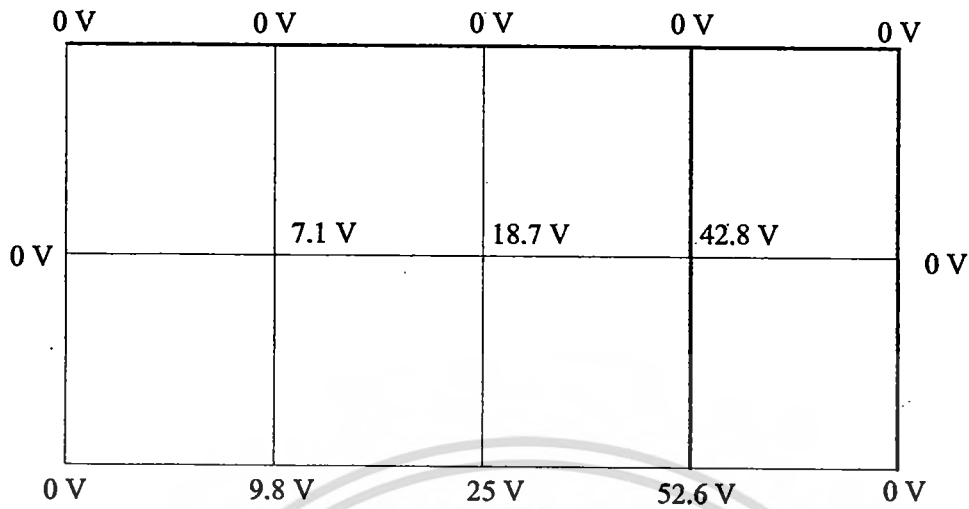
รูปที่ 2.31 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณี 16 โหนด



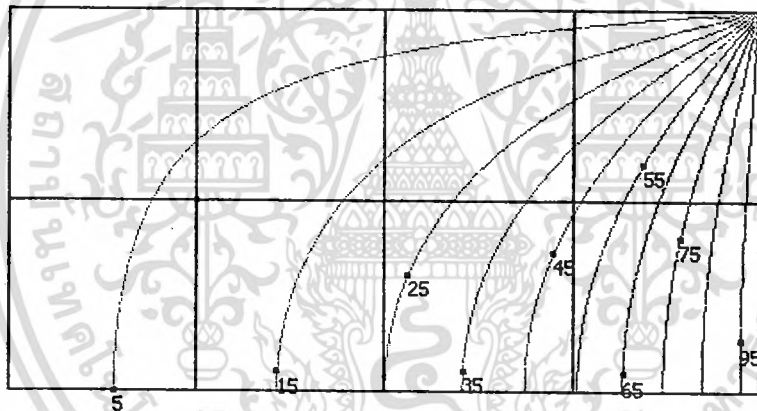
รูปที่ 2.32 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมComsol กรณี 16 โหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีแบบสมมาตร



รูปที่ 2.33 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีแบบสมมาตร



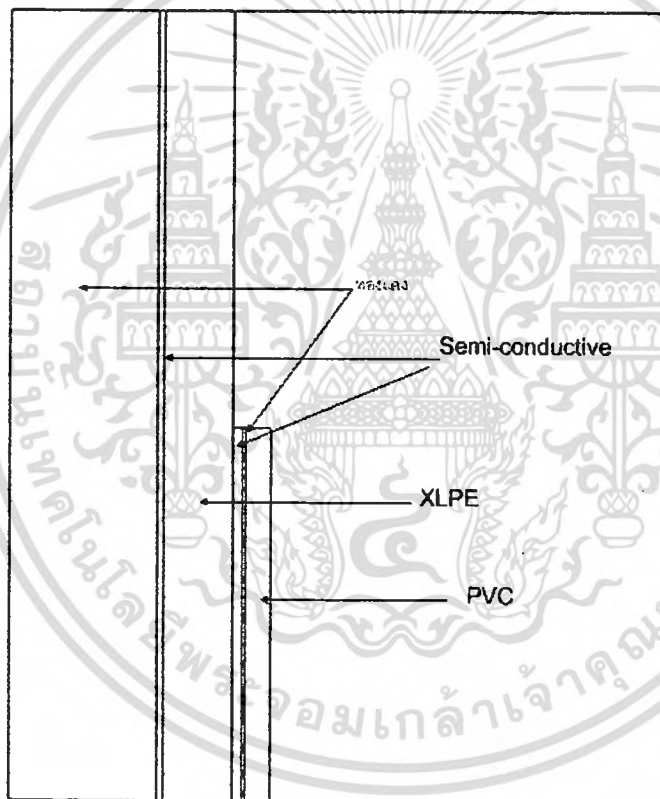
รูปที่ 2.34 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมComsol กรณีแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ตัวอย่างการแก้ปัญหา Electrostatic field ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กรณีที่ลักษณะรูปร่างหรือมิติของปัญหาซับซ้อนมากขึ้น

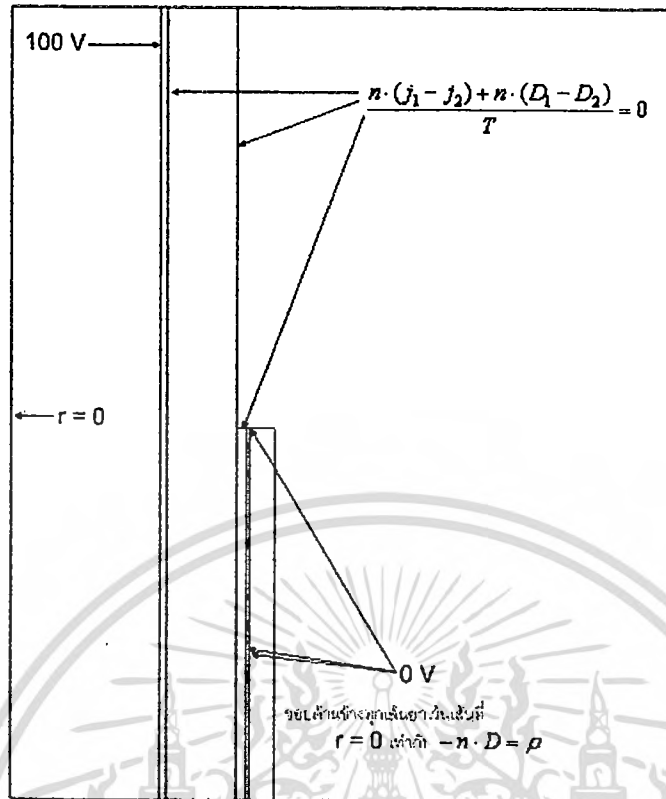
1) ตัวอย่างการคำนวณหาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของสายเคเบิล

เพื่อแสดงประโยชน์ของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนมากยิ่งขึ้นที่มักเจอในทางปฏิบัติจริง การนำโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์มาใช้เพื่อคำนวณหาลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าจะเป็นประโยชน์อย่างมากยกตัวอย่างเช่น การคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณด้านปลายเคเบิลที่จะทำการเข้าหัวสายดังแสดงใน รูปที่ 2.35 แสดงโครงสร้างภายในของสายเคเบิลและรูปร่างของสายเคเบิลที่ใช้วิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งป้อนแรงดัน 100 V และการกำหนดขอบเขตตามรูปที่ 2.36 เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบไฟไนต์อิลิเมนต์จะได้ดังรูปที่ 2.37

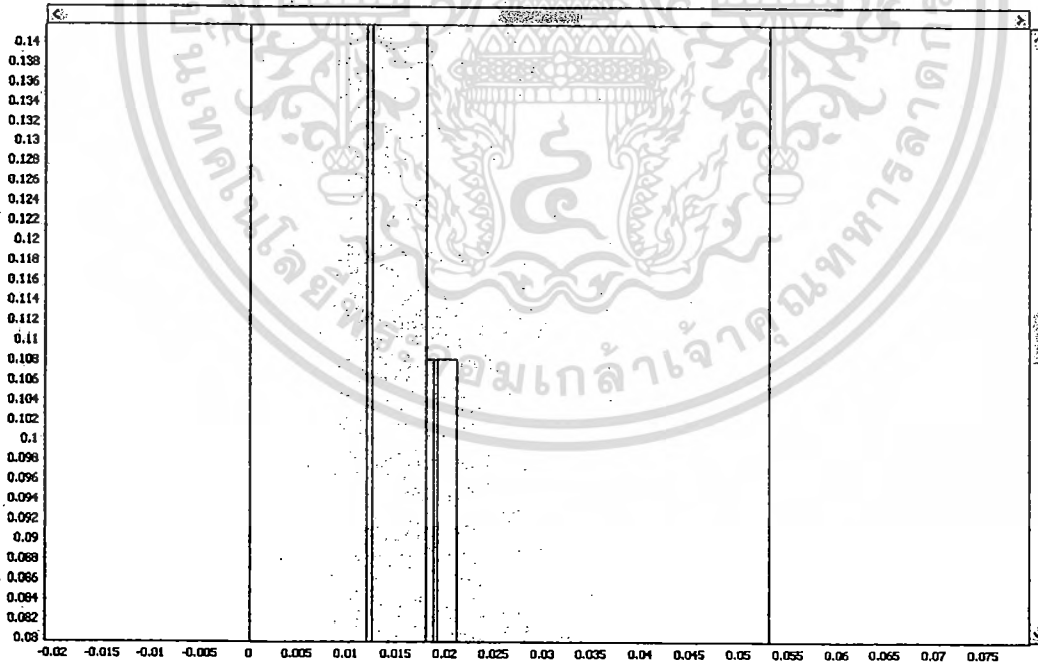


รูปที่ 2.35 แบบหน้าตัดของปลายสายเคเบิลในกรณีก่อนเข้าหัวสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

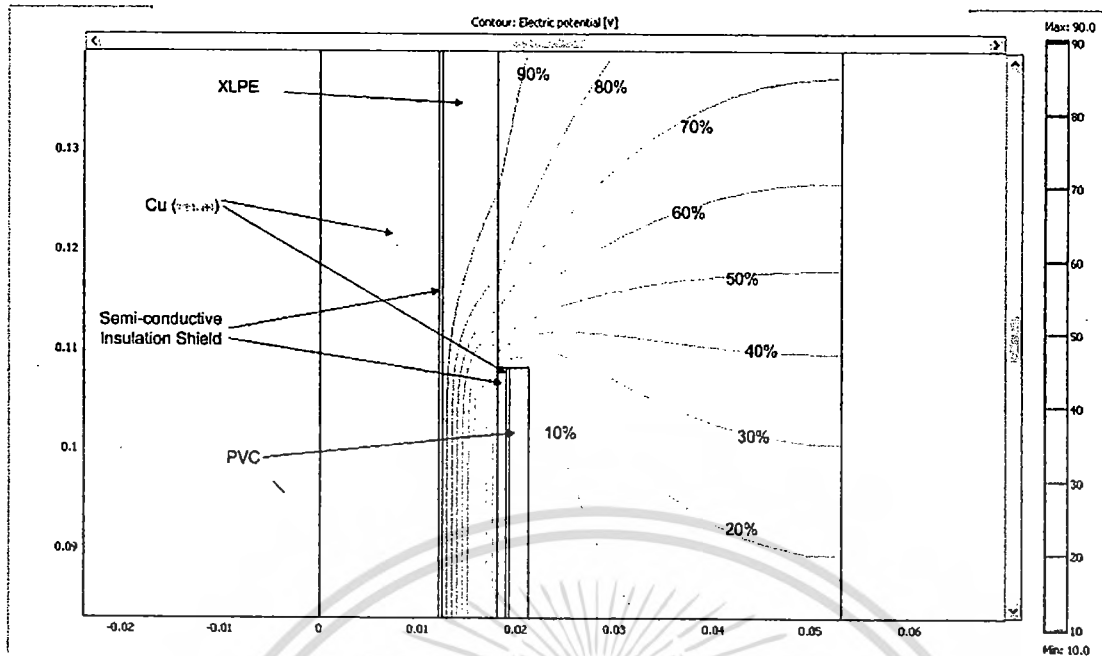


รูปที่ 2.36 การกำหนดขอบเขตปัญหาของสายเคเบิลก่อนคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม



รูปที่ 2.37 การกำหนดลักษณะอีลิเมนต์สำหรับการคำนวณ

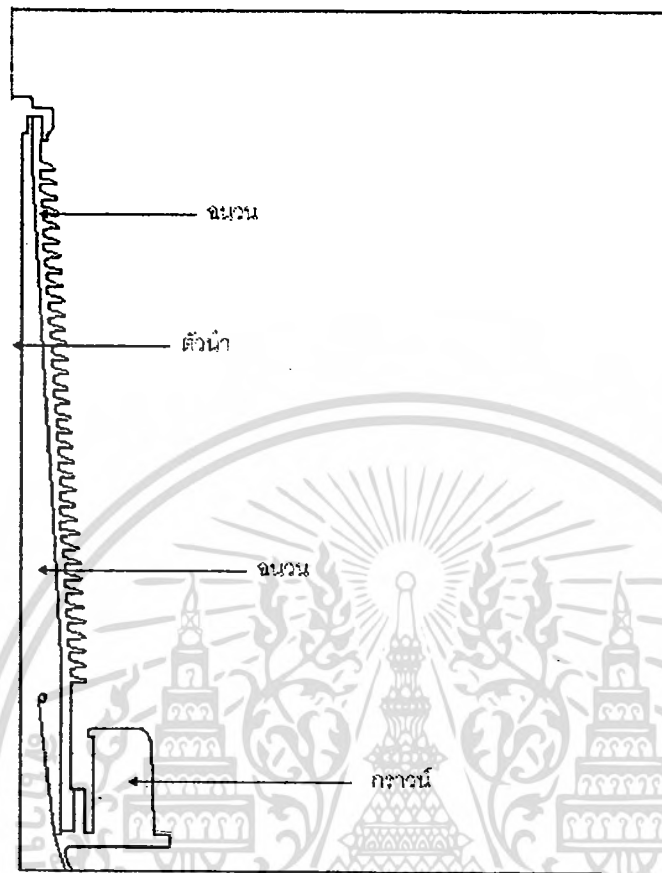
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.38 ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในสายเคเบิล

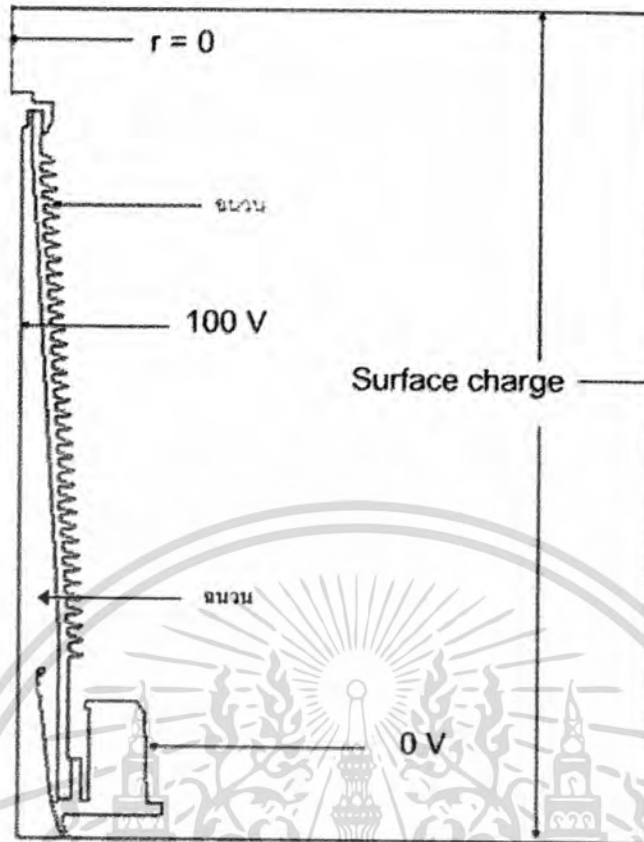
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวอย่างการคำนวณหาการกระจายของศักย์ไฟฟ้ากรณี Non-graded bushings

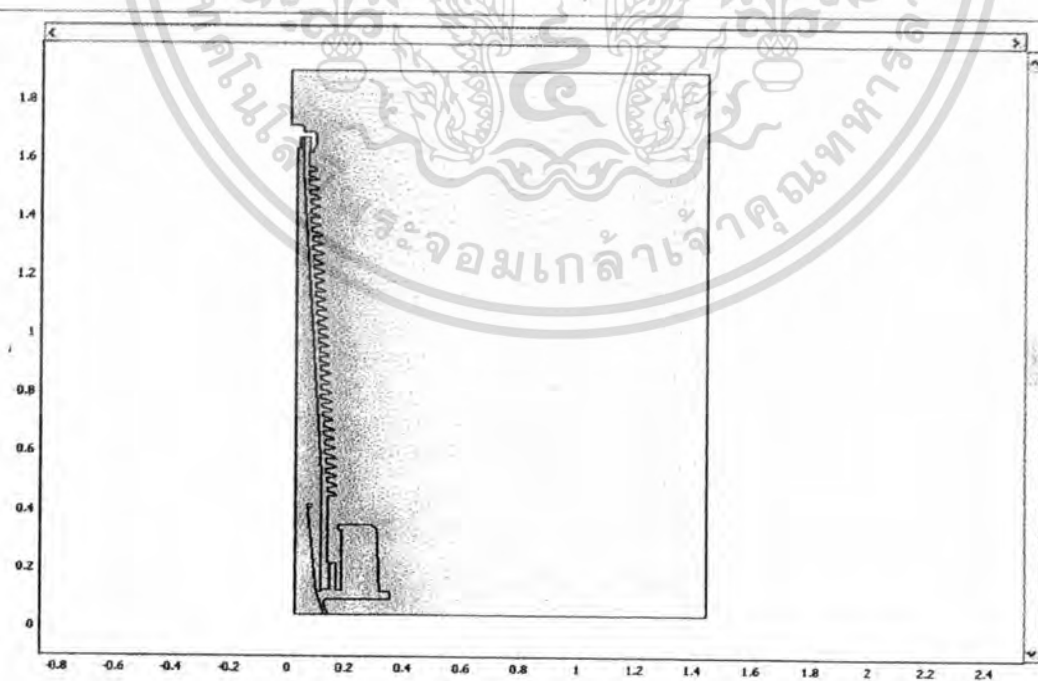


รูปที่ 2.39 แบบหน้าตัดกรณี Non-graded bushings

ในรูปที่ 2.39 จะแสดงส่วนประกอบของบุชชิ่งกรณี Non-graded bushings ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบไฟไนท์อิลิเมนต์ทำการวิเคราะห์ตามรูปที่ 2.40 และ 2.41 จะได้ผลลัพธ์เส้นการกระจายของศักย์ไฟฟ้าดังรูปที่ 2.42

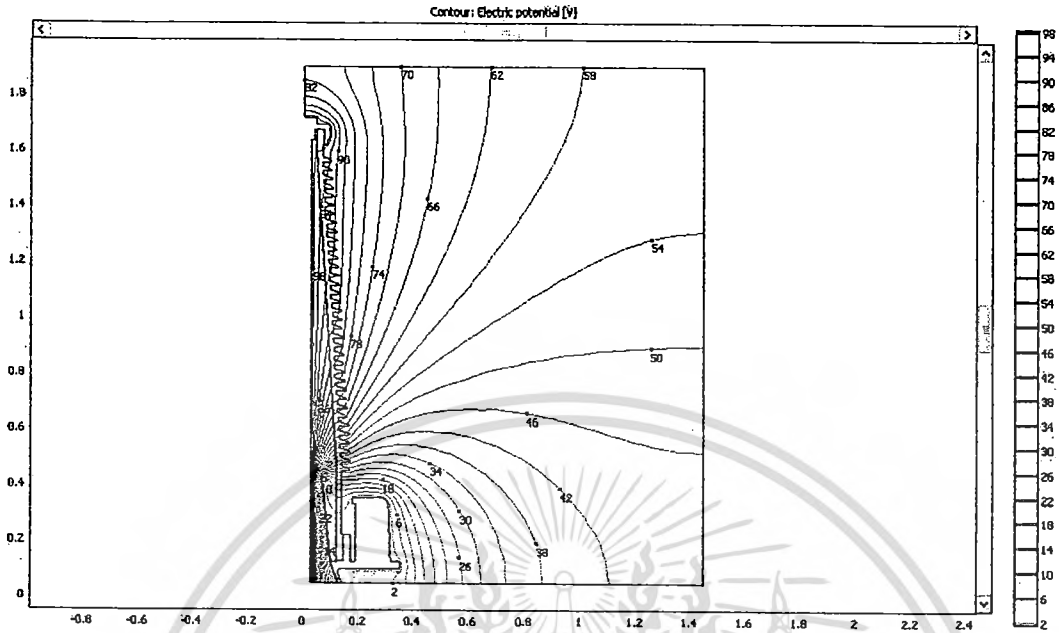


รูปที่ 2.40 การกำหนดขอบเขตปัญหาของบุชชิงกรณี Non-graded bushings ก่อนคำนวณด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม



รูปที่ 2.41 การกำหนดลักษณะของอีลิเมนต์สำหรับการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.42 ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในบุชชิงกรณี Non-graded bushings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 อีเล็กโตรดระนาบ [4]

2.5.1 อีเล็กโตรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile)

ในการสร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะใช้ระนาบที่มีขอบโค้งแบบโรกอฟสกี (Rogowski profile) ซึ่งขอบของอีเล็กโตรดจะโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าได้จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันของแมกซ์เวลล์ตามสมการที่ 2.82

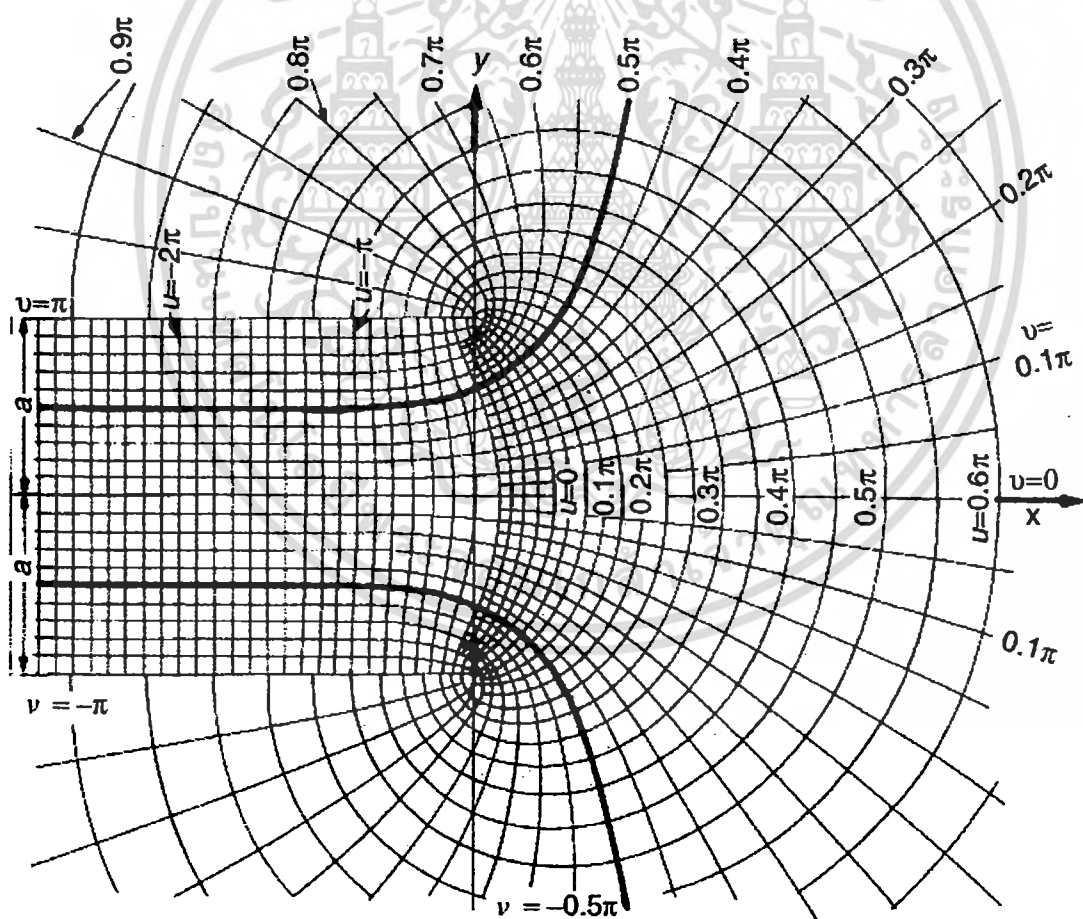
$$z = \frac{a}{\pi} (w + 1 + e^w) \quad (2.82)$$

เมื่อ z และ w เป็นระนาบของแกนประสานเชิงซ้อน (Complex coordination) คือ $z = x + jy$ และ $w = u + jv$ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.82) แล้วแยกเป็นเทอมจริงและเทอมจินตภาพจะได้

$$x = \frac{a}{\pi} (u + 1 + e^u \cos v) \quad (2.83)$$

และ
$$y = \frac{a}{\pi} (v + e^u \sin v) \quad (2.84)$$

เมื่อนำไปพล็อตจะได้ขอบโค้งที่ค่า v มีค่าเท่ากับ $-\pi \leq v \leq \pi$ และค่า u มีค่าเท่ากับ $-\infty \leq u \leq \infty$ ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 เส้นขอบโค้งที่ค่า v มีค่าเท่ากับ $-\pi \leq v \leq \pi$ และค่า u มีค่าเท่ากับ

$$-\infty \leq u \leq \infty$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

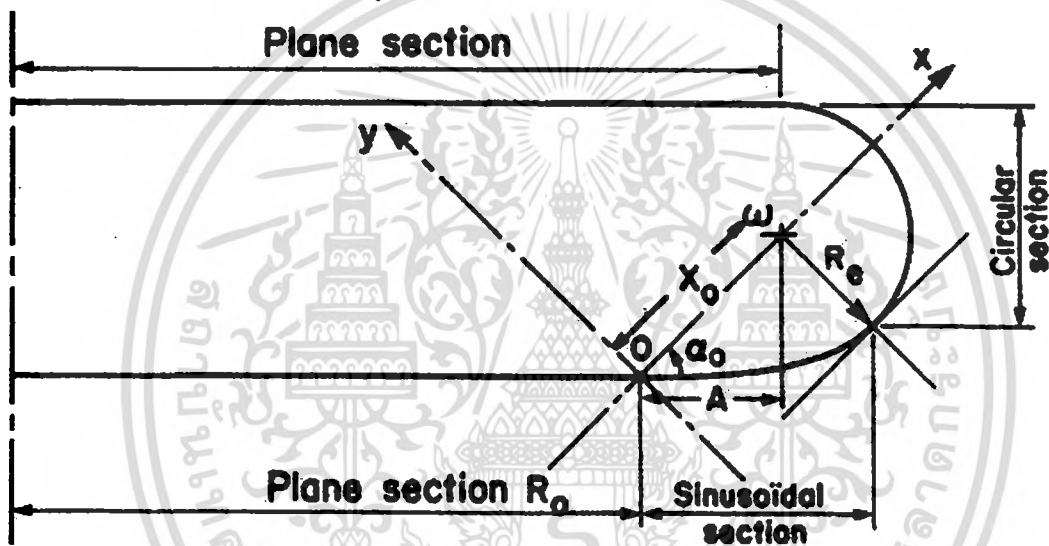
จากรูปที่ 2.43 จะเห็นว่าแกน x เป็นแกนสมมาตรในระนาบ z ฉะนั้นอิเล็กโทรดระนาบขบโค้งโรกอฟสกีที่ให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยหมุนขบโค้งที่ $v = \frac{\pi}{2}$ รอบแกน $u = -5$ หรือน้อยกว่า

2.5.2 อิเล็กโทรดระนาบขบโค้งบรูซ (Bruce profile) [5]

อิเล็กโทรดระนาบขบโค้งบรูซ (Bruce profile) จะประกอบด้วย 3 ส่วน

ดังรูปที่ 2.44

- 1.) ส่วนเส้นตรงของรัศมี R_0
- 2.) ส่วนไซน์ซอยด์
- 3.) ส่วนเส้นโค้งวงกลมรัศมี R_e



รูปที่ 2.44 อิเล็กโทรดระนาบขบโค้งบรูซ

ซึ่งในส่วนไซน์ซอยด์จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.85

$$y = -R_e \sin\left(\frac{x \pi}{x_0 2}\right) \quad (2.85)$$

เมื่อ x_0 คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง ω กับจุดตัดแกน y ที่จุดกำเนิด 0

R_e คือรัศมีของส่วนเส้นโค้งวงกลม

เพื่อความละเอียดระหว่างจุดต่อของทั้งสองส่วน อิเล็กโทรดระนาบขบโค้งบรูซ (Bruce profile) จึงได้กำหนดค่า x_0 และ R_e ดังต่อไปนี้

$$R_e = \frac{2}{\pi} x_0 \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (2.86)$$

$$x_0 = \frac{A}{\cos \alpha_0} \quad (2.87)$$

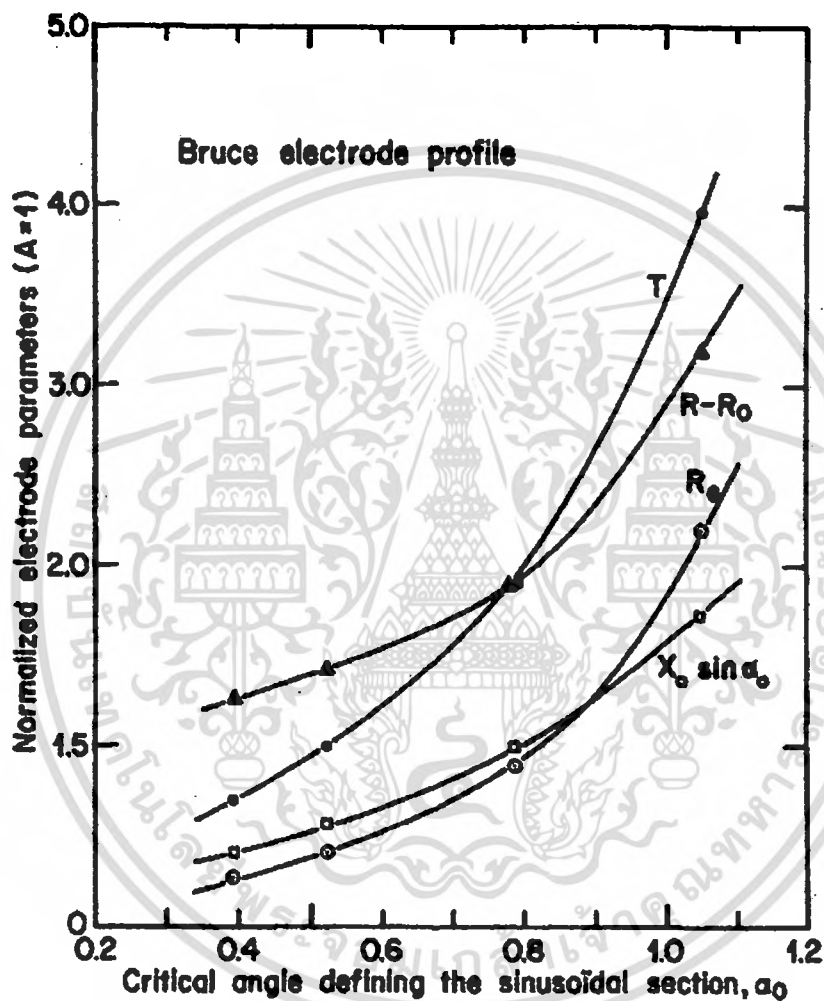
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $\cos \alpha_0$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ α_0 คือมุมคุณลักษณะพิเศษของส่วนไซนูซอยด์

รัศมีรวมทั้งหมด R ของอิเล็กโทรดระนาบขอบโค้งบรูซ (Bruce profile) จะหาได้จากสมการที่ (2.87)

$$R = R_0 + A + R_e \quad (2.87)$$

$$R = R_0 + A + \frac{2}{\pi} x_0 \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (2.88)$$



รูปที่ 2.45 แสดงพารามิเตอร์คุณลักษณะพิเศษที่นิยามโดยอิเล็กโทรดระนาบขอบโค้งบรูซ (Bruce profile)

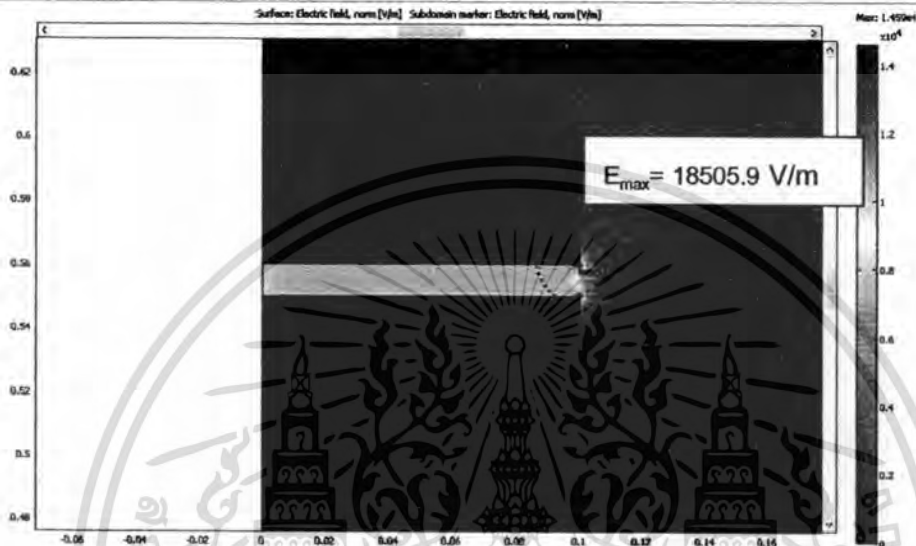
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดและประกอบสร้าง

3.1 วิธีการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดขบโค้งโรกอฟสกี

ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดระนาบมักเกิดสนามไฟฟ้าสูงมากบริเวณขอบของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดดังรูปที่ 3.1 ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 3.1 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์โทรดระนาบ โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรดเท่ากับ 20 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 18505.9 \text{ V/m}$)

ดังนั้นในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพื่อใช้กระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบขบโค้งโรกอฟสกีซึ่งมีวิธีการออกแบบดังต่อไปนี้

จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันของแมกซ์เวลล์

$$z = \frac{a}{\pi} (W + 1 + e^w) \quad (3.1)$$

เมื่อ z และ w เป็นระนาบของแกนประสานเชิงซ้อน (Complex coordination) คือ $z = x + jy$ และ $w = u + jv$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.1) แล้วแยกเป็นเทอมจริงและเทอมจินตภาพจะได้

$$x = \frac{a}{\pi} (u + 1 + e^u \cos v) \quad (3.2)$$

และ
$$y = \frac{a}{\pi} (v + e^u \sin v) \quad (3.3)$$

เมื่อนำค่า x และ y จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) นำไปเขียนโปรแกรมใน Matlab เพื่อคำนวณหาค่าเส้นขบโค้งโรกอฟสกี ซึ่งมีตัวอย่างโปรแกรมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input parameters.

```
clear all
```

```
clc
```

```
a = input('Rogowski parameter a ?');
```

```
u = input('Rogowski parameter u_min (field strength) ?');
```

```
v1 = input('Rogowski parameter v1 (equipotential lines 1)?');
```

```
v2 = input('Rogowski parameter v2 (equipotential lines 2)?');
```

```
ymax = input('ymax ?');
```

```
dr = input('r increment ?');
```

```
i=0;
```

```
y1=0;
```

```
data=[];
```

```
while y1<ymax
```

```
x = (a/pi)*(u+1+(exp(u)*cos(v1)));
```

```
y1 = (a/pi)*(v1+(exp(u)*sin(v1)));
```

```
y2 = (a/pi)*(v2+(exp(u)*sin(v2)));
```

```
i=i+1;
```

```
data(i,1)=x;
```

```
data(i,2)=y1;
```

```
data(i,3)=y2;
```

```
u=u+dr;
```

```
end
```

```
plot(data(:,1),data(:,2))
```

```
hold on
```

```
plot(data(:,1),data(:,3))
```

```
title('Rogowski Profile');
```

```
xlabel('X');ylabel('Y')
```

```
grid on
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการ Run โปรแกรมใน Matlab แล้วป้อนค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

Rogowski parameter a (ค่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด)

Rogowski parameter u_min (field strength) (ค่าเส้นสนามไฟฟ้า)

Rogowski parameter v1 (equipotential lines 1) (ค่าเส้นศักดาไฟฟ้าค่าบวก)

Rogowski parameter v2 (equipotential lines 2) (ค่าเส้นศักดาไฟฟ้าค่าลบ)

ymax (ค่าขอบเขตของแกน y)

r increment (ค่าความละเอียดของการเพิ่มค่าเส้นสนามไฟฟ้า)

ซึ่งมีตัวอย่างการแทนค่าดังนี้

Rogowski parameter a 10

Rogowski parameter u_min (field strength) -20

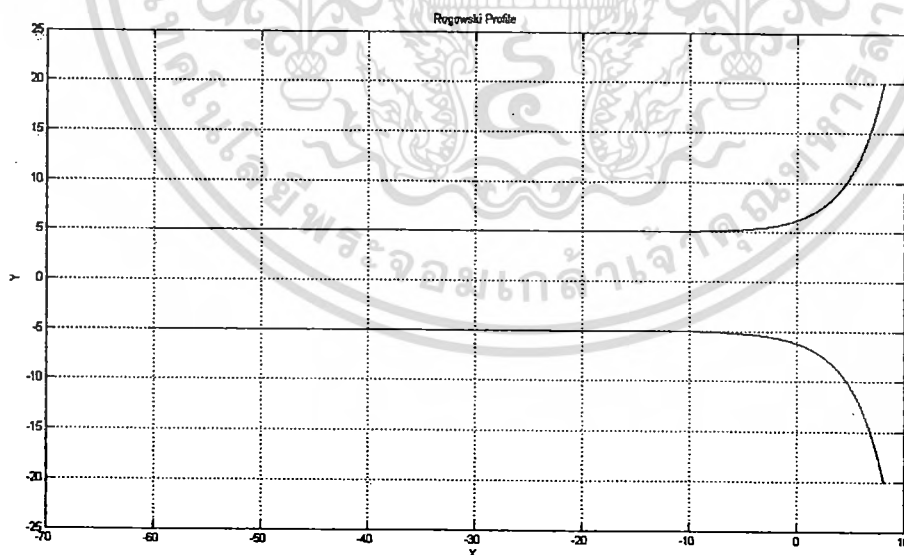
Rogowski parameter v1 (equipotential lines 1) 1.570796327

Rogowski parameter v2 (equipotential lines 2) -1.570796327

ymax 30

r increment 0.0001

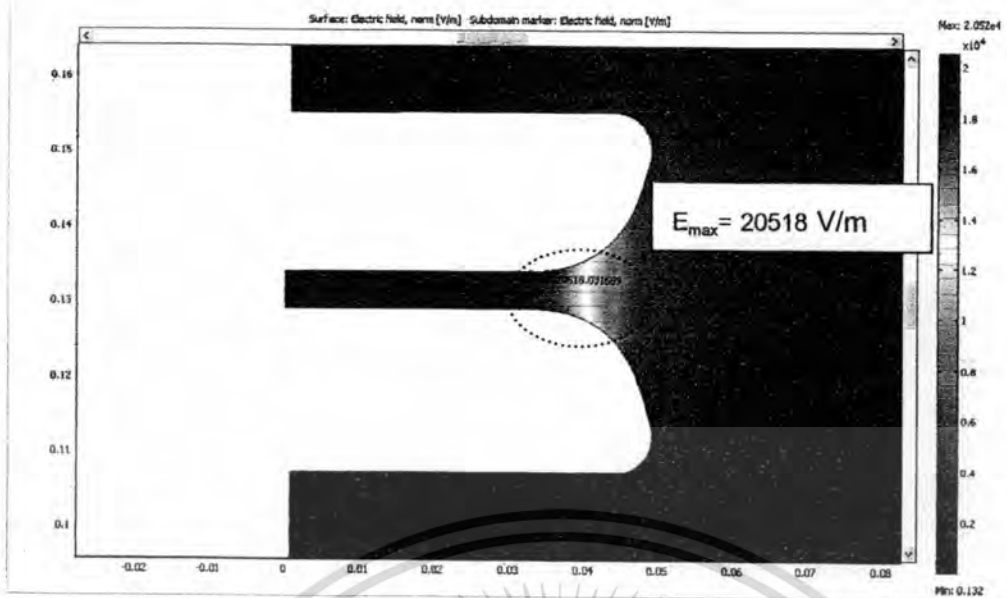
ซึ่งจะได้รูปร่างขอบโค้งโรกอฟสกีดังรูปที่ 3.2 นำขอบโค้งโรกอฟสกีที่ได้จากการคำนวณใน Matlab [6] ไปวาดใน Autocad [7] เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในโปรแกรม COMSOL [8] เพื่อคำนวณหาค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เส้นขอบโค้งโรกอฟสกีที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Matlab ที่ค่า

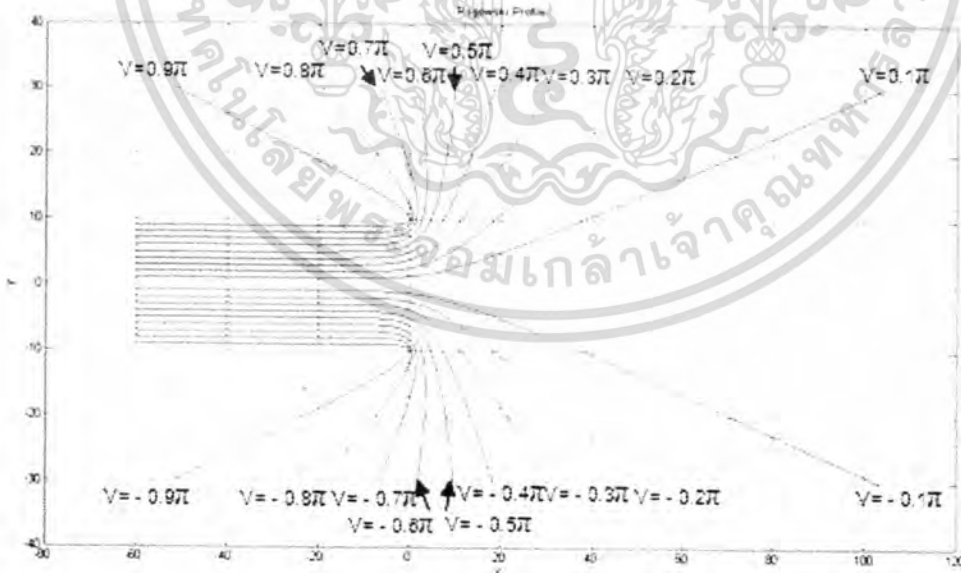
$$v = 1.57 \text{ และ } u = -20$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ผลการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{\pi}{2}$, $u = -20$ ระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm บ้อนแรงดัน 100 V ($E_{max} = 20518$ V/m)

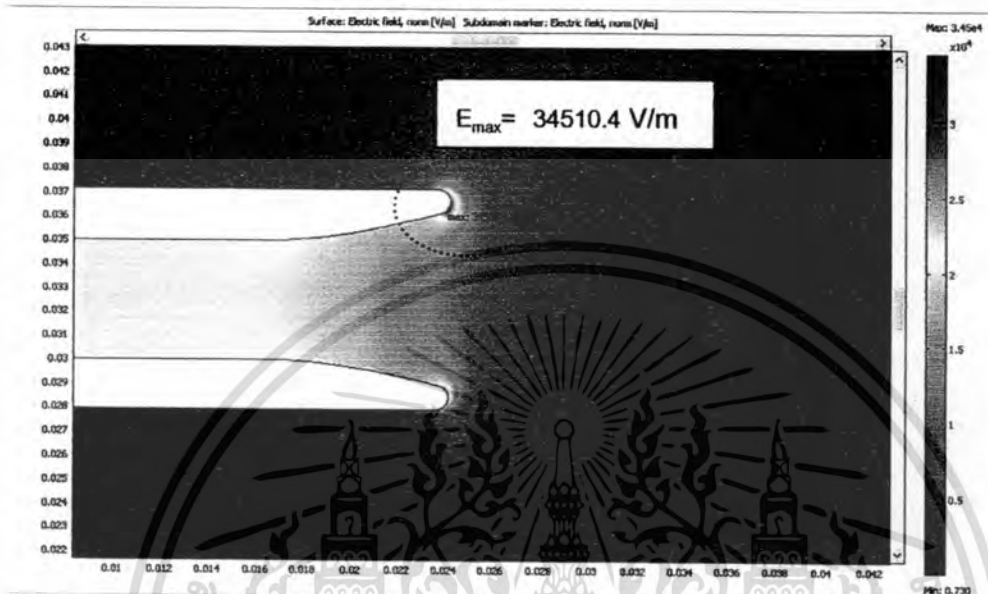
และทำการปรับเปลี่ยนค่า Rogowski parameter v1 กับ Rogowski parameter v2 โดยค่า Rogowski parameter v1 จะอยู่ในช่วง 0.1π ถึง 0.9π และค่า Rogowski parameter v2 จะอยู่ในช่วง -0.1π ถึง -0.9π ซึ่งผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.4



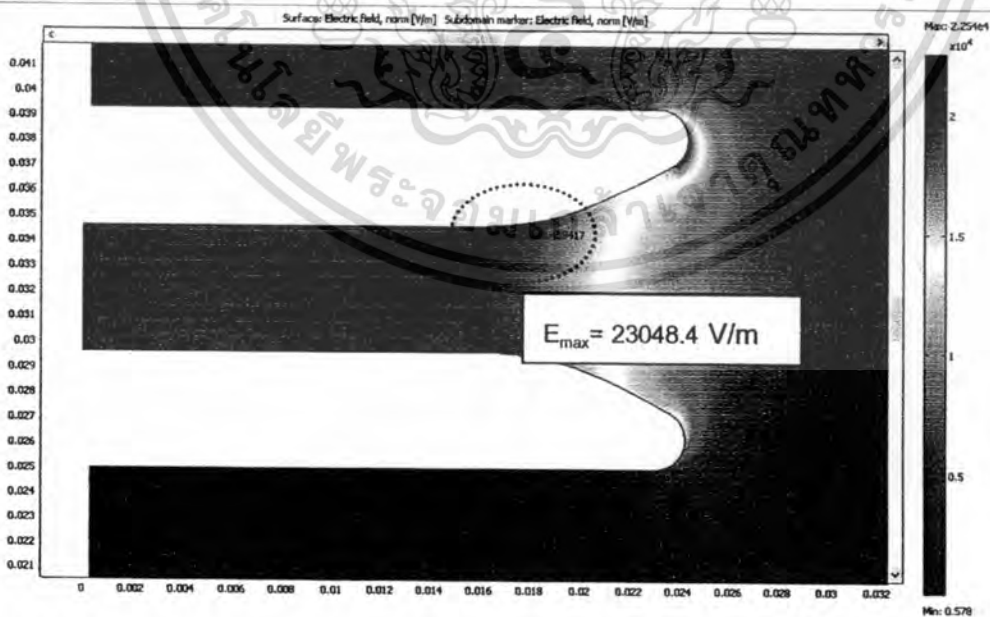
รูปที่ 3.4 เส้นขอบโค้งโรกอฟสกีที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Matlab ที่ค่า $0.1\pi \leq v \leq 0.9\pi$ และ $u = -20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำเส้นขอบโค้งโรกอฟสกีที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Matlab ไปวาดใน Autocad และนำไปวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของขอบโค้งโรกอฟสกี มีตัวอย่างการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แสดงดังรูปที่ 3.5-3.12



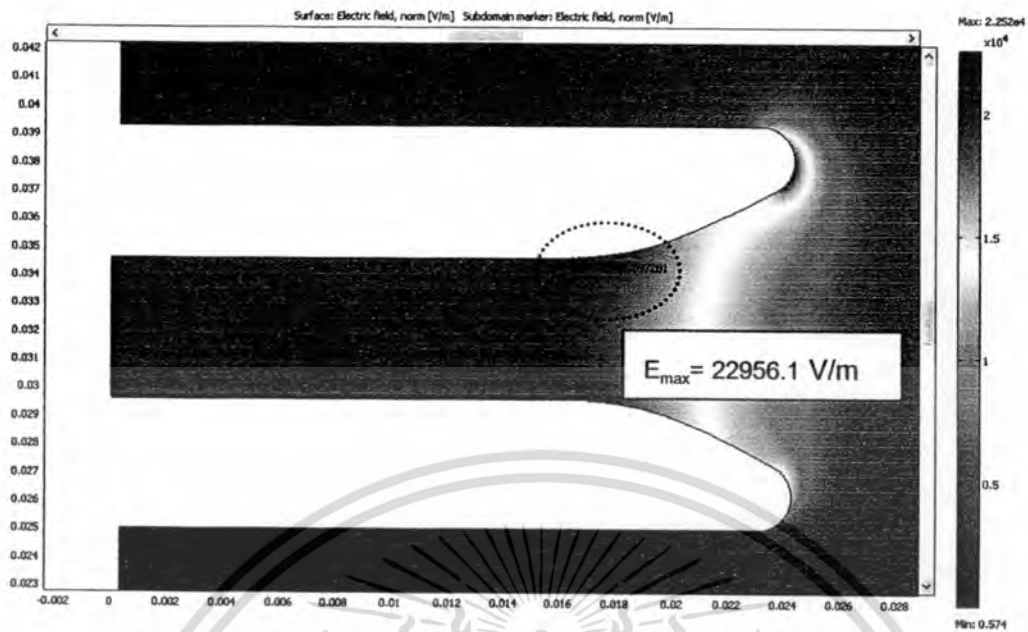
รูปที่ 3.5 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 34510.4$ V/m)



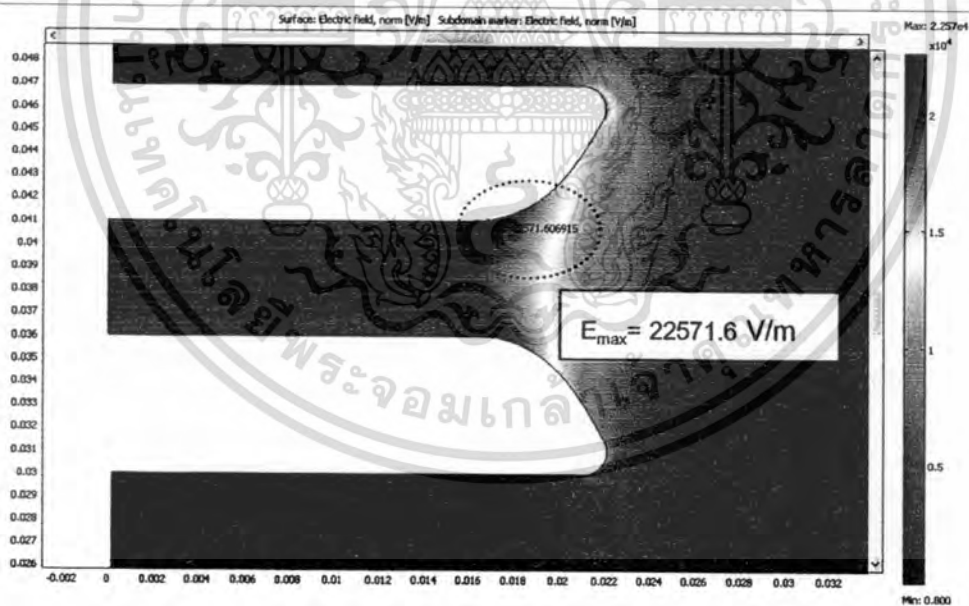
รูปที่ 3.6 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{2\pi}{10}$, $u = -20$

ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 23048.4$ V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

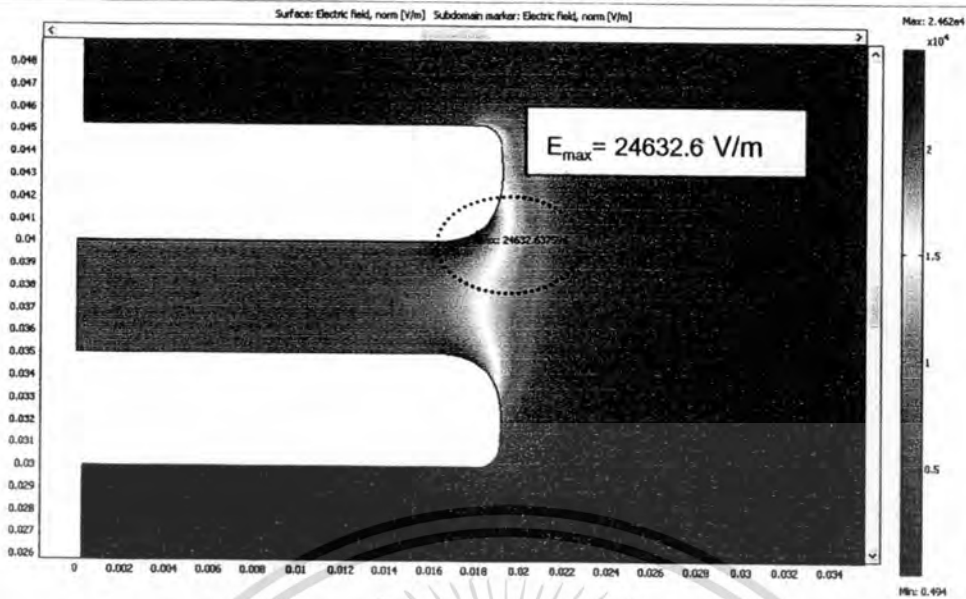


รูปที่ 3.7 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{3\pi}{10}$, $u = -20$
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 22956.1$ V/m)

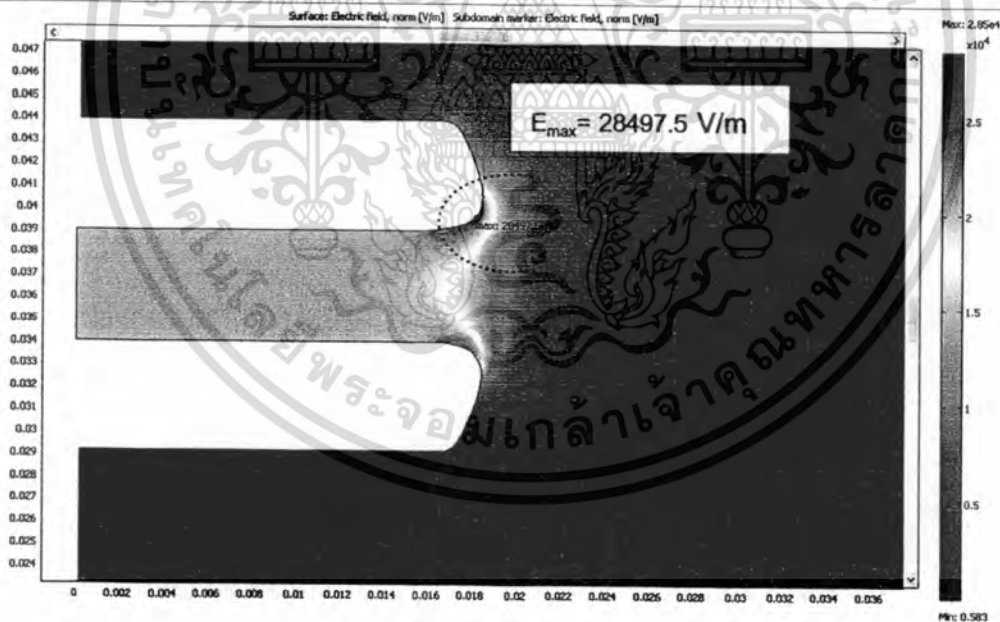


รูปที่ 3.8 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{4\pi}{10}$, $u = -20$
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 22571.6$ V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

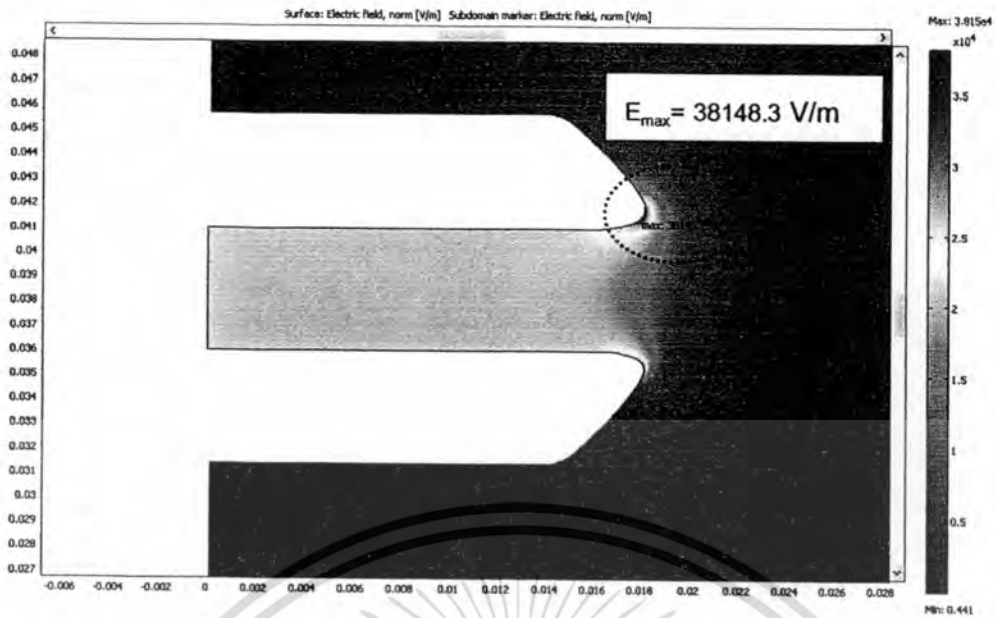


รูปที่ 3.9 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{6\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 24632.6$ V/m)

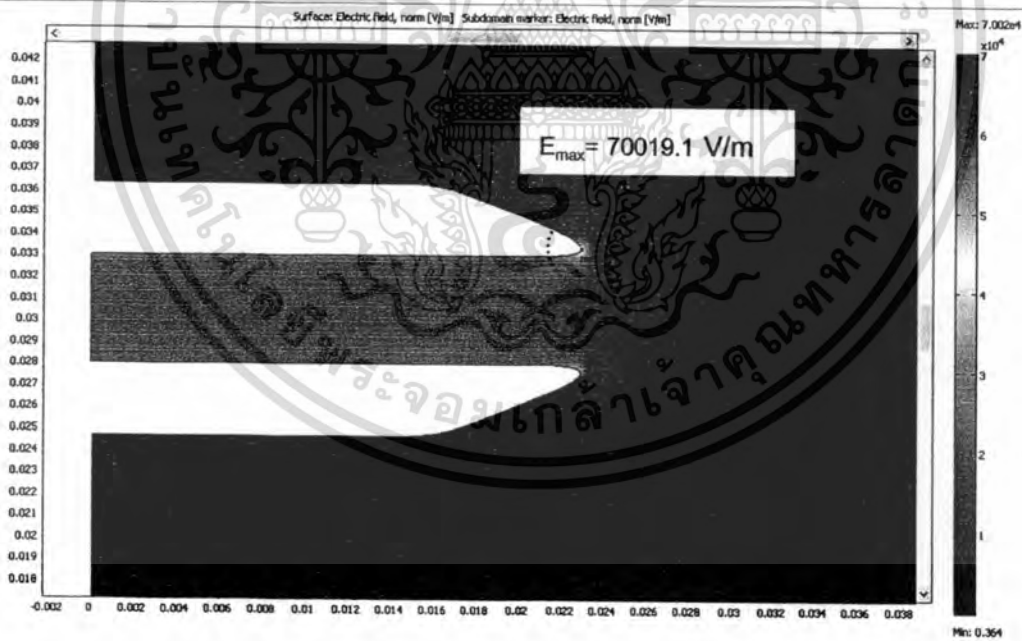


รูปที่ 3.10 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{7\pi}{10}$, $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V ($E_{\max} = 28497.5$ V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{8\pi}{10}$,
 $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V
 ($E_{\max} = 38148.3 \text{ V/m}$)



รูปที่ 3.12 การคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ที่ $v = \frac{9\pi}{10}$,
 $u = -20$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V
 ($E_{\max} = 70019.1 \text{ V/m}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการข้างต้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าระยะการหมุนขอบโค้งโรกอฟสกี (v) แล้วนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรม Comsol จะได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1 และเมื่อนำค่าระยะการหมุนขอบโค้งโรกอฟสกี (v) กับความเครียดสนามไฟฟ้าไปพล็อตกราฟแสดงดังรูปที่ 3.13 จะพบว่าที่ระยะการหมุนขอบโค้งโรกอฟสกี (v) เท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุด และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณได้ดังนี้

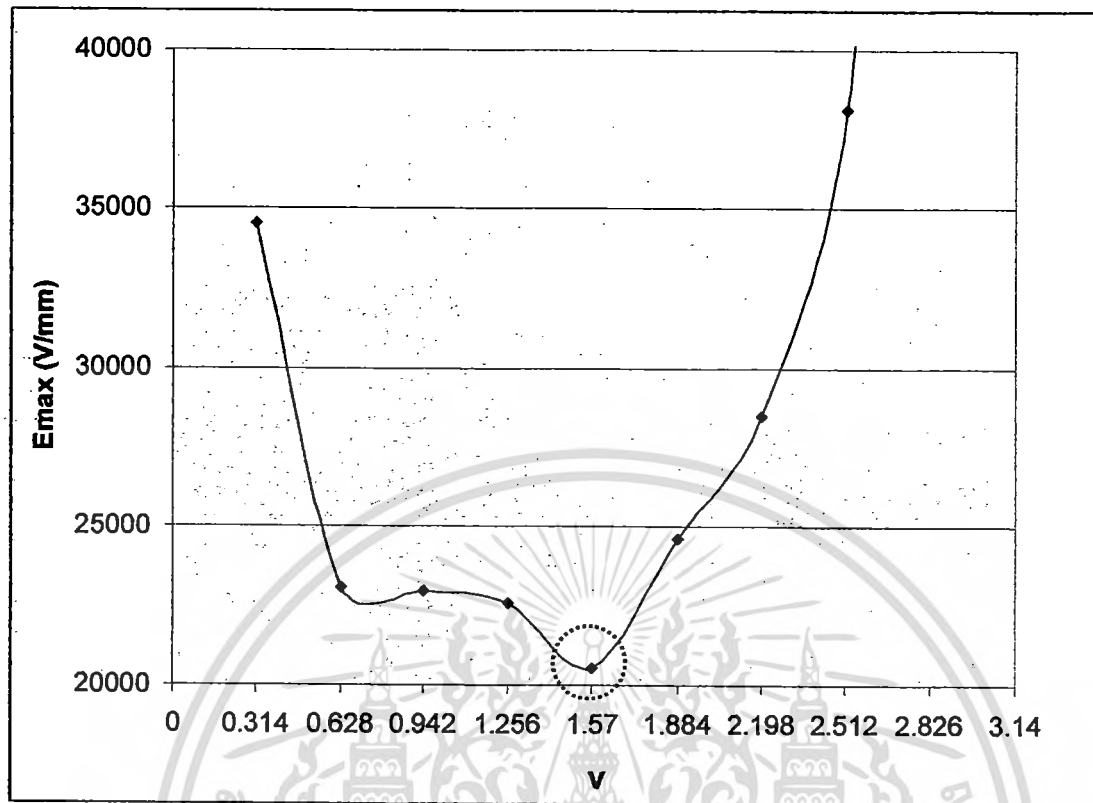
จาก
$$E_{\max} = \frac{U}{d}$$

โดยที่ $U = 100 \text{ V}$, $d = 5 \text{ mm}$
 ดังนั้นจะได้ว่า $E_{\max} = 20000 \text{ V/m}$

ดังนั้นในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้าจะออกแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบโรกอฟสกีที่ระยะการหมุนขอบโค้ง (v) เท่ากับ $\frac{\pi}{2}$

ตารางที่ 3.1 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของขอบโค้งโรกอฟสกี ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V

v	$E_{\max} \text{ (V/m)}$
0.1π	34510.43
0.2π	23048.46
0.3π	22956.10
0.4π	22571.61
0.5π	20518.03
0.6π	24632.64
0.7π	28497.50
0.8π	38148.26
0.9π	70019.12

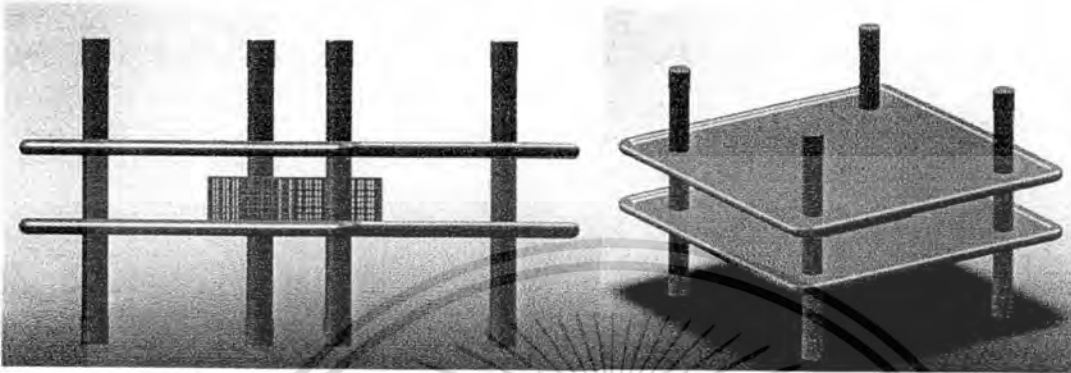


รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการหมุนขบโค้ง (V) กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm ป้อนแรงดัน 100 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

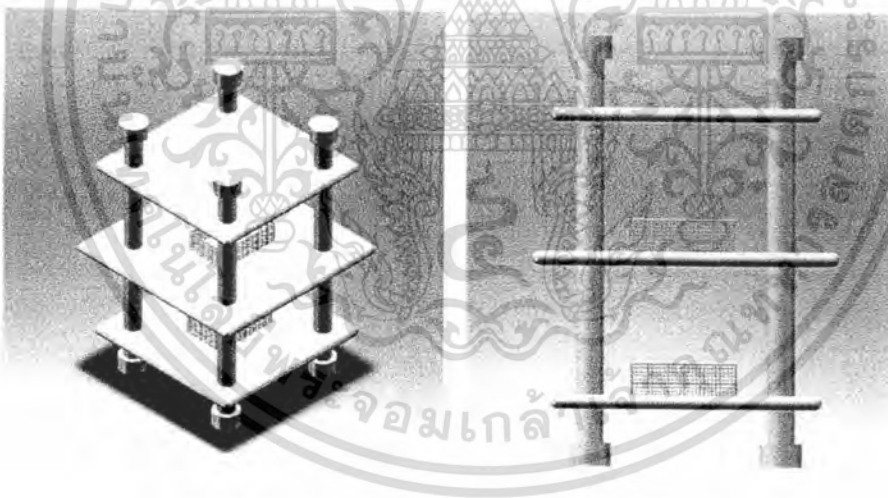
3.2 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้า ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์จะออกแบบไว้ 2 ลักษณะ แสดงดังรูปต่อไปนี้

1.) อิเล็กทรอนิกส์โรกอฟสกีแบบ 1 ชั้น 2 ระนาบอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.14 อิเล็กทรอนิกส์โรกอฟสกีแบบ 1 ชั้น 2 ระนาบ

2.) อิเล็กทรอนิกส์โรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 3 ระนาบอิเล็กทรอนิกส์

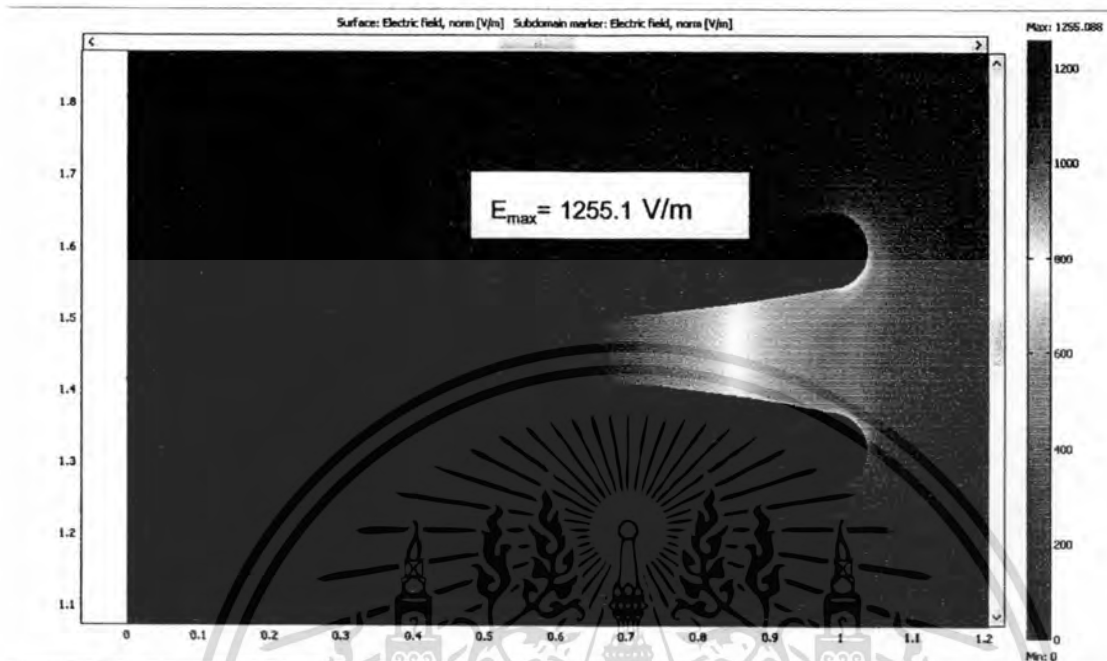


รูปที่ 3.15 อิเล็กทรอนิกส์โรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 2 ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์โดยโปรแกรม Comsol

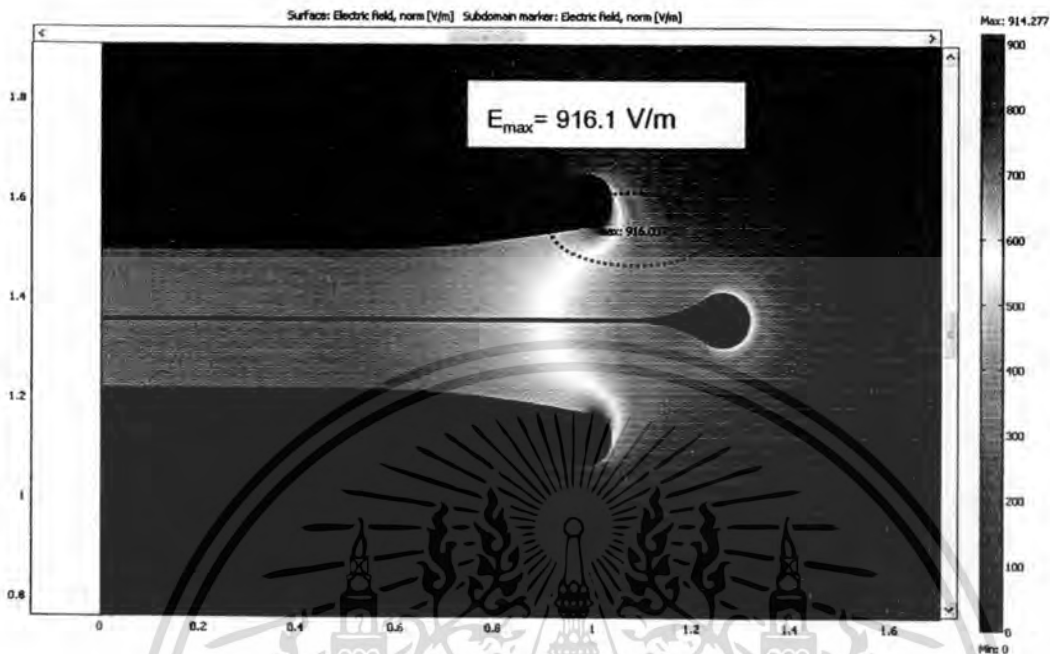
1.) อิเล็กทรอนิกส์โรกอฟสกีแบบ 1 ชั้น 2 ระบายอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.16 ผลการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์โรกอฟสกีแบบ 1 ชั้น 2 ระบายอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ป้อนแรงดัน 100 V และ $d = 80$ mm

จากการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{max}) เท่ากับ 1255.1 V/m ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากทฤษฎีสถานะไฟฟ้าสม่ำเสมอ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1250 V/m

2.) อิเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 3 ระบายอิเล็กโทรด



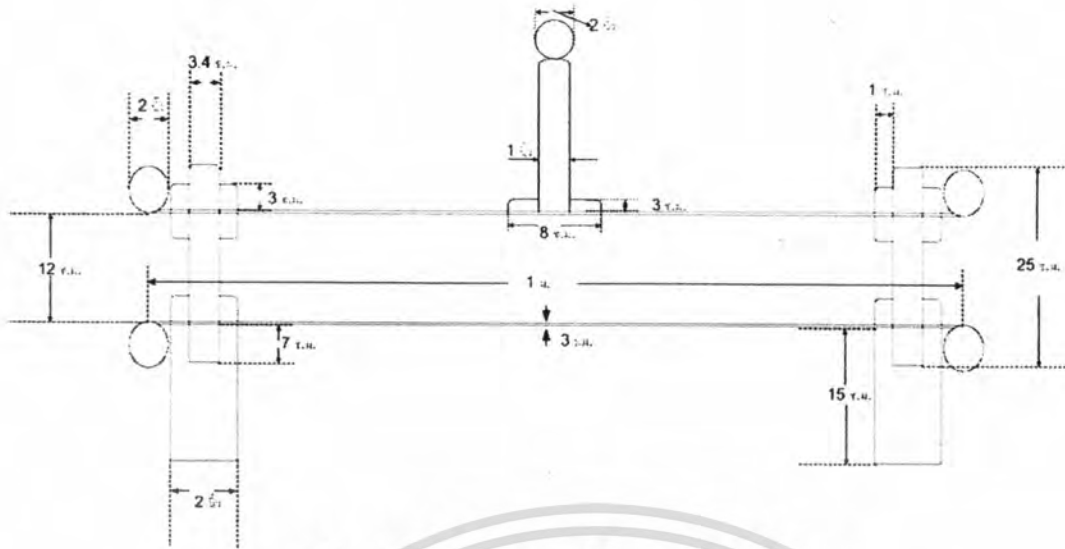
รูปที่ 3.17 การคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 3 ระบายอิเล็กโทรด โดยที่ป้อนแรงดัน 100 V และ $d = 137$ mm (d หมายถึง ระยะห่างระหว่างเพลทกลางถึงเพลทล่าง)

จากการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{max}) เท่ากับ 916.1 V/m ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากทฤษฎีสถานไฟฟ้าสม่ำเสมอ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 729.92 V/m

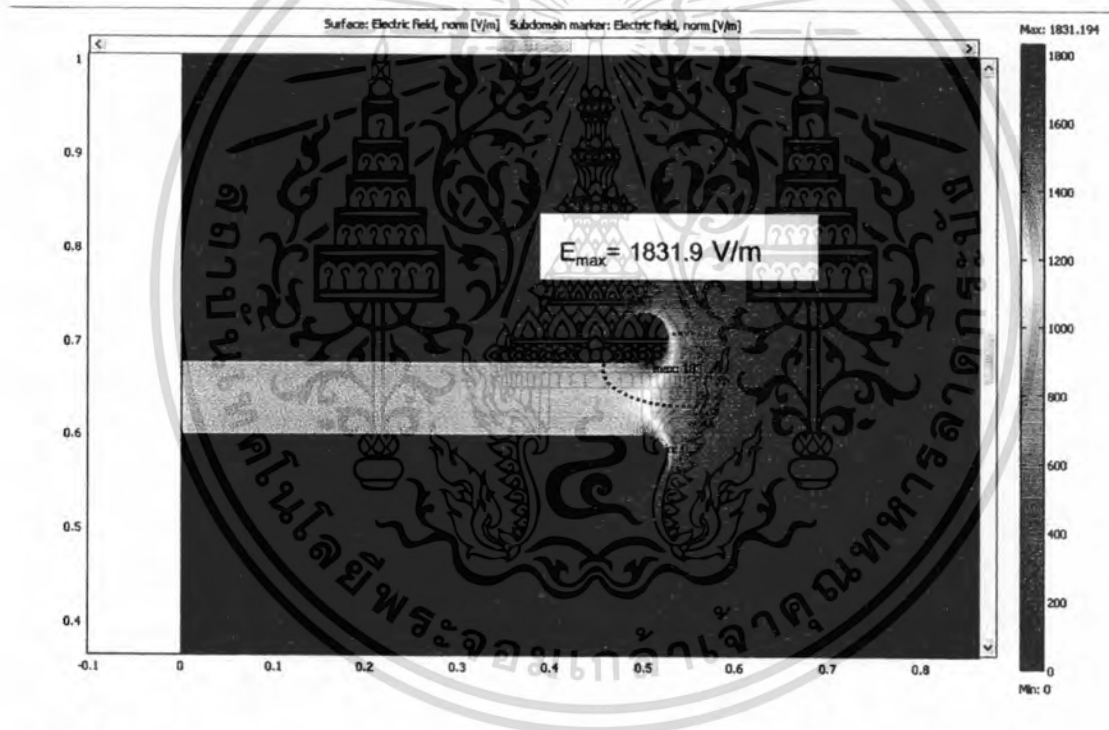
ในการออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อใช้กระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้านั้นจะเลือกใช้อิเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 1 ชั้น 2 ระบายอิเล็กโทรด เนื่องจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบโค้งของอิเล็กโทรดน้อยกว่าอิเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 3 ระบายอิเล็กโทรดและเพื่อให้ง่ายในการประกอบสร้าง

ในการออกแบบจริงเราไม่สามารถขึ้นรูปขอบโค้งแบบโรกอฟสกีได้ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีควบคุมสนามไฟฟ้าผ่านขอบโค้งของท่อที่ได้นำมาทำเป็นขอบระนาบโดยพยายามปรับมุมโค้งของท่อให้ใกล้เคียงกับขอบโค้งโรกอฟสกีให้มากที่สุด โครงสร้างของระนาบอิเล็กโทรดที่ได้ออกแบบและผลการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าของระนาบอิเล็กโทรดที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 อีเล็กโทรดขอบโค้งทอกลมรัศมี 2 นิ้ว

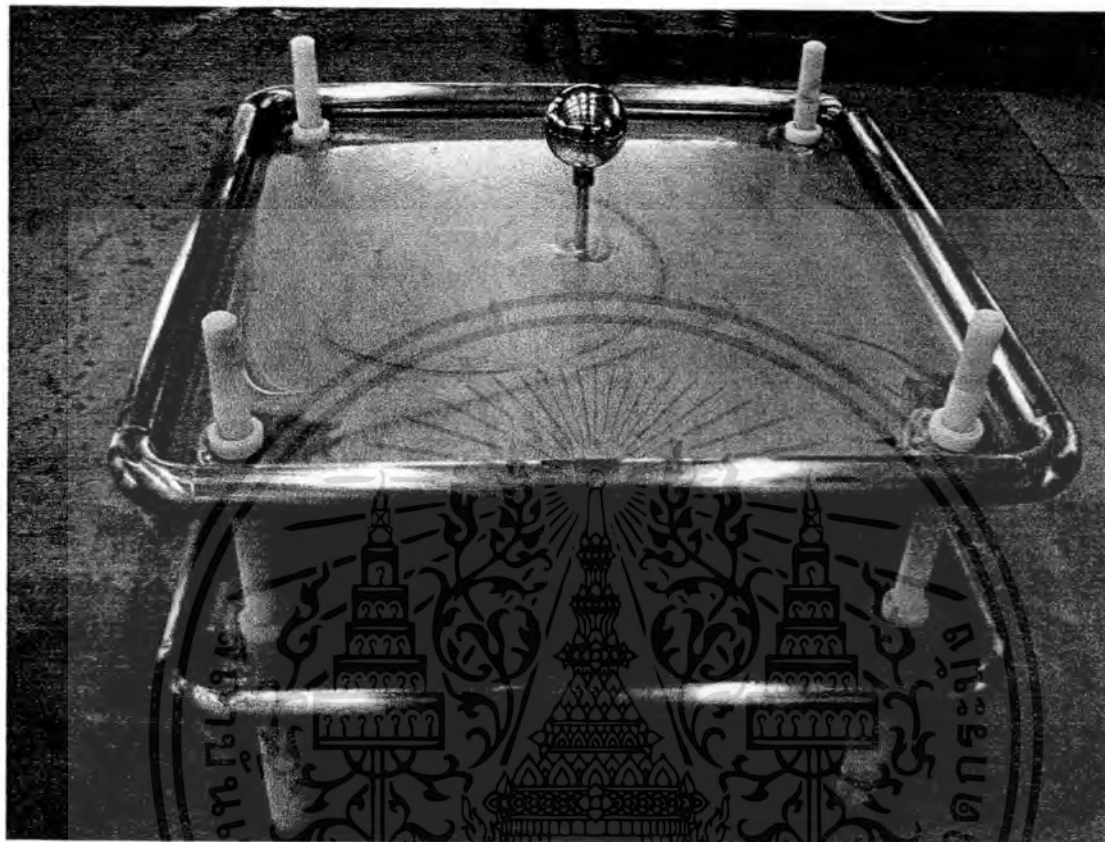


รูปที่ 3.19 ผลการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอีเล็กโทรดโรกอฟสกีแบบ 2 ชั้น 1 ระบายอีเล็กโทรด โดยที่ป้อนแรงดัน 100 V และ $d = 80$ mm ($E_{max} = 1831.9$ V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อีเล็กโทรดขอบโค้งที่ประกอบสร้างขึ้น

อีเล็กโทรดขอบโค้งที่ประกอบสร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.20 โดยกำหนดให้พื้นที่ของระนาบอีเล็กโทรดแต่ละด้าน 1 ตารางเมตรสามารถกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ครั้งละ 4 กิโลกรัม

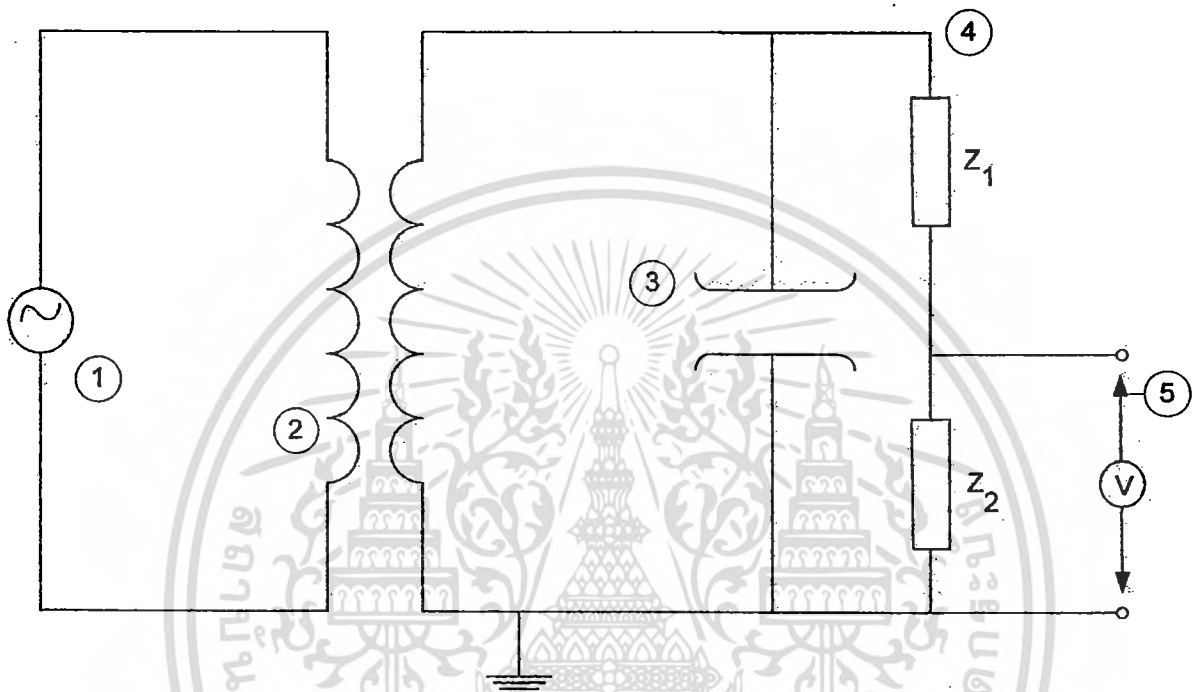


รูปที่ 3.20 อีเล็กโทรดขอบโค้งที่ประกอบสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการทดสอบการกระตุ้นแม่เหล็กข้าวด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

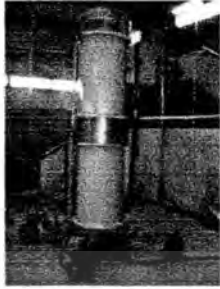
เมื่อได้ประกอบสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์แล้วได้นำมาทดสอบการกระตุ้นแม่เหล็กข้าวด้วยสนามไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงกระแสตรงข้าวบวกกระแสตรงข้าวลบและแรงดันสูงกระแสสลับโดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.1 ในการทดลองจะใช้เมล็ดพันธุ์ข้าว 2 ชนิด คือ พันธุ์ OC6 และ พันธุ์พวงทอง



รูปที่ 3.21 วงจรทดสอบการกระตุ้นแม่เหล็กข้าวด้วยสนามไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

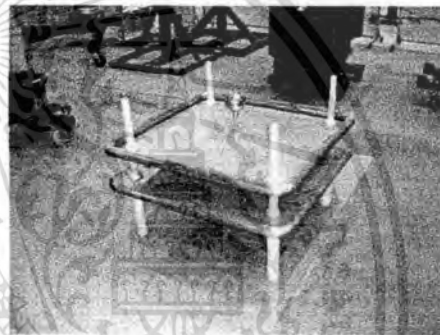
- เมื่อ
1. คือชุดควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ
 2. แหล่งจ่ายแรงดันสูง
 3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์
 4. โวลต์เตจดีไวเดอร์
 5. อุปกรณ์วัดทางด้านแรงดันต่ำ

3.4.1 การกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ มีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้



1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 600kV

2) ตู้ควบคุมการป้อนแรงดันกระแสตรง



3) Universal divider อัตราส่วน

4) แผ่นเหล็ก ขนาด 1 ม. X 1 ม.

DC 985:1 , AC 980:1 , Impulse 993:1



5) โวลต์มิเตอร์

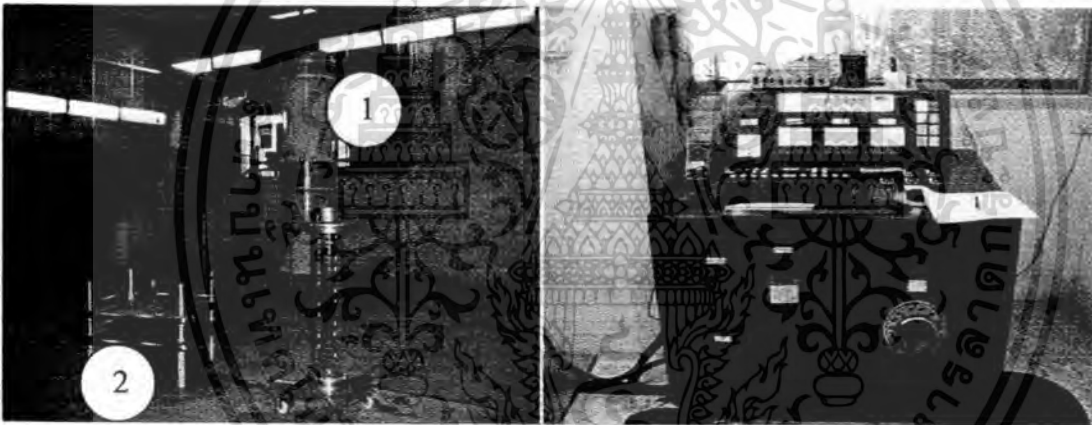
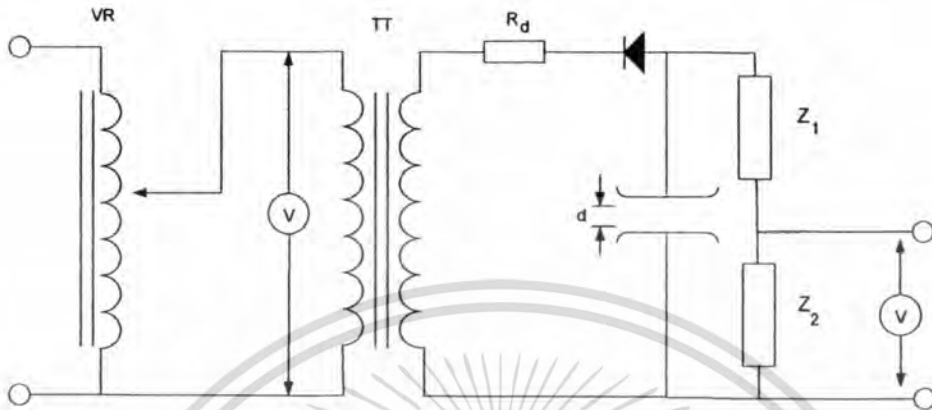
6) เมล็ดพันธุ์ข้าว

รูปที่ 3.22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ต่อดวงจรถอดลองดังรูปโดยให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 15 cm

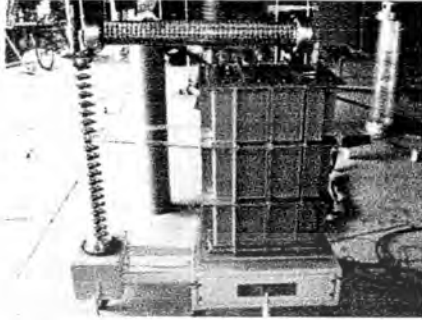


รูปที่ 3.23 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงชั่วเวลา
เมื่อ 1. คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วเวลา 2. คือ แผ่นอิเล็กโทรด

2. นำเมล็ดพันธ์ข้าวที่ต้องการกระตุ้นไปวางในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด
3. ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด 30, 45, 60 และ 75 kV เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5kV/cm ตามลำดับ
4. ทำการทดลองในแต่ละระดับแรงดันเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที
5. นำเมล็ดพันธ์ข้าวที่ผ่านการกระตุ้นเตรียมไปเพาะที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงชั่ววอก มีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้



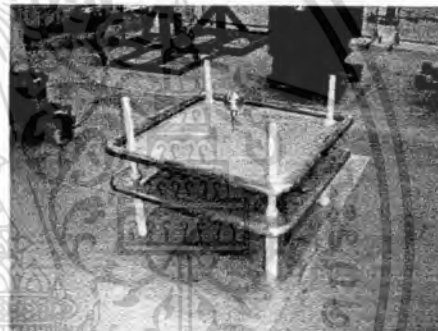
1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 100kV



2) ตู้ควบคุมการป้อนแรงดัน



3) Universal divider อัตราส่วน
DC 985:1 , AC 980:1 , Impulse 993:1



4) แผ่นเหล็ก ขนาด 1 ม. X 1 ม.



5) โวลต์มิเตอร์



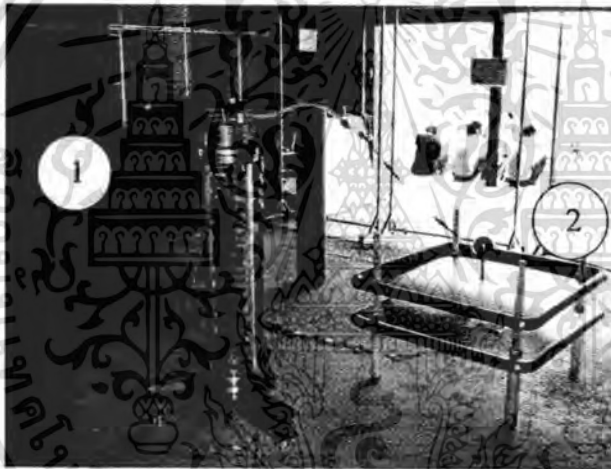
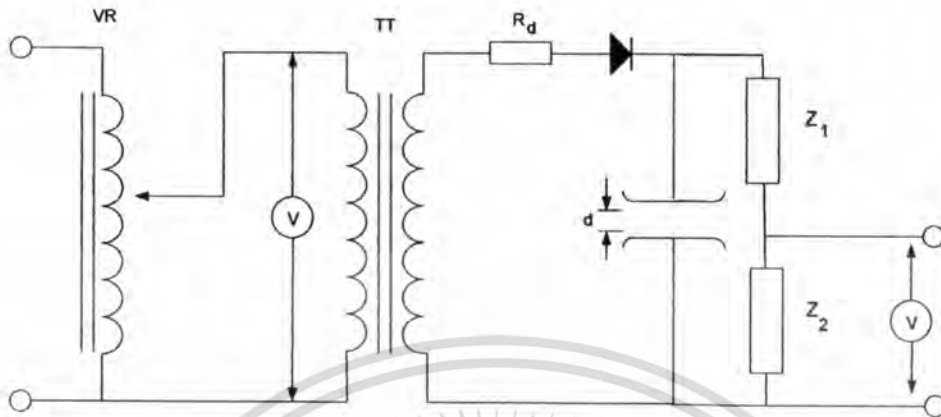
6) เมล็ดพันธุ์ข้าว

รูปที่ 3.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปโดยให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 15 cm



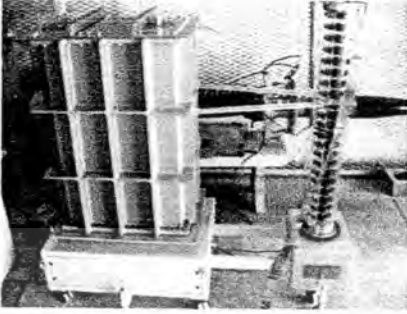
รูปที่ 3.25 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงชั่ววอก

เมื่อ 1. คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่ววอก 2. คือ แผ่นอิเล็กโทรด

2. นำเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ต้องการกระตุ้นไปวางในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด
3. ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด 30, 45, 60 และ 75 kV เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5kV/cm ตามลำดับ
4. ทำการทดลองในแต่ละระดับแรงดันเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที
5. นำเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ผ่านการกระตุ้นเตรียมไปเพาะที่ห้องปฏิบัติการภาควิทยาศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การกระตุ้นเมล็ดข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับ มีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้



1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 100kV



2) ตู้ควบคุมการป้อนแรงดัน



3) Universal divider อัตราส่วน
DC 985:1 , AC 980:1 , impulse 993:1



4) แผ่นเพลต ขนาด 1 ม. X 1 ม.



5) โวลต์มิเตอร์



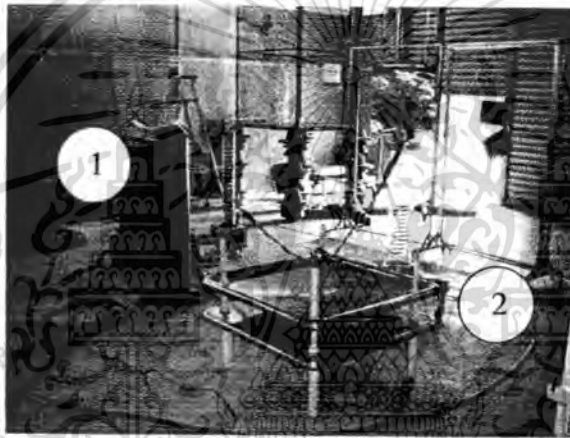
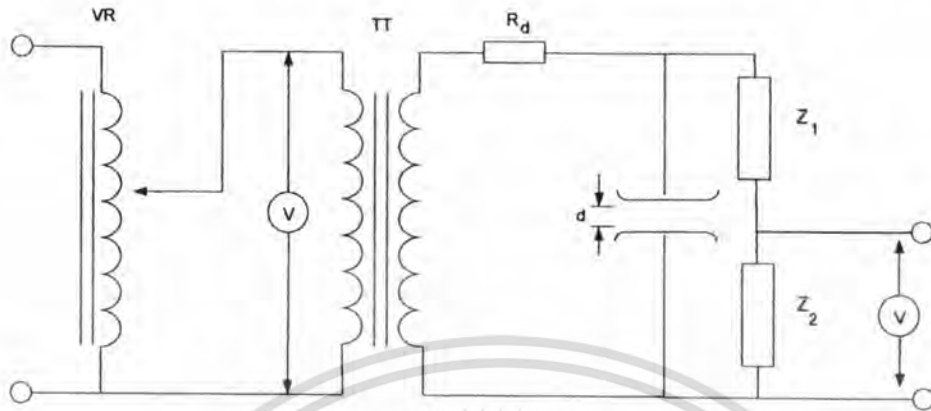
6) เมล็ดพันธุ์ข้าว

รูปที่ 3.26 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปโดยให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 15 cm



รูปที่ 3.27 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

เมื่อ 1. คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ 2. คือ แผ่นอิเล็กโทรด

2. นำเมล็ดพันซ์ข้าวที่ต้องการกระตุ้นไปวางในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด
3. ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด 30, 45, 60 และ 75 kV เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5kV/cm ตามลำดับ
4. ทำการทดลองในแต่ละระดับแรงดันเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที
5. นำเมล็ดพันซ์ข้าวที่ผ่านการกระตุ้นเตรียมไปเพาะที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การเพาะเลี้ยงเมล็ดพันธุ์ข้าว

เมื่อทำการกระตุ้นจนครบทุกค่าแล้วจึงนำข้าวที่ผ่านการกระตุ้นแล้วไปทำการเพาะเลี้ยงเพื่อวัดความยาวของรากและหาอัตราการงอกของข้าวโดยมีวิธีดังนี้

1. นำกระดาษที่ใช้ในการห่อเมล็ดข้าวมาทำการแช่น้ำกลั่นเพื่อข้าวจะได้ใช้ในการเจริญเติบโต กระดาษที่แช่น้ำกลั่นจะนำไปตากเพื่อนำน้ำกลั่นส่วนเกินออก



รูปที่ 3.28 การเตรียมกระดาษที่ใช้ในการปลูก

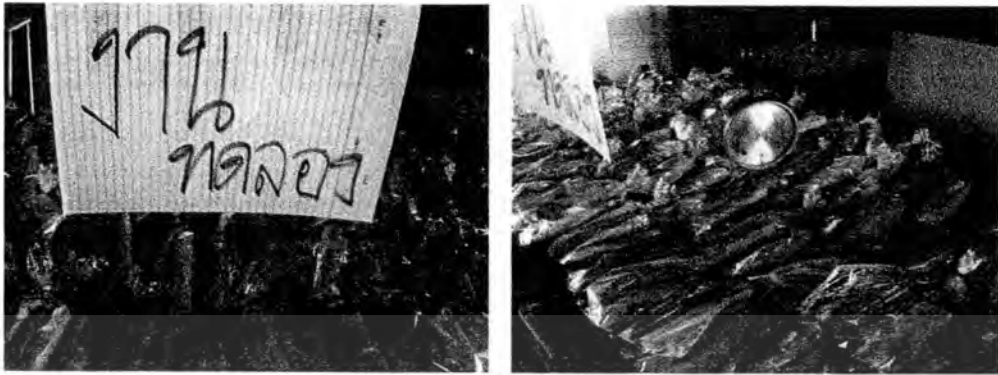
2. นำเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้นมาทำการปลูกในกระดาษที่เตรียมไว้ โดยแบ่งเป็นชุดละ 100 เมล็ดและแบ่งเป็นถุงละ 3 ชุดตามแรงดันและเวลาที่ใช้ในการทดลองแล้วมัดให้แน่น



รูปที่ 3.29 แบ่งเมล็ดข้าวออกเป็นชุดตามแรงดันและเวลาที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.การเก็บชุดเมล็ดข้าวไว้ภายใต้สภาวะห้องทดลองเป็นระยะเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.30 ชุดเมล็ดข้าวระหว่างการทดสอบ

4.เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ 7 วันนำข้าวที่เพาะไว้มาทำการวัดค่าความยาวของราก และหาอัตราการงอกของเมล็ดข้าว จดบันทึกค่าที่ได้เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.31 การวัดความยาวรากและหาอัตราการงอกของเมล็ด

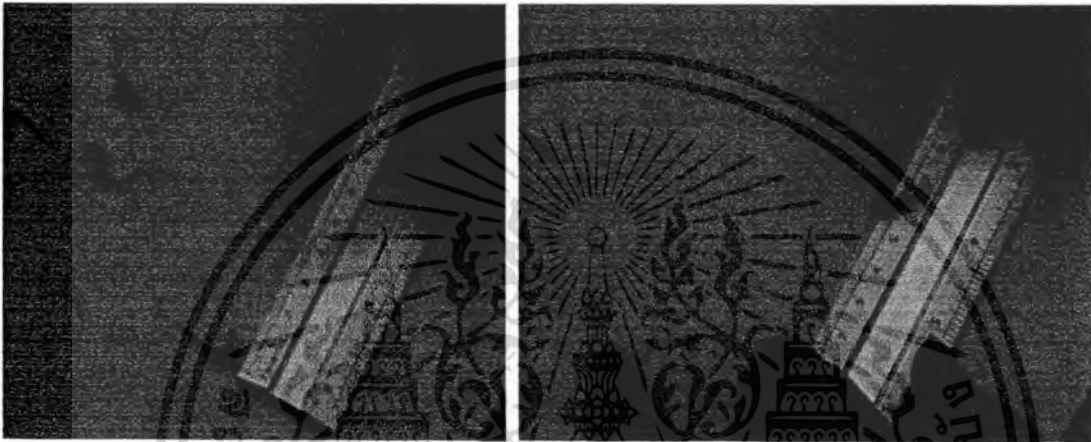
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

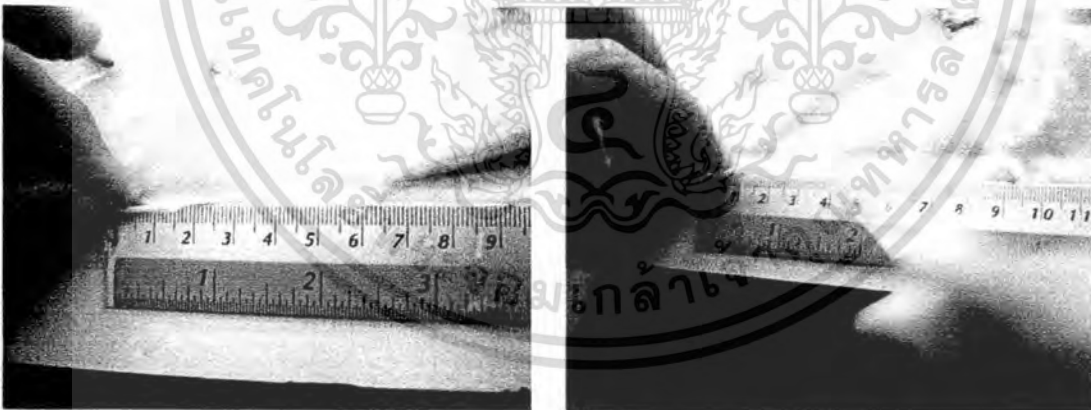
4.1 ผลการทดสอบ

หลังจากได้เพาะเลี้ยงเมล็ดข้าวพันธุ์ OC6 และ เมล็ดพันธุ์ข้าวพวงทองที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการกระตุ้นตามระยะเวลาที่กำหนดเป็นเวลา 7 วันทางผู้ช่วยวิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ผ่านการกระตุ้นเปรียบเทียบกับเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ไม่ผ่านการกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 4.1



ก)เมล็ดข้าวพันธุ์ OC6 ที่ผ่านการกระตุ้น

ข)เมล็ดข้าวพันธุ์ OC6 ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น



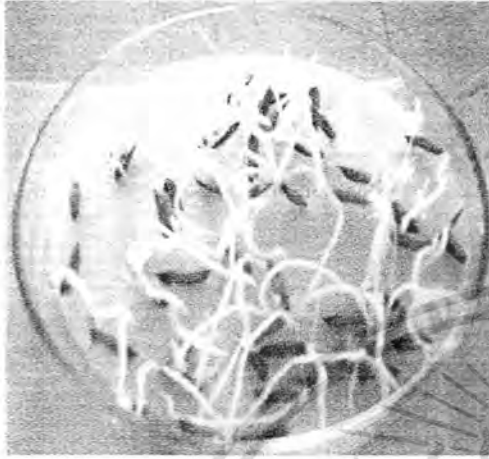
ค)เมล็ดข้าวพันธุ์พวงทองที่ผ่านการกระตุ้น

ง)เมล็ดข้าวพันธุ์พวงทองที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น

รูปที่ 4.1 ความยาวรากของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปรียบเทียบผลจากการกระตุ้น และไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าเมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

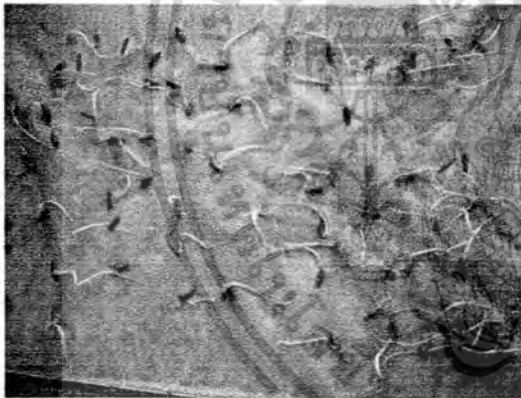
และมีลักษณะการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวแสดงดังรูปที่ 4.2



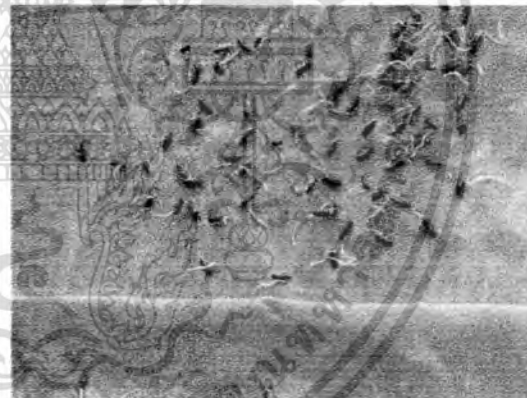
ก) เมล็ดข้าวพันธุ์ OC6 ที่ผ่านการกระตุ้น



ข) เมล็ดข้าวพันธุ์ OC6 ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น



ค) เมล็ดข้าวพันธุ์พวงทองที่ผ่านการกระตุ้น



ง) เมล็ดข้าวพันธุ์พวงทองที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น

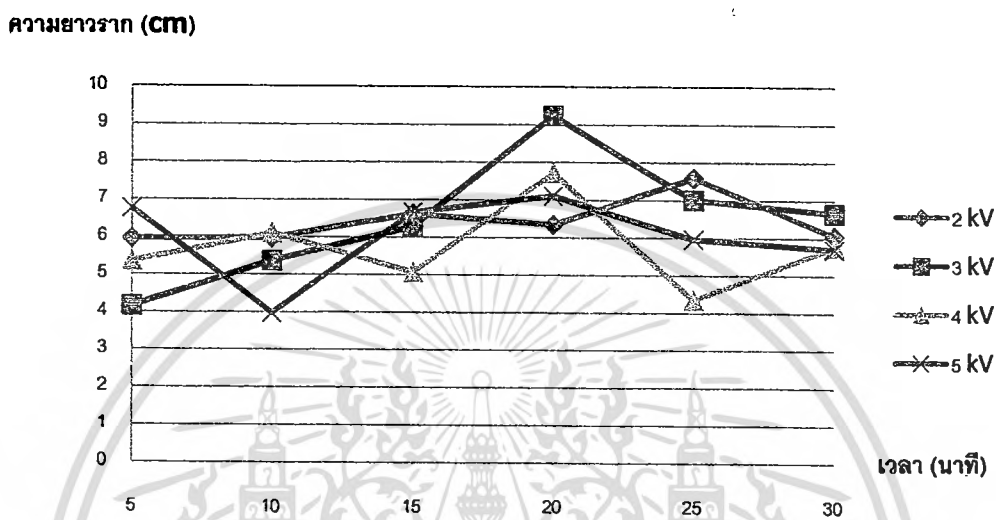
รูปที่ 4.2 ลักษณะการงอกของข้าวที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ได้ผ่านการกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

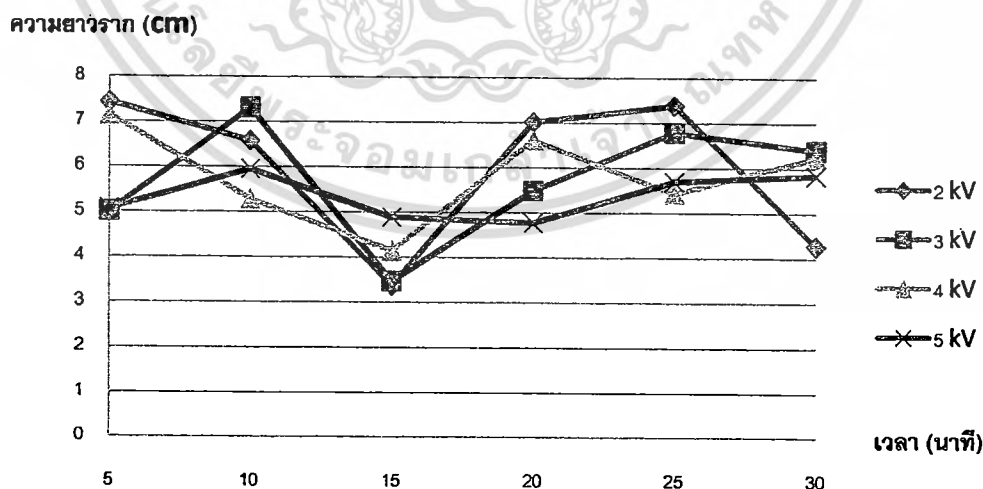
4.2 ผลการวัดค่าความยาวรากและอัตราการเจริญเติบโต

ผลการทดสอบทั้งหมดสามารถนำเสนอได้โดยใช้รูปกราฟแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.14 ตามลำดับ

4.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวรากของเมล็ดพันธุ์ OC6



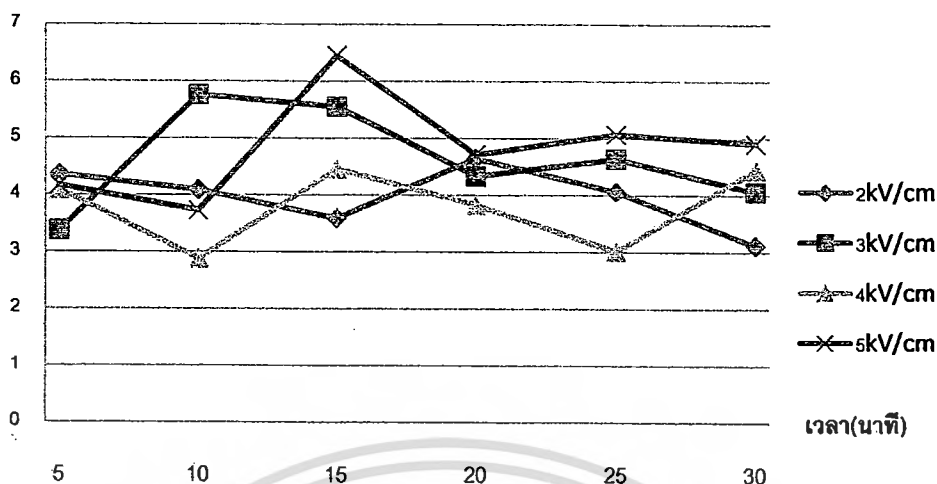
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์ฟิ่งเกี่ยวOC6)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกOC6)

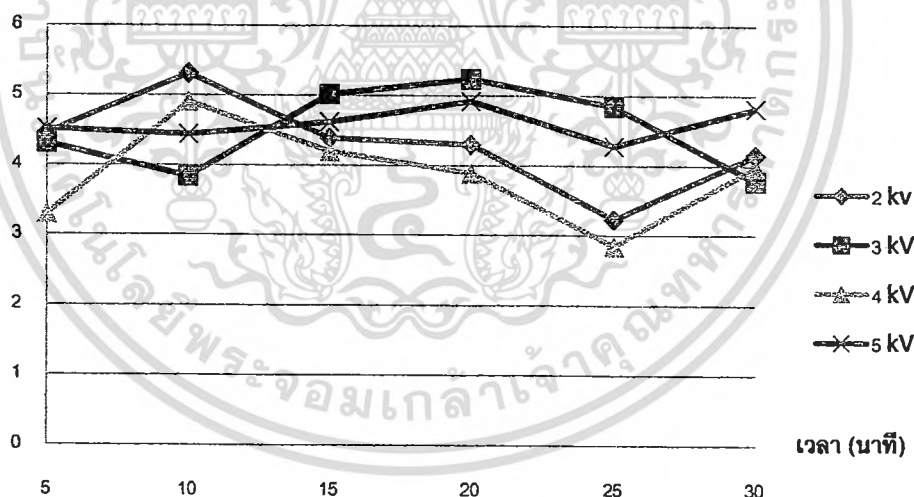
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวราก(cm)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ OC6 ฟังเกี่ยว)

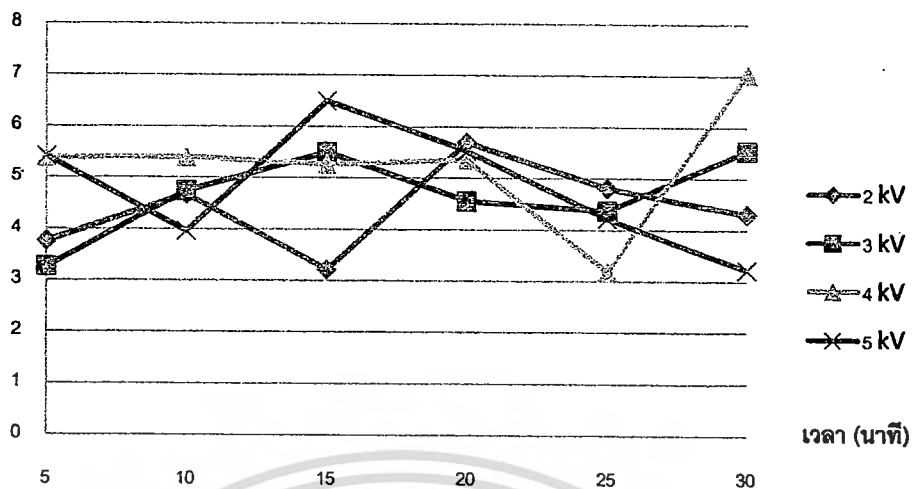
ความยาวราก (cm)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ OC6 พร้อมปลูก)

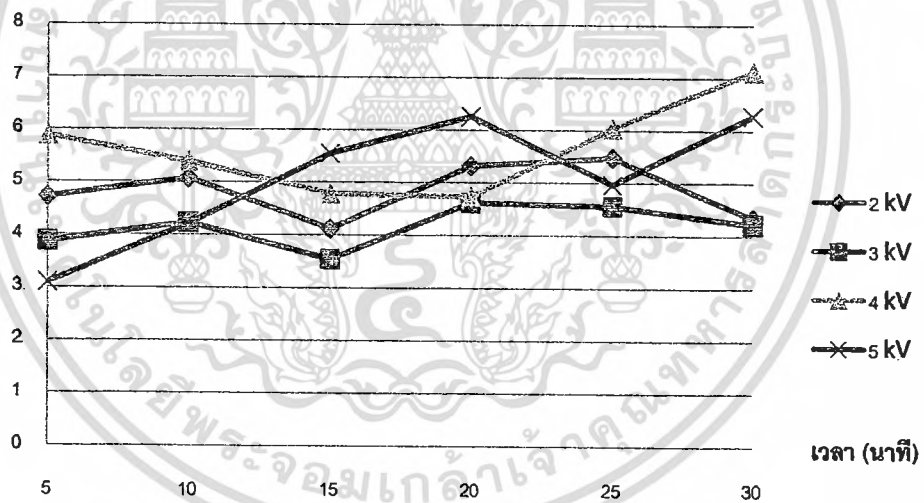
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวราก (cm)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ OC6 ฟิ่งเกี้ยว)

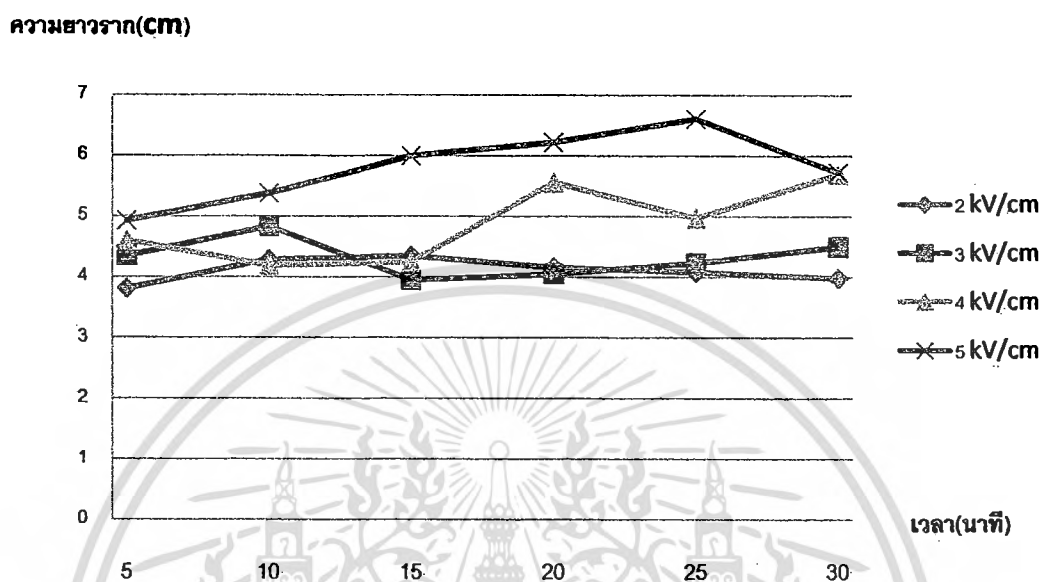
ความยาวราก (cm)



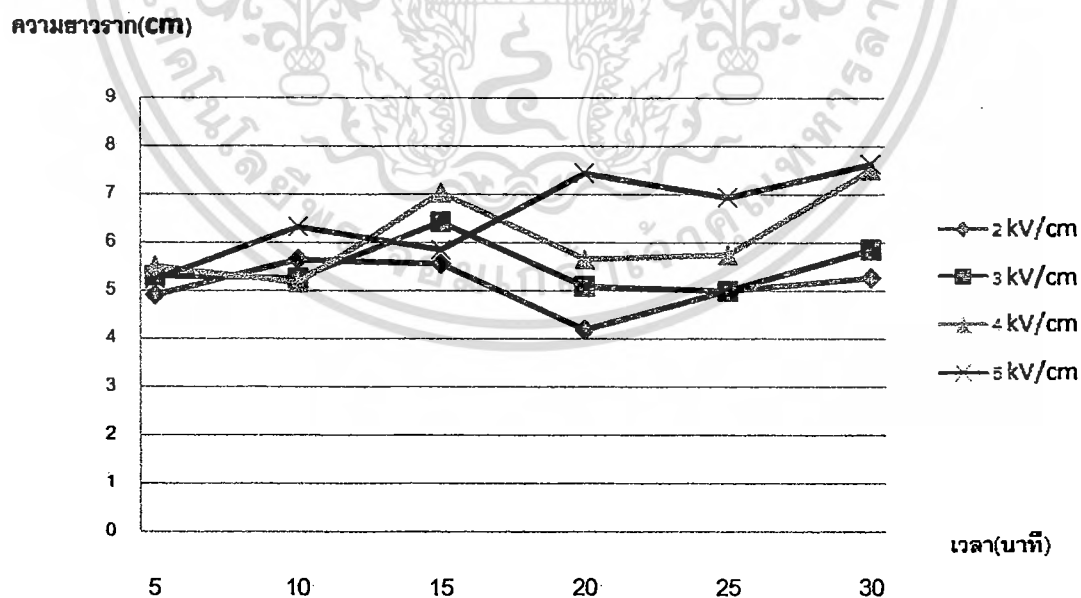
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ OC6 พร้อมปลูก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมลิตพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวรากของเมลิตพันธุ์รวงทอง



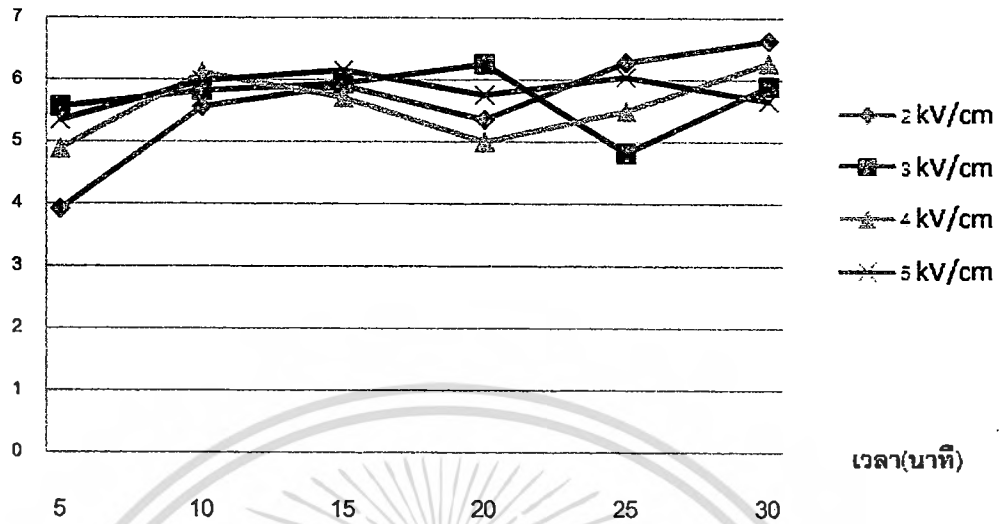
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมลิตพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมลิตพันธุ์รวงทองฟุ้งเกี่ยว)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมลิตพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก (แรงดันทดสอบ DC+ เมลิตพันธุ์รวงทองพร้อมปลุก)

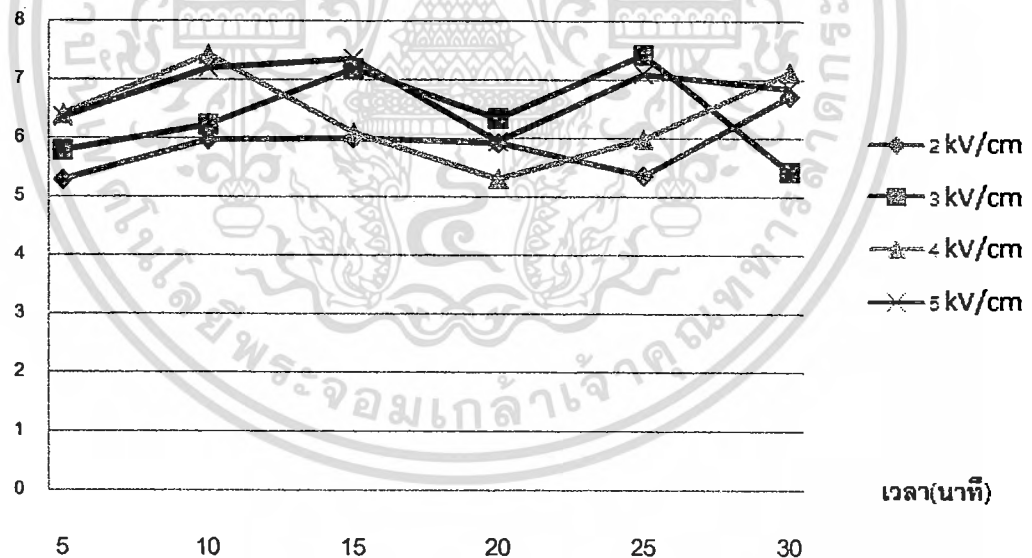
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวราก(cm)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก(แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พวงทองฟุ้งเกี่ยว)

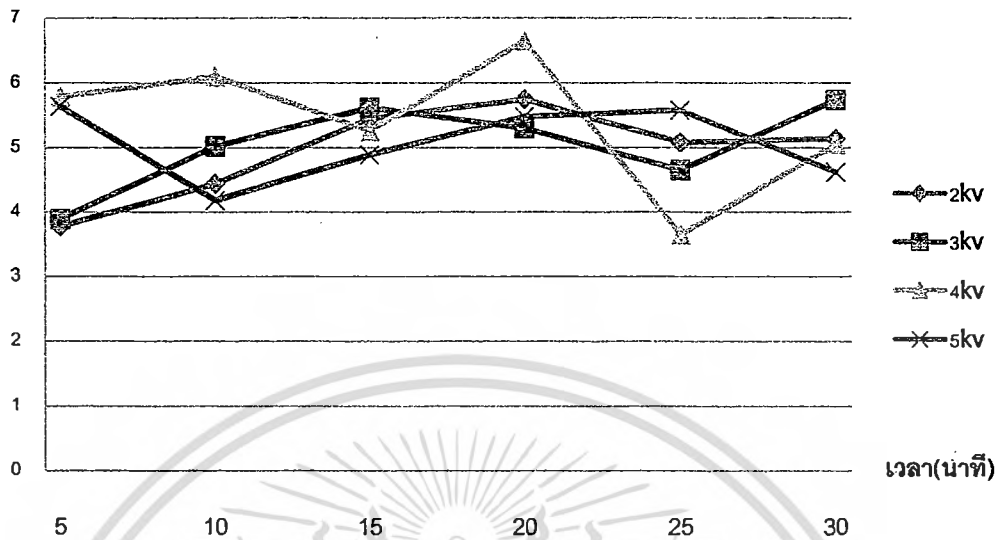
ความยาวราก(cm)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก(แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พวงทองพร้อมปลูก)

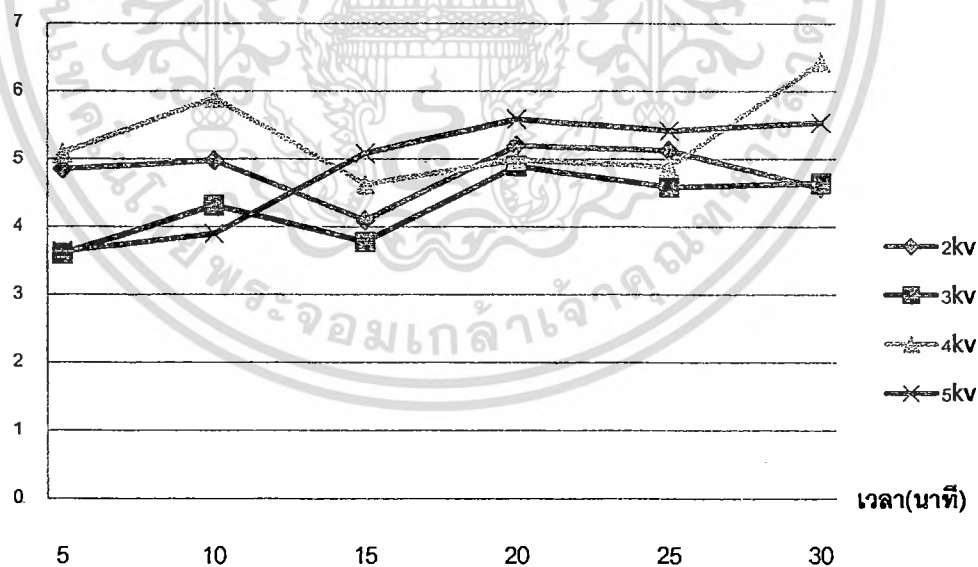
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวราก(cm)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก(แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พวงทองฟิ่งเกี้ยว)

ความยาวราก(cm)

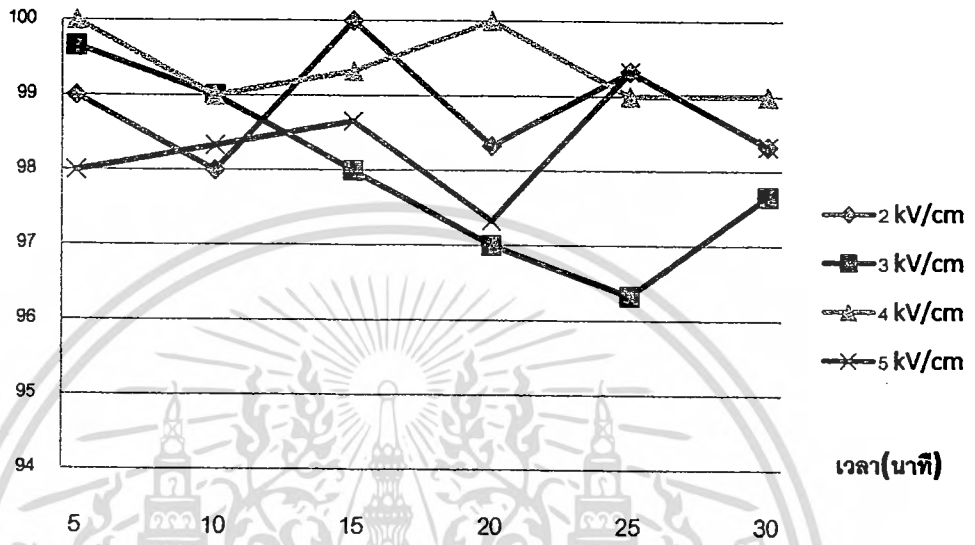


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับความยาวราก(แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พวงทองพร้อมปลุก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

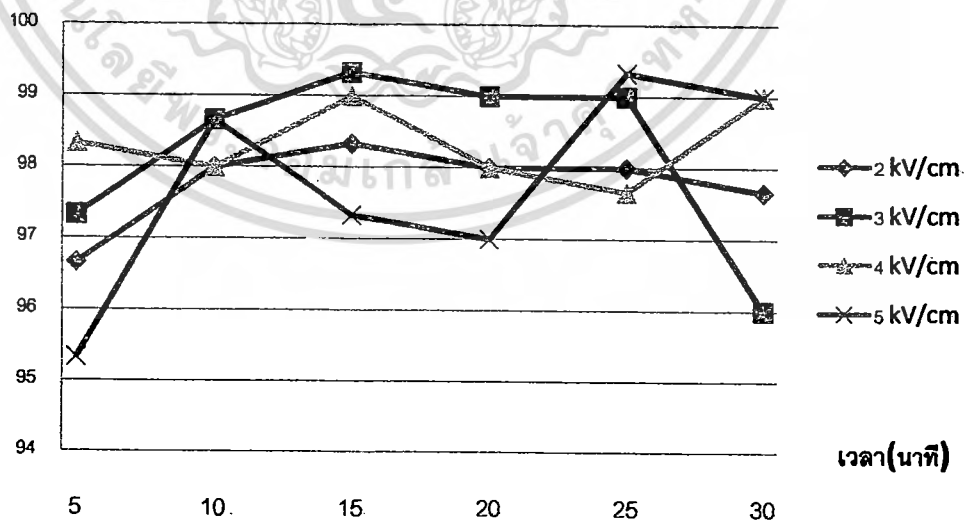
4.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว OC6

เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์ฟิ่งเกี้ยวOC6)

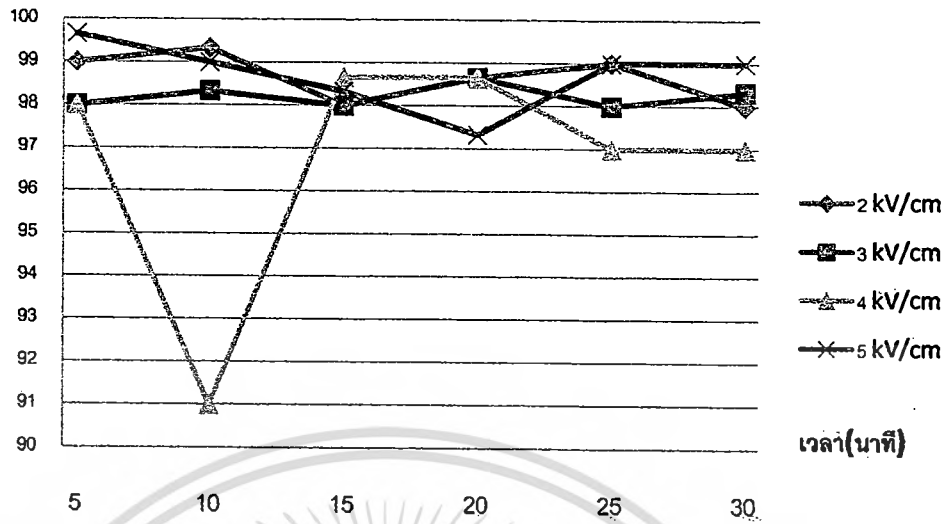
เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC+ เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกOC6)

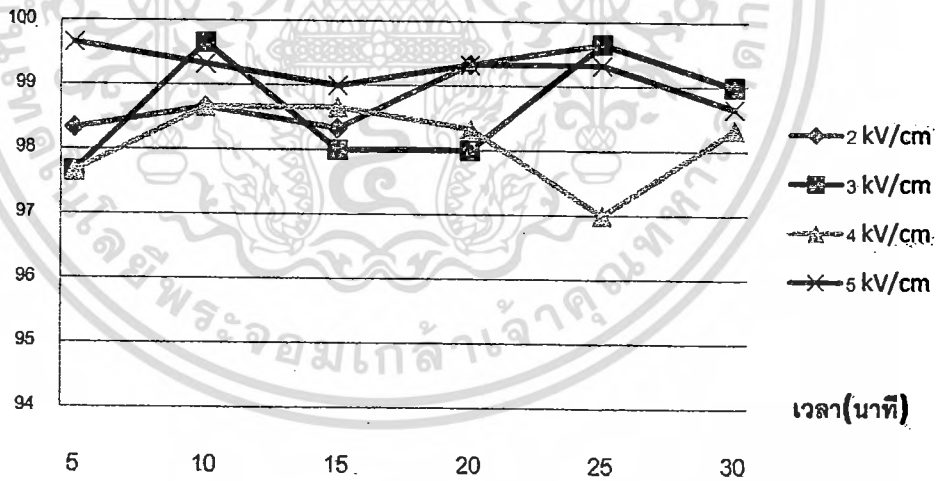
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์ฟิ่งเกี้ยวOC6)

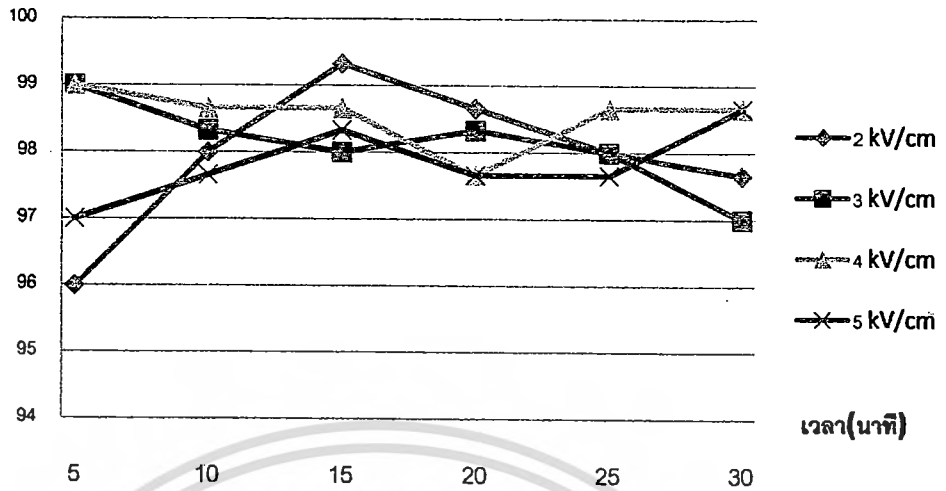
เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC- เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกOC6)

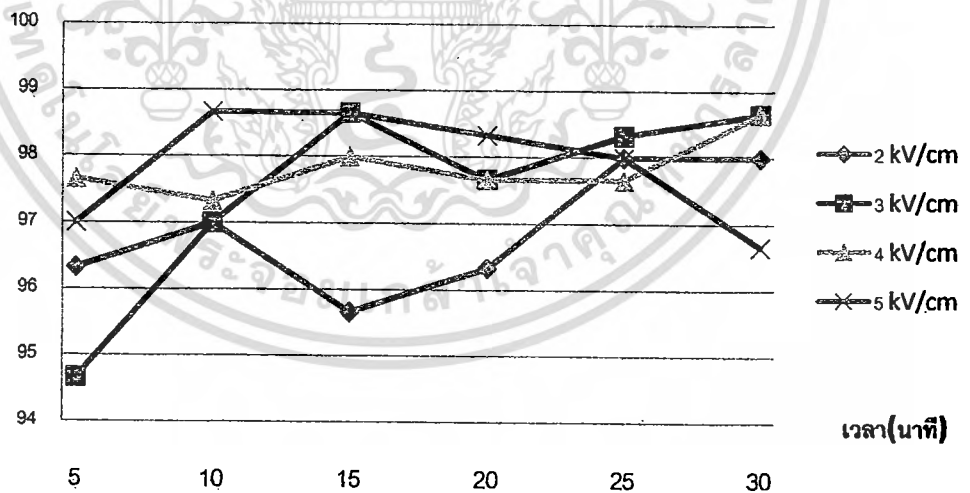
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยว OC6)

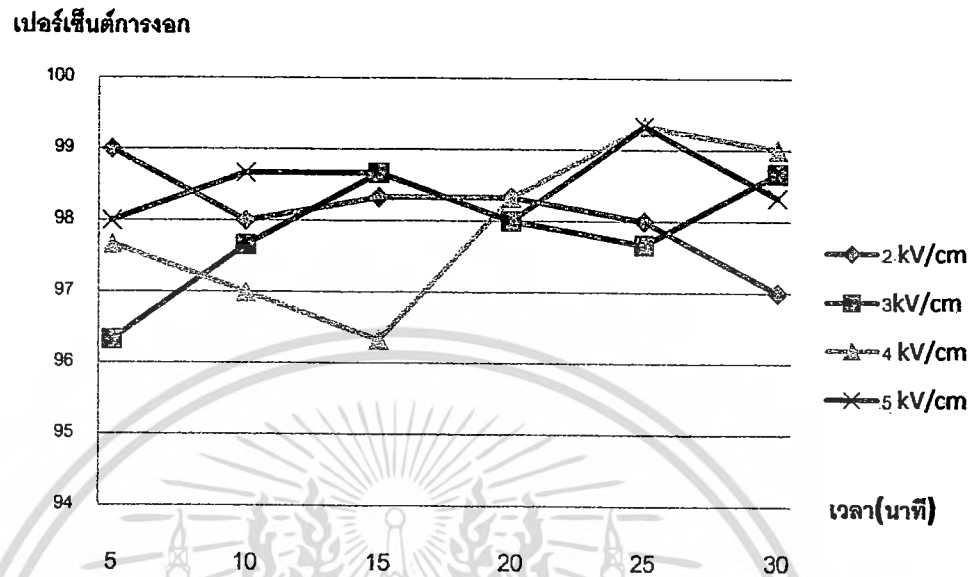
เปอร์เซ็นต์การงอก



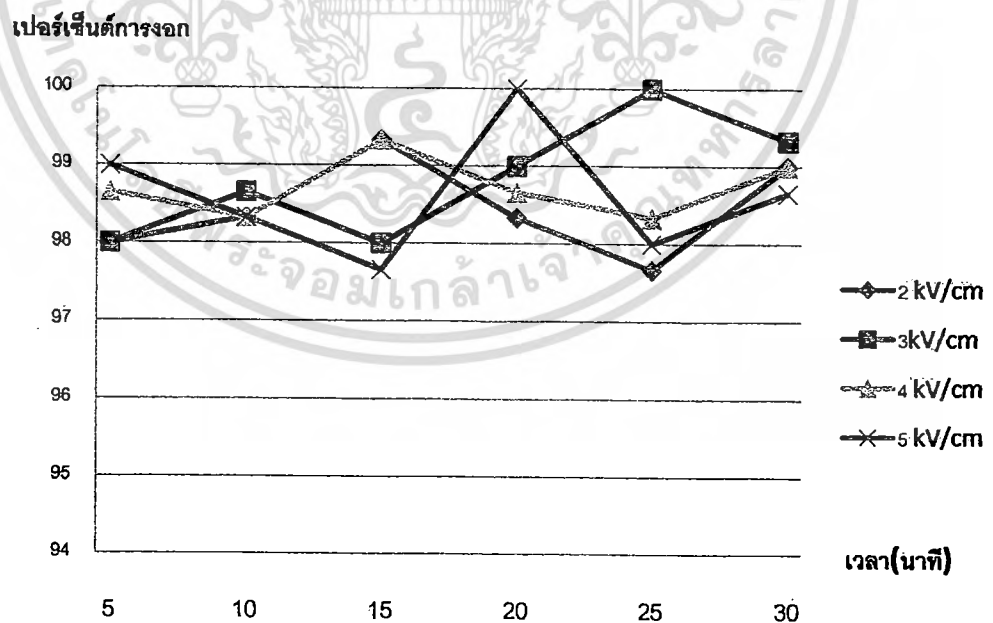
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูก OC6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมลิตพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การออกของเมลิตพันธุ์ พวงทอง



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมลิตพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การออก (แรงดันทดสอบ DC+เมลิตพันธุ์ฟิ่งเกี่ยวพวงทอง)

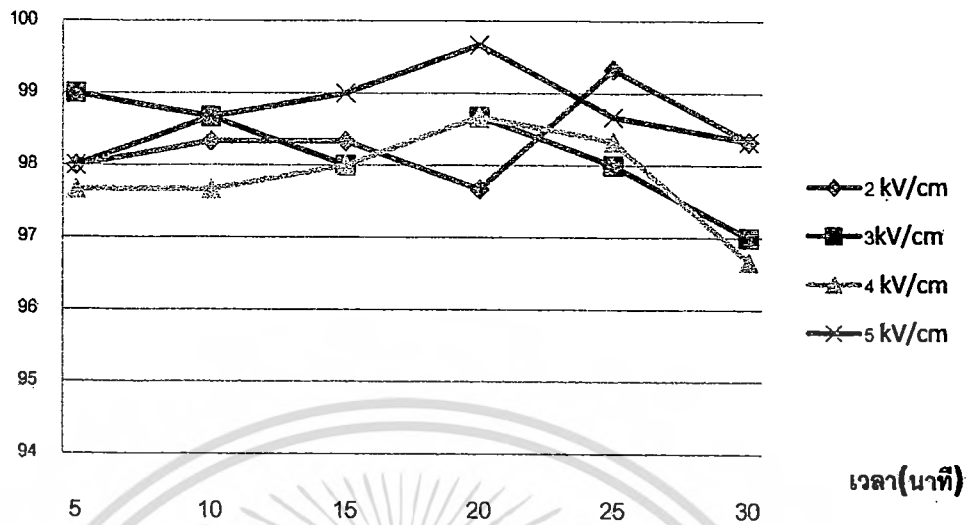


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมลิตพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับ

เปอร์เซ็นต์การออก (แรงดันทดสอบ DC+เมลิตพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง)

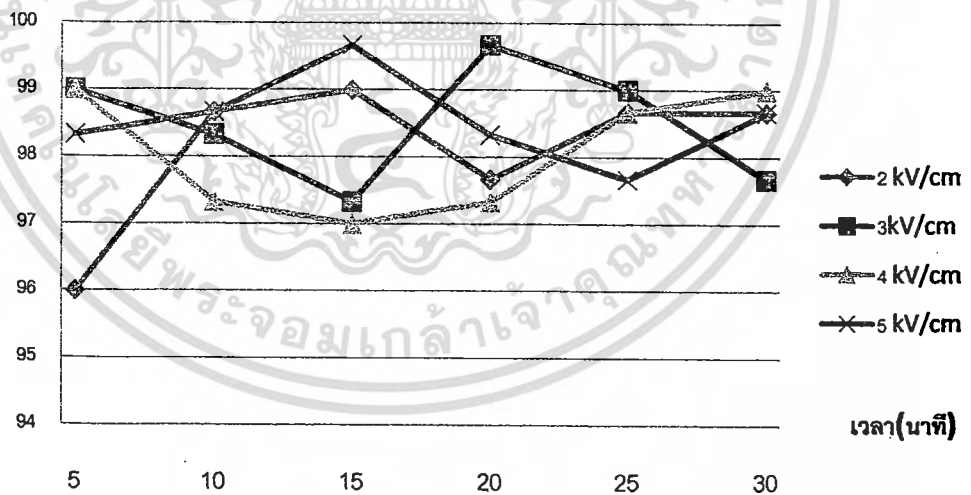
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC-เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวพวงทอง)

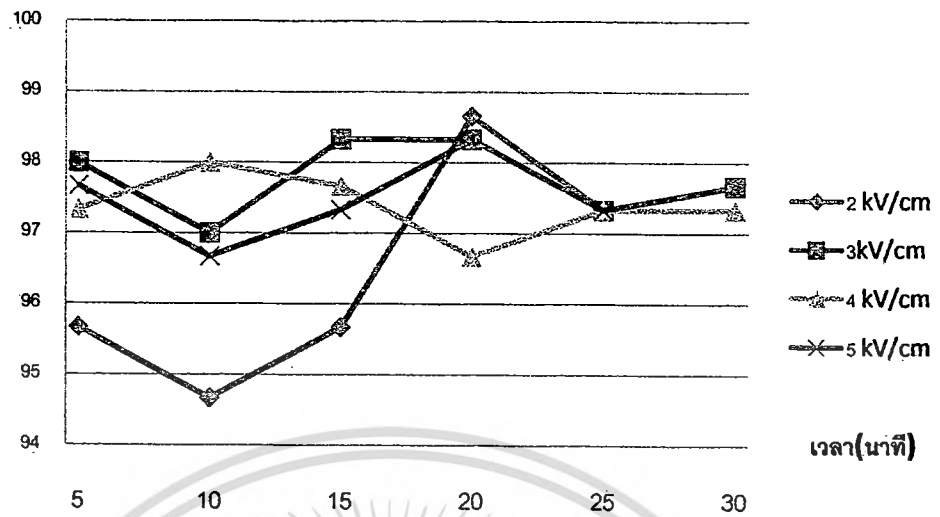
เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ DC-เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง)

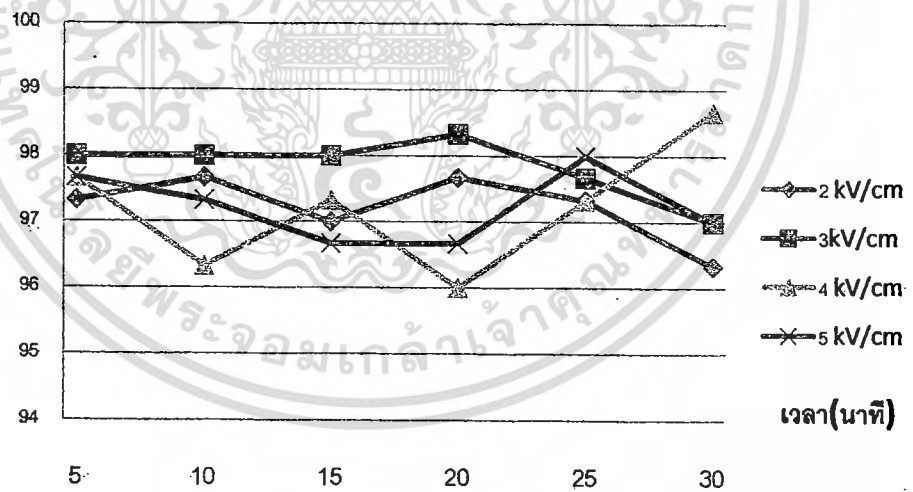
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์ฟิ่งเกี่ยวพวงทอง)

เปอร์เซ็นต์การงอก



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การงอก (แรงดันทดสอบ AC เมล็ดพันธุ์พร้อมปลุกพวงทอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลการทดลองในกรณีของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ไม่ผ่านการกระตุ้นมีรายละเอียดดังนี้ โดยที่ เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดของเมล็ดพันธุ์ข้าว OC6 เมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวมีค่า 98 เปอร์เซ็นต์ และมีความยาวรากสูงสุด 3.98 ซม.

เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดของเมล็ดพันธุ์ข้าว OC6 เมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกมีค่า 98.33 เปอร์เซ็นต์ และมีความยาวรากสูงสุด 4.04 ซม.

เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดของเมล็ดพันธุ์ข้าวพวงทองเมล็ดพันธุ์ฟุ้งเกี่ยวมีค่า 97.67 เปอร์เซ็นต์ และมีความยาวรากสูงสุด 3.56 ซม.

และเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดของเมล็ดพันธุ์ข้าวพวงทองเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกมีค่า 98.33 เปอร์เซ็นต์ และมีความยาวรากสูงสุด 4.37 ซม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทำการทดลองเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ทั้ง 2 ชนิด สามารถสรุปผลของการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าต่อความยาวรากและอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ผ่านการกระตุ้น

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์ที่เกี่ยวโดยพิจารณาจากความยาวรากสูงสุด

Case	พันธุ์ข้าว OC6				พันธุ์ข้าวพวงทอง			
	DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น	DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น
ความยาวรากมากที่สุด(cm)	9.24	6.45	7.04	3.98	6.61	6.64	6.65	3.56
E (kV/cm)	3	5	4	-	5	2	4	-
เวลา(นาท)	20	15	30	-	25	30	20	-
เปอร์เซ็นต์การงอก	97	98.33	98.66	98	99.33	98.33	96.67	97.67

จากตารางจะเห็นได้ว่าในข้าวพันธุ์ OC6 เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าความยาวรากมากที่สุดคือ 9.24 cm ที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 kV/cm เวลา 20 นาที และมีเปอร์เซ็นต์การงอก 97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้าวพันธุ์พวงทองเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน AC จะมีค่าความยาวรากมากที่สุดคือ 6.65 cm ที่สนามไฟฟ้า 4 kV/cm เวลา 20 นาทีและมีเปอร์เซ็นต์การงอก 96.67 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์ฟิ่งเกี้ยวโดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุด

Case	พันธุ์ข้าว OC6				พันธุ์ข้าวพวงทอง			
	แรงดัน DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น	DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น
เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุด	100 100 100	99.66	99.33	98	99.33 99.33	99.67	98.66	97.67
E (kV/cm)	2 4 4	5	2	-	4 5	5	2	-
เวลา(นาที)	15 5 20	5	15	-	25 25	20	20	-
ความยาวราก (cm)	6.63 5.36 7.73	4.17	3.21	3.98	4.91 6.61	5.76	5.75	3.56

จากตารางจะเห็นได้ว่าข้าวพันธุ์ OC6 เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุด 100เปอร์เซ็นต์โดยให้ความยาวรากไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจึงได้นำเสนอมาทุกกรณี ของการกระตุ้นด้วยแรงดันสูงกระแสตรงชั่ววอก ที่เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ สนามไฟฟ้า 4kV/cm เวลา 20 นาที และมีความยาวราก 7.73 cm ส่วนในข้าวพันธุ์พวงทอง เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC- จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดคือ 99.67 เปอร์เซ็นต์ ที่สนามไฟฟ้า 5 kV/cm เวลา 20 นาทีและมีความยาวราก 5.76 cm

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกโดยพิจารณาจากความยาวรากสูงสุด

Case	พันธุ์ข้าว OC6				พันธุ์ข้าวพวงทอง			
	แรงดัน DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น	DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น
ความยาวรากมากที่สุด(cm)	7.39	5.31	7.12	4.04	7.63	7.43 7.43	6.43	4.37
E (kV/cm)	2	2	4	-	5	3 4	4	-
เวลา(นาที)	25	10	30	-	30	25 10	30	-
เปอร์เซ็นต์การงอก	98	98.66	98.66	98.33	98.66	99 97.33	98.67	98.33

จากตารางจะเห็นได้ว่าในข้าวพันธุ์ OC6 เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าความยาวรากมากที่สุดคือ 7.39 cm ที่ค่าสนามไฟฟ้า 2 kV/cm เวลา 25 นาที และมีเปอร์เซ็นต์การงอก 98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในข้าวพันธุ์พวงทอง เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าความยาวรากมากที่สุดคือ 7.63 cm ที่สนามไฟฟ้า 5 kV/cm เวลา 30 นาที และมีเปอร์เซ็นต์การงอก 98.66 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองของเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกโดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุด

Case	พันธุ์ข้าว OC6				พันธุ์ข้าวพวงทอง			
	แรงดัน DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น	DC+	DC-	AC	ไม่ได้รับการกระตุ้น
เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุด	99.33 99.33	99.66 99.66 99.66 99.66	98.67	98.33	100 100	99.67 99.67	98.67	98.33
E (kV/cm)	3 5	2 3 3 5	5	-	3 5	3 5	4	-
เวลา(นาที)	15 25	25 10 25 5	10	-	25 20	20 15	30	-
ความยาวราก (cm)	3.47 5.70	3.23 3.84 4.85 4.52	4.21	4.04	5.00 7.44	6.34 7.36	6.43	4.37

จากตารางจะเห็นได้ว่าข้าวพันธุ์ OC6 เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC- จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดคือ 99.66เปอร์เซ็นต์โดยให้ความยาวรากไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจึงได้นำเสนอมาทุกกรณี ของการกระตุ้นด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบที่เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดคือ 99.66 เปอร์เซ็นต์ สนามไฟฟ้า 3kV/cm เวลา 25นาทีและความยาวราก 4.85 cm ส่วนในข้าวพันธุ์พวงทอง เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่สนามไฟฟ้า 5 kV/cm เวลา 20 นาที และมีความยาวราก 7.44 cm

จากค่าผลการทดลองที่สรุปออกมาจากตารางจะสามารถนำไปสรุปได้ดังนี้

จากข้อมูลผลการทดลองในข้าวพันธุ์ OC6 เมื่อดูจากตารางจะพบว่าที่เมล็ดพันธุ์ข้าวฟุ้งเกี่ยวเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วย แรงดัน DC+ จะมีค่าความยาวรากที่มากที่สุดที่ 9.24 ซม. และเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดที่การงอก 100 เปอร์เซ็นต์ ที่สนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 3-4 kV/cm โดยใช้เวลาระตุ้น 20-25 นาที ส่วนที่เมล็ดพันธุ์ข้าวพร้อมปลูกเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าทำให้ความยาวรากมากที่สุดที่ 7.39 ซม. ที่ช่วงสนามไฟฟ้าประมาณ 2-3 kV/cm โดยมีเวลาระตุ้น 25 นาที ส่วนเปอร์เซ็นต์การงอกนั้นที่การงอก 98.66 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงดัน DC- จะมีค่าที่ดีกว่าแต่ในความเป็นจริงแล้วในทางปฏิบัติ ค่าเปอร์เซ็นต์การงอกที่แรงดัน DC- และแรงดัน DC+ มีค่าต่างกัน 0.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจจะถือได้ว่าแตกต่างกันน้อยมาก และในส่วนของกรณีเมล็ดพันธุ์ที่ไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า เมล็ดพันธุ์ข้าวฟุ้งเกี่ยวจะมีความยาวรากที่มากที่สุด 3.98 ซม. และเปอร์เซ็นต์การงอก 98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกจะมีความยาวรากที่มากที่สุด 4.04 ซม. และเปอร์เซ็นต์การงอก 98.33 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลผลการทดลองในข้าวพันธุ์พวงทอง เมื่อดูจากตารางจะพบว่าความยาวรากที่เมล็ดพันธุ์ข้าวฟุ้งเกี่ยวเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วย แรงดัน DC+ ,DC- ,AC จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 6.61 , 6.64 และ 6.65 ซม. ตามลำดับ ส่วนที่เปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC- ซึ่งมีค่าต่างกันไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ คือ 99.67 และ 99.33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนที่เมล็ดพันธุ์ข้าวพร้อมปลูกเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่าความยาวรากมากที่สุดที่ 7.63 ที่ค่าสนามไฟฟ้า 5 kV/cm โดยมีเวลาระตุ้น 30 นาที ส่วนเปอร์เซ็นต์การงอกมากที่สุดที่การงอก 100 เปอร์เซ็นต์ เกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดัน DC+ จะมีค่ามากที่สุด ที่ค่าสนามไฟฟ้า 5 kV/cm โดยมีเวลาระตุ้น 20 นาที และในส่วนของกรณีเมล็ดพันธุ์ที่ไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า เมล็ดพันธุ์ข้าวฟุ้งเกี่ยวจะมีความยาวรากมากที่สุดที่ 3.56 ซม. และเปอร์เซ็นต์การงอก 97.67 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกจะมีความยาวรากมากที่สุดที่ 4.37 ซม. และเปอร์เซ็นต์การงอก 98.33 เปอร์เซ็นต์

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากสรุปผลการทดลองของข้อมูลทั้งสองข้อมูล จะพบว่าการกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ข้าว OC6 และเมล็ดพันธุ์ข้าวพวงทองจะให้ผลที่แตกต่างกันไป ตามชนิดของพันธุ์ข้าวอาจจะเป็นเพราะระยะเวลาของการเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวก่อนที่จะนำมาทำการทดลอง จากข้อมูลของเมล็ดพันธุ์ OC6 ในส่วนของเมล็ดพันธุ์ที่เกี่ยวพบว่าหลังจากที่ชาวบ้านได้ทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 วัน จึงได้เอามาทำการทดลอง ในส่วนของเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกนั้นชาวบ้านได้ทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 เดือนก่อนที่จะนำมาทดลอง กรณีของเมล็ดพันธุ์พวงทอง ส่วนของเมล็ดพันธุ์ที่เกี่ยวนั้นได้ทำการทดลองหลังจากที่ชาวบ้านได้ทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน ในส่วนของเมล็ดพันธุ์พร้อมปลูกนั้นชาวบ้านได้ทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ทิ้งไว้เป็นเวลา 4 เดือน นอกจากนี้การเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์อาจจะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยว่า มีความสมบูรณ์มากน้อยแค่ไหน เวลาการเตรียมเมล็ดพันธุ์ใช้เวลานานเท่าใด รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันของห้องทดลอง และวิธีการเพาะเลี้ยงเมล็ดพันธุ์ลักษณะการให้น้ำ หรือเทคนิคต่างๆที่ไม่เหมือนกันของแต่ละคนที่ทำการทดลองดังนั้น การทดลองทำการกระตุ้นเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสนามไฟฟ้า ควรทำการทดลองในกรณีต่างๆที่เป็นไปได้ทั้งหมดโดยวิเคราะห์ถึงผลตัวแปรต่างๆด้วย เมื่อทราบผลดังกล่าวแล้วจะสามารถควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวและทำให้ผลการทดลองมีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น

และจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าให้กับเมล็ดข้าวมีส่วนส่งผลให้ความยาวรากของต้นข้าวมากขึ้นจริงโดยมีอัตราการงอกที่เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าสามารถสรุปว่าทำให้ข้าวมีคุณสมบัติดีขึ้นจริงๆ เพราะจำเป็นจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติม ในข้าวที่กระตุ้นไปแล้วเมื่อให้ผลผลิตออกมา คุณภาพคุณค่าทางอาหารของข้าวที่ผ่านการกระตุ้นจะยังคงเหมือนเดิมหรือไม่ หรืออาจจะด้อยกว่าเดิม สำหรับในกรณีของลูกหลานต้นข้าวรุ่นถัดไปมีลักษณะกลายเป็นพันธุ์หรือไม่หรืออาจจะมีลักษณะด้อยไม่สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ทำการเพาะปลูก สิ่งต่างๆเหล่านี้เป็นสิ่งที่รอการค้นคว้าหรือทำการวิจัยต่อไปในอนาคต งานวิจัยชิ้นนี้เป็นแค่งานวิจัยเพื่อหาผลการทดลองสมมุติฐานเบื้องต้นเท่านั้นเอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] MATTHEW N. O. SADIKU, "Numerical Technique In Electromagnetics"
SECOND EDITION
- [3] นายอุทัย ทาสีและคณะ, "การศึกษาการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอโดยใช้ โปรแกรม FEM", ปรินทิพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ปีการศึกษา 2547
- [4] J.KUFFEL ,E. KUFFEL ,W.S ZAENGL , "High Voltage Engineering Fundamentals," 2000
- [5] N. Giao Trinh , " ELECTRODE DESIGN FOR TESTING IN UNIFORM FIELD GAPS," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 3 May/June 1980
- [6] Matlab version 7.7 , <http://www.mathworks.com>
- [7] Autocad version 2007 , <http://usa.autodesk.com/>
- [8] COMSOL version 3.3 , <http://www.comsol.com/>