การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของข้าว

A STUDY OF ELECTRIC FIELD EFFECT TO THE RICE GROWING

ธญาณุตม์ รอดเจริญ
THYANUCH ROTCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

ISBN 974-151-094-2

การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของข้าว

A STUDY OF ELECTRIC FIELD EFFECT TO THE RICE GROWING

ธญาณุตม์ รอดเจริญ
THYANUCH ROTCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2547

ISBN 974-151-094-2

A STUDY OF ELECTRIC FIELD EFFECT TO THE RICE GROWING

THYANUCH ROTCHAROEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

ISBN 974-151-094-2

COPYRIGHT 2004
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของข้าว
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธญาณุตม์ รอดเจริญ
รหัสประจำตัว	43061162
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอผลกระทบของสนามไฟฟ้าจากแรงดันแรงสูงกระแสตรงที่จ่ายให้กับต้นข้าว โดยมีการเปรียบเทียบจากตำแหน่งการวางเมล็ด และแนวของสนามไฟฟ้า ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของข้าว โดยเปรียบเทียบการเจริญเติบโต 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าที่มีขนาดถึง 28.5 kV มี 2 แบบ คือสนามไฟฟ้าแนวตั้งและสนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เป็นเวลา 7 วัน โดยมีการวางตำแหน่งของเมล็ด 2 แบบ คือวางเมล็ดแนวขนานกับสนามไฟฟ้า และวางเมล็ดแนวขวางกับสนามไฟฟ้า มีการวัดผลเปรียบเทียบจากความสูงของลำต้นความยาวของราก และนำผลที่วัดได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ และมีการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่มีผลกับการเจริญเติบโตของข้าว โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการวิเคราะห์หาค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าว ผลการทดลองที่ได้คือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตทั้ง 7 วัน มีค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 21.5% และค่าเฉลี่ยความยาวของรากมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 13.5%

Thesis Title	A study of electric field effect to the rice growing
Student	Miss Thyanuch Rotcharoen
Student ID.	43061162
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

An effect of high voltage direct current (HVDC) electric field applying on the growth of rice is presented. The comparison is done under the condition of with electric field up to 28.5 kV and without electric field. The rice plant is experimented under electric field condition at 7 days. The positions of rice laying are tested at vertical and horizontal and comparing the results with and without electric field respectively. The data are recorded for height of the stems the length of the roots. The effect of electric field positioning of rice growing is analyzed based on the statistic analysis comparing to simulated result using finite element. The rusult is found that the average growth of height of the stems and the length of the roots increased by 21.5 and 13.5 per cent, respectively, compared to those of without electric fileld.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในการอบรมสั่งสอนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ จึงขอกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ Prof.Dr. Shuichi Nitta ผู้เชี่ยวชาญพิเศษของ JICA ประเทศญี่ปุ่น เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำ และตรวจสอบความถูกต้องในการเขียนบทความทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำงานวิจัยทางด้านผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสิ่งมีชีวิต และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ ผศ.ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ และกรุณาให้ใช้ห้องในการทดลองงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และอาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้กรุณาแนะนำเรื่องการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนท์อิลิเมนต์

ขอขอบพระคุณ ผศ.พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก ผู้ที่ทำให้ผู้วิจัยได้สนใจงานวิจัยด้านผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งมีชีวิต ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัย และสนับสนุนให้เข้าร่วมประชุมวิชาการ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณ เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์ วิศวกร บริษัทซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย ที่ให้คำแนะนำเรื่องการใช้โปรแกรม Ansys และให้คำปรึกษาตลอด ผู้วิจัยรู้สึกประทับใจอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ช่วยสนับสนุนทางด้านข้อมูลของระบบส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และสถาบันวิจัยข้าวปทุมธานี ที่ให้ข้อมูลทางวิชาการเรื่องข้าว

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณต่อบุพการีรวมทั้งพี่ชายและพี่สาวเป็นอย่างสูง ที่ได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและส่งเสียให้ได้เล่าเรียน ตลอดจนเพื่อนๆ น้องๆ นักศึกษาทุกท่านที่ช่วยเหลือทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี สำหรับคุณงามความดีอันใด ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธญาณุตม์ รอดเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	4
บทที่ 2 ระบบที่ใช้ในงานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้า	6
2.1 บทนำ	6
2.2 สนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	7
2.2.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	8
2.2.2 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดระหว่างเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	10
2.2.3 การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	12
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้า	12
2.3.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า	13
2.3.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	14
2.3.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	15
2.3.4 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน	17
2.4 บทสรุป	18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบแหล่งจ่ายแรงไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 20
3.1 บทนำ 20
3.2 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง 22
3.2.1 สร้างแรงดันสูงกระแสตรงด้วยวิธีเรคติฟายเออร์ 23
3.2.2 วงจรเรคติฟายเออร์เต็มคลื่น 25
3.2.3 ตัวเก็บประจุกรองกระแส 26
3.2.4 การคำนวณหาแฟคเตอร์ระลอกเมื่อใช้วงจรมีตัวเก็บประจุกรองกระแส 28
3.2.5 วงจรทวีแรงแบบเต็มคลื่น 29
3.2.6 การหาขนาดของไดโอด 30
3.2.7 การคำนวณหาแรงดันระลอก 30
3.2.8 การคำนวณหาแรงดันตก 31
3.3 แหล่งจ่ายไฟแรงสูงกระแสตรง 50 kV 31
3.3.1 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแรงสูงกระแสตรง 31
3.3.2 การออกแบบวงจรและออกแบบคาปาซิเตอร์ 32
3.3.3 การหาขนาดของหม้อแปลง 33
3.3.4 การออกแบบโครงสร้างและลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ที่เหมาะสม 34
3.3.5 การออกแบบหม้อแปลง 36
3.3.6 การออกแบบโครงสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ 36
3.3.6.1 การจัดวางคาปาซิเตอร์และการจัดวางไดโอด 36
3.3.6.2 การออกแบบโครงสร้าง 38
3.4 การทดสอบวงจรทวีแรงดัน 3 Stage 40
3.4.1 ขั้นตอนการทดสอบวงจรทวีแรงดัน 3 Stage 42
3.5 การนำแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรงมาใช้ในงานวิจัย 45

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานไฟไนท์อิลิเมนต์ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า 47
4.1 บทนำ 47
4.2 ขั้นตอนวิธีทางไฟไนท์อิลิเมนต์ 47

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3 การนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์มาใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้า......49

4.3.1 ลักษณะการกระจายระดับแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรด สร้างสนามไฟฟ้า......50

4.4 บทสรุปและวิเคราะห์ผล......55

บทที่ 5 โครงสร้างของเมล็ดข้าว......56

5.1 บทนำ......56

5.2 ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าว......57

5.2.1 ส่วนหุ้มเมล็ดหรือส่วนหุ้มผล......58

5.2.2 เนื้อผล......58

5.3 การเจริญเติบโตของต้นข้าว......59

5.3.1 การงอกของเมล็ดข้าว......59

5.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า......61

5.3.3 ระยะการเจริญทางลำต้นและใบ......62

5.3.4 ระยะแตกกอ......64

5.4 คุณสมบัติของพันธุ์ข้าวสุพรรณบุรี 1......65

5.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์......66

5.4.2 ลักษณะเด่นประจำพันธุ์......66

5.5 การเลือกพันธุ์เมล็ดข้าวมาใช้ในงานวิจัย......66

บทที่ 6 ระบบที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล......67

6.1 บทนำ......67

6.2 ทฤษฎีพื้นฐานทางสถิติ......67

6.2.1 เกณฑ์ในการเลือกใช้สถิติทดสอบ......67

6.2.2 คำศัพท์ทางสถิติและสัญลักษณ์......69

6.3 หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล......70

6.3.1 การทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับผลต่างของค่าเฉลี่ย ของประชากร 2 กลุ่ม......76

6.4 การนำการวิเคราะห์ทางสถิตินำไปใช้งานวิจัย......77

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 7 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง 80
7.1 บทนำ 80
7.2 ขั้นตอนในการวิจัย 80
7.2.1 เงื่อนไขการทดลอง 80
7.3 ผลกระทบของแนวของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตต้นข้าว 81
7.3.1 วิธีการทดลอง 81
7.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 83
7.4 ผลการทดลอง 86
7.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 90

บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 97
8.1 สรุปผลการวิจัย 97
8.1.1 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 97
8.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเจริญเติบโตเปรียบเทียบทางสถิติ 98
8.1.3 ผลกระทบจากแนวของสนามไฟฟ้า 99
8.2 ข้อเสนอแนะ 99

เอกสารอ้างอิง 100

ภาคผนวก ก. การทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มเติม 104
ภาคผนวก ข. รูปภาพการทดลอง 108
ภาคผนวก ค. ข้อมูลระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงพิกัด 300 kV 111
ภาคผนวก ง. แสดงค่าสนามไฟฟ้าในเมล็ดข้าวในแต่ละ Node 115
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ 125

ประวัติผู้เขียน 139

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 แสดงคุณสมบัติของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 300 kV 9

3.1 แสดงการเปรียบเทียบชนิดสารกึ่งตัวนำ 25

3.2 แสดงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดขนาด 220/220 V 36

3.3 แสดงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดขนาด 220/10,000 V 36

3.4 แสดงค่าการทดสอบแบบไม่มีโหลด 42

3.5 แสดงค่าการทดสอบแบบมีโหลด โหลดทดสอบ คือ Resistance 17 M Ω 43

3.6 แสดงค่าเปอร์เซนต์ริปเปิล (% ripple) 43

6.1 แสดงจุดมุ่งหมายในการเลือกใช้สถิติที่เหมาะสม 67

6.2 แสดงการแยกข้อมูลตามลักษณะของข้อมูล หรือสเกล 69

6.3 แสดงประเภทของความคลาดเคลื่อนของการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ 74

7.1 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความสูงของลำต้น และความยาวราก ของต้นข้าวทั้ง 7 วัน 86

7.2 การเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน 87

7.3 การทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า 89

7.4 การพิจารณาค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 90

7.5 การพิจารณาค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับ 28.5 kV/m สนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 93

7.6 การพิจารณาการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบกลุ่มที่มีสนามไฟฟ้ากับ กลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า 94

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่

7.7 การพิจารณาการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบกลุ่มที่มีสนามไฟฟ้า กับกลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า 95

8.1 การพิจารณาค่าเฉลี่ยทั้ง 7 วัน ความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 98

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

1.1 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบ.....5

2.1 ความถี่สเปคตรัม.....6

2.2 การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดในตัวกลางอากาศ.....8

2.3 ตำแหน่งที่วิเคราะห์สนามไฟฟ้าสูงสุด.....11

2.4 ลักษณะการวางสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....11

2.5 การกระจายประจุไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....12

2.6 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ.....13

2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ.....15

2.8 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....17

2.9 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย Uniform field ฉนวนซ้อนกันที่ V และ d คงที่โดยเปลี่ยนค่า d_1 และค่า $d_2 = d - d_1$ ฉนวนที่ $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 4$.....18

3.1 แหล่งจ่ายแรงดันแรงสูงกระแสตรงใช้วงจรทวีแรงดัน 3 Stage.....21

3.2 การจัดวางชุดอัดประจุในการทดลอง.....21

3.3 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อทดลอง แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ชุดอัดประจุ.....22

3.4 วงจรจ่ายไฟตรงจากไฟบ้าน.....22

3.5 ไดโอดแรงสูงและเส้นลักษณะ.....24

3.6 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น Full wave rectifier.....26

3.7 วงจรเรคติฟายเออร์มีตัวเก็บประจุกรองกระแส.....27

3.8 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงสองเท่าแบบเต็มคลื่น.....30

3.9 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงในขณะมีโหลด.....31

3.10 วงจรทวีแรงดัน 1 stage.....32

3.11 สนามไฟฟ้าทรงกลม-ทรงกลม (ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง).....34

3.12 การจัดวางคาปาซิเตอร์และไอโอด.....37

3.13 โครงสร้างและชั้นวางอุปกรณ์.....40

3.18 วงจรทวีแรงดัน 3 Stage.....41

3.19 การทดสอบวงจรทวีแรงดัน 3 Stage แบบ Positive.....41

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.20 สัญญาณแรงดัน Output ขณะไม่มีโหลด เมื่อจ่ายแรงดัน input 140 Volt 45
3.21 สัญญาณแรงดันระลอก Output ขณะไม่มีโหลด เมื่อจ่ายแรงดัน input 140 Volt 45
4.1 ลักษณะการแบ่งโดเมนที่ต่อเนื่องออกเป็นขอบเขตต่างๆ 49
4.2 พื้นที่ในการวิเคราะห์ (บริเวณเมล็ดข้าว) 49
4.3 การแบ่งอิลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ไฟไนท์อิลิเมนต์ 51
4.4 การกระจายระดับแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรด
ผ่านตัวกลางอากาศแบบระนาบ 2 มิติ 52
4.5 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศว่างใกล้ขอบด้านนอกอิเล็กโทรด 53
4.6 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณกลางชุดอิเล็กโทรด 53
4.7 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศและเมล็ดข้าว 54
4.8 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณเมล็ดข้าว 54
5.1 แสดงส่วนประกอบของเมล็ดข้าว 57
5.2 แสดงขั้นตอนการงอกของเมล็ดข้าว 61
5.3 แสดงต้นข้าวที่งอกจากเมล็ด 7 วัน 63
5.4 แสดงขั้นตอนการเจริญเติบโตของต้นข้าวจากระยะต้นกล้าจนถึงระยะแตกกอ 64
5.5 แสดงระบบรากของต้นข้าวและต้นข้าวแตกกอ 65
6.1 แสดงการทดสอบแบบมีทิศทางไปทางบวก หรือทางลบ สมมุติว่า
กำหนดระดับความมีนัยสำคัญที่ .05 (α = .05) 75
6.2 ภาพแสดงการทดสอบแบบไม่มีทิศทาง สมมุติว่ากำหนดระดับความมี
นัยสำคัญที่ .05 (α = .05) พื้นที่ปลายโค้งของการแจกแจง
ความถี่จะเป็นข้างละ $\frac{\alpha}{2} = \frac{.05}{2} = .025$ 75
6.3 แสดงช่วงของการยอมรับและช่วงของการปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0) 79
7.1 ขั้นตอนการทดลอง 81
7.2 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบ 82
7.3 รูปแบบการวางเมล็ดข้าว 83

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

7.4 ชุดอัดประจุไฟฟ้าและแหล่งจ่ายแรงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง 84

7.5 ชุดอัดประจุสนามไฟฟ้าแนวตั้ง (Set A) 84

7.6 ชุดอัดประจุสนามไฟฟ้าแนวระดับ (Set B) 85

7.7 รูปภาพแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า 85

7.8 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 87

7.9 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 88

7.10 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 88

7.11 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 89

7.12 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 1 วัน โดยแสดงความหมายของข้อมูลแท่งกราฟของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง สนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 91

7.13 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง สนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 91

7.14 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง สนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 92

7.15 ช่วงของการยอมรับและช่วงของการปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0) 94

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

ก 1 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 97 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 105

ก 2 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 97 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 106

ก 3 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 4 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 106

ก 4 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 4 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า 107

ก 5 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 2 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขวาง 109

ก 6 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 2 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขนาน 109

ก 7 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 7 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขวาง 110

ก 8 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 2 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขนาน 110

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้ไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่างๆที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมากเพื่อให้เพียงพอกับการใช้ โดยส่งกระแสไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หลายพื้นที่ที่มีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่านจะได้รับผลกระทบจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นจำนวนมากคือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายอยู่โดยรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นนับวันจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความต้องการการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศ ทำให้จำเป็นต้องมีการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้น และพัฒนาให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีระดับของแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ต้องมีการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากปัญหาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในเบื้องต้นวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเบื้องต้นถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวซึ่งเป็นพืชที่เป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง พิกัด 300 kV โดยมีพื้นที่เชื่อมโยงระบบส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ้านคลองแงะ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย กับสถานีไฟฟ้าแรงสูง Gurum รัฐ Kedah ประเทศมาเลเซีย [1]

จากรายงานวิจัยของต่างประเทศก็มีการกล่าวถึงผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งมีชีวิต โดยทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดกับมนุษย์ สัตว์ และพืช โดยส่วนใหญ่จะเน้นผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ อย่างไรก็ตามผลกระทบดังกล่าวยังไม่สามารถหาบทสรุปได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมนุษย์มีความซับซ้อนในโครงสร้างมาก รายงานในต่างประเทศที่ศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งมีชีวิตได้แก่

1. Lamacchia (1992) เสนอการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ที่มีต่อเด็กนักเรียนที่มีห้องเรียนใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 110 ฟุต ทำให้มีโอกาสเป็นมะเร็ง โดยความเข้มสนามไฟฟ้ายิ่งสูงมากขึ้น โอกาสจะเกิดมะเร็งก็สูงมากขึ้นด้วย [2]

2. Verkasalo (1993) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อเด็กที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง โดยสุ่มนำเด็กชายและหญิงมาตรวจสุขภาพพบว่ามีอาการลักษณะต่างๆ เช่น อารมณ์หงุดหงิด หรือมีเนื้องอกในสมอง [3]

3. Scherer (1994) ได้ศึกษาถึงผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อมนุษย์ โดยเน้นที่อวัยวะต่างๆเช่นสมอง เม็ดเลือดแดง [4]

4. Dayal และ Singh (1986) ได้ศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อความสูงของต้นมะเขือเทศเมื่อเมล็ดมะเขือเทศได้รับสนามแม่เหล็ก โดยดูจากค่าความสูงของต้นมะเขือเทศ [5]

5. Muraji (1992) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อทิศทางการการงอกของรากข้าวโพด โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามแม่เหล็ก จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่ความถี่สนามแม่เหล็กต่ำทำให้การงอกของรากข้าวโพดในทิศทางของสนามแม่เหล็กเร็วกว่าปกติ แต่ที่ความถี่สูงทำให้รากข้าวโพดงอกช้ากว่าปกติ [6]

6. ร่มฉัตร ยูรประถม (1997) ได้ศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดถั่วเขียว โดยได้ทดลองปลูกต้นถั่วเขียวเปรียบ 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่อเนื่องและแบบชั่วขณะ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่ากลุ่มที่ได้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 100 mG ทำให้ต้นถั่วเจริญเติบโตได้ดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า และถ้าให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับเมล็ดถั่วเขียวก่อนนำไปปลูก พบว่าค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 300 mG และ 400 mG ทำให้ต้นถั่วเขียวเจริญเติบโตได้ดีกว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า [7]

7. พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก และคณะ (2003) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าในการเพิ่มผลผลิตข้าว โดยศึกษาถึงระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและเวลาต่างๆที่จ่ายให้กับเมล็ดข้าว ก่อนนำไปปลูก ที่ทำให้ผลผลิตข้าวดีขึ้น พบว่าระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าไม่เกิน 2 kV/cm เป็นเวลาไม่เกิน 45 นาทีจะไม่ผลกระทบต่อเปอร์เซนต์การงอก ดัชนีการงอก ความยาวลำต้นและราก ผละผลผลิตข้าว แต่ทำให้เพิ่มคุณภาพเมล็ดพันธุ์ โดยเฉพาะความยาวลำต้น และเพิ่มผลผลิต [8]

จากรายงานการวิจัยต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตจริงทั้งในมนุษย์และพืช ดังนั้นในการทดลองในครั้งนี้จึงตั้งเงื่อนไขการทดลองว่า ถ้าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลต่อการต่อสิ่งมีชีวิตจริง ไม่ว่าจะทดลองที่สถานที่ไหน ก็น่าจะเกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย งานวิจัยนี้จึงใช้พืชเป็นกลุ่มทดลองแทนสัตว์ เพราะพืชมีความซับซ้อนในโครงสร้างน้อยกว่าสัตว์ โดยเป็นลักษณะงานวิจัยระยะสั้น ใช้กลุ่มตัวอย่างเป็นจำนวนมาก เพื่อความสะดวกในการทดลอง และลดผลกระทบข้างเคียงกับสิ่งมีชีวิตที่เราศึกษา

ในการศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวนั้น เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และการวางสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ก็มีการวางผ่านทุ่งนาข้าวเป็นจำนวนมาก สิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีสายส่งแรงสูงผ่านคือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่บริเวณบัสบาร์ บริเวณใต้สายส่งแรงสูง ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวอาจมีผลต่อการเจริญเติบ

โตของต้นข้าว ซึ่งเป็นพืชที่มีปริมาณการปลูกมากในประเทศไทย และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จัดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการส่งจ่ายย่านความถี่ที่ต่ำมาก (Extreme Low Frequency : ELF) มีความถี่ในการส่งจ่าย 50-60 เฮิรตซ์ และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมากๆ ในอากาศโดยรอบ ดังนั้นคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงไม่เกี่ยวเนื่องกัน ทำให้สามารถพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกออกจากกันได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาเฉพาะกรณีผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว ซึ่งเป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อต้องการศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้คือค่าสนามไฟฟ้า 28.5 kV/m ซึ่งวิเคราะห์มาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง พิกัดขนาด 300 kV และทดลองค่าสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบ 97 kV/m และ 4 kV/m โดยมีการทดลองที่มีกลุ่มตัวอย่างเป็นจำนวนมากเพื่อจะได้ข้อมูลในทางสถิติที่มีความน่าเชื่อมั่นสูง โดยสังเกตการเจริญเติบในระยะสั้นเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน ในการทดลองมีการควบคุมพารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิ และความชื้นให้คงที่ โดยจะพิจารณาความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าว เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1. เป็นแนวทางเริ่มต้นในการศึกษาในเชิงวิชาการถึงผลกระทบเบื้องต้นของสนามไฟฟ้าที่ต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยขนาดของสนามไฟฟ้าคือ 28.5 kV/m จำลองมาจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง พิกัด 300 kV และทดลองค่าสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบ 97 kV/m และ 4 kV/m
2. ใช้โปรแกรม ANSYSวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากชุดอิเล็กโทรดที่จ่ายให้กับต้นข้าว
3. สามารถรู้และเข้าใจถึงปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งต่างๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง
4. สามารถนำผลจากงานวิจัยไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาในด้านเกษตรกรรมและทางด้านชีววิทยา

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การเจริญเติบโตของต้นข้าวของกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าจะแตกต่างกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ในวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบของต้นข้าวต่อเนื่องในระยะ 7 วัน ซึ่ง ค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ทดลองใช้อ้างอิงมาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง พิกัด 300 kV มีการใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าว มีทดลองเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า มีการวัดความสูงของลำต้น ความยาวราก ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

สำหรับขอบเขตของการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน ดังนี้

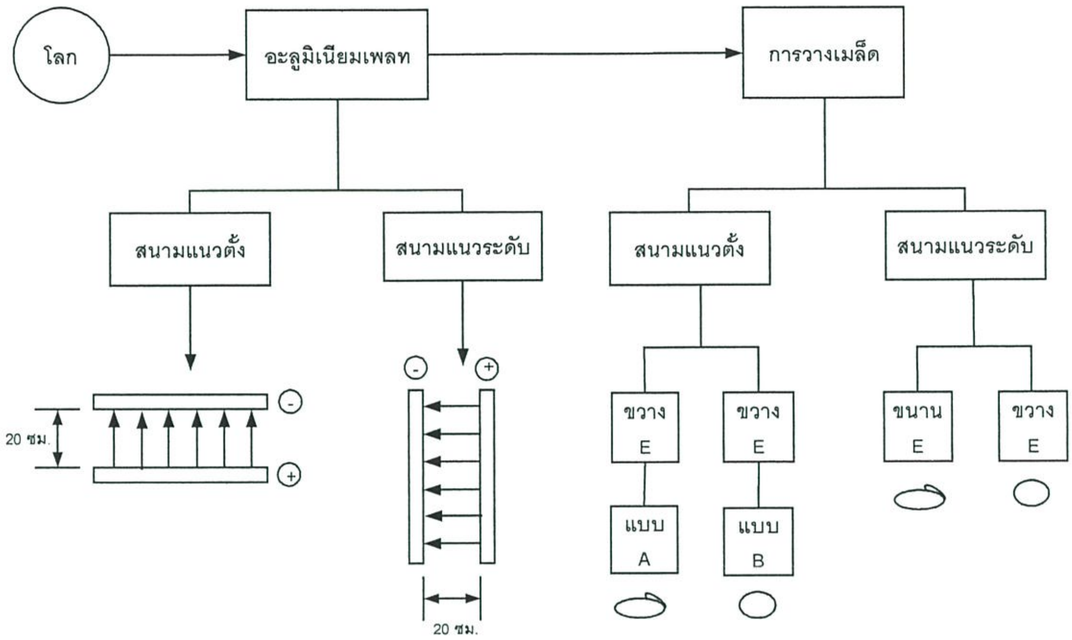
1. ศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ต่อเนื่องในระยะ 7 วัน เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและแนวระดับ กับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า มีการวางเมล็ด 2 แบบคือ วางเมล็ดแนวขนาน และการวางเมล็ดแนวขวาง โดยค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้คือค่าสนามไฟฟ้า 28.5 kV/m ซึ่งวิเคราะห์มาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง พิกัดขนาด 300 kV และทดลองค่าสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบ 97 kV/m และ 4 kV/m
2. วิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวในห้องทดลอง โดยการใช้โปรแกรม ANSYS
3. การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติมาวิเคราะห์ข้อมูล

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว จะมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การทดลองโดยการให้สนามไฟฟ้าค่า 28.5 kV/m ต่อเนื่อง 7 วัน กับต้นข้าว การปลูกต้นข้าวมีการปลูกเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เมล็ดข้าวจะมีการวางเมล็ด 2 แบบคือ แนวขนานและแนวขวาง โดยมีการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตทุกวันเป็นเวลา 7 วัน และทดลองค่าสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบ 97 kV/m และ 4 kV/m
2. แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี 2 แบบคือสนามแนวตั้งและสนามแนวระดับ
3. วิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าว โดยใช้โปรแกรม ANSYS
4. นำข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นข้าวคือ ความสูงของลำต้น ความยาวราก มาวิเคราะห์ทางสถิติ 2 กลุ่มเปรียบเทียบกันคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

นิยามการวางเมล็ดและแนวของสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.1

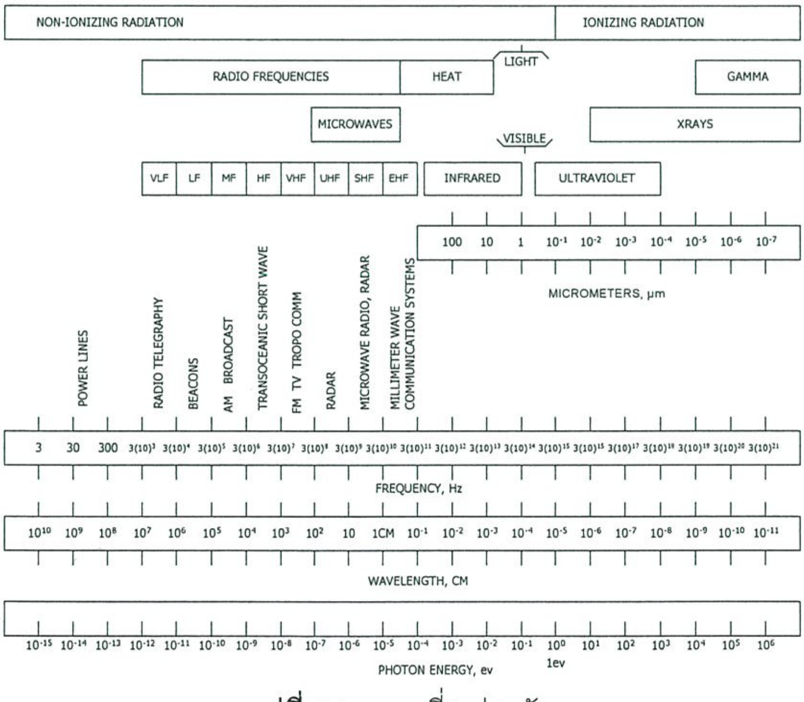


รูปที่ 1.1 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบ

บทที่ 2
ระบบที่ใช้ในงานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้า

2.1 บทนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งและเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สำหรับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นเราสามารถหาได้จากการคำนวณและการวัด ในชีวิตประจำวันเราได้พบเจอกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น รังสีแกรมมา รังสีจากแสงอาทิตย์ และที่เกิดจากการสร้างขึ้นของมนุษย์ เช่น เรดาร์ ไมโครเวฟ โทรทัศน์ วิทยุ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งแยกออกได้ตามช่วงความถี่ (frequency spectrum) [9] ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความถี่สเปคตรัม

สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จัดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการส่งจ่ายย่านความถี่ที่ต่ำมาก (Extreme Low Frequency : ELF) มีความถี่ในการส่งจ่าย 50-60 เฮิรตซ์ และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมากๆ ในอากาศโดยรอบ ดังนั้นคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงไม่เกี่ยวเนื่องกัน ทำให้สามารถพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกออกจากกันได้

2.2 **สนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง** (Electric field)

สนามไฟฟ้าเป็นแรงในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่มีทั้งขนาดและทิศทางเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{E}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง (kV/m) โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดใดๆ ในสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและจะแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ในอากาศจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ สำหรับค่าของสนามไฟฟ้าในสภาวะคงที่ (steady-state) เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน x,y และ z ได้ ดังนี้ [10]

$$\vec{E} = e_X(t).\vec{u}_X + e_Y(t).\vec{u}_Y + e_Z(t).\vec{u}_Z \tag{2.1}$$

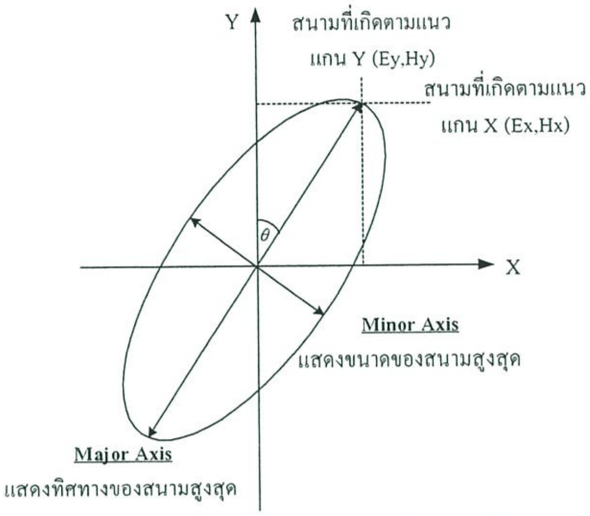
เมื่อ $\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z$ คือ ยูนิตเวตเตอร์ตามแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ และ $e_x(t), e_y(t), e_z(t)$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน x,y และ z ที่อยู่ในรูปฟังก์ชัน ของเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x แล้วเราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ ดังนี้

$$e_x(t) = E_x cos(\omega t + \phi_x) \tag{2.2}$$

$$e_x(t) = E_{X,real} cos\,\omega t + E_{X,imag} sin\,\omega t \tag{2.3}$$

เมื่อ E_x เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และ ϕ_x เป็นทิศทางของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา $e_x(t)$ สำหรับค่าของ $E_{X,real}$ และ $E_{X,imag}$ เป็นค่าของสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นจำนวนจริงและในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพตามลำดับ สนามไฟฟ้าในระบบสามเฟส การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทั้งขนาดและมุมจะมีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ ในตัวกลางอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เราสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากลักษณะของวงรีตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าโดยที่ค่าความเข้ม

สนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดตามแนวแกนหลักของวงรี (major axis of ellipse) และขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยความยาวของเส้นแกนรองของวงรี (minor axis of ellipse) สำหรับขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับวงรีจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.2 การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดในตัวกลางอากาศ

2.2.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะใช้ในกรณีที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่นเมื่อสายส่งมีระยะทางไกลมากกว่า 1,000 เมตร [11] หรือถูกใช้เป็นสายส่งเชื่อมโยงเมื่อระบบการส่งจ่ายทั้งสองมีความถี่ที่แตกต่างกัน และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็แตกต่างกันด้วย สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจัดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นจากการส่งจ่ายย่านความถี่ที่ต่ำมากๆ (Extreme Low Frequency : ELF) มีความถี่ในการส่งจ่าย 50-60 เฮิรตซ์ และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมากๆ ในอากาศโดยรอบ ดังนั้นคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงไม่เกี่ยวเนื่องกัน ทำให้สามารถพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกออกจากกันได้ ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เกิดจากแรงดันไฟฟ้าทำให้เกิดประจุไฟฟ้ากระจายอยู่ทั่วบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสสลับ (HVAC) จะเกิดประจุที่กระจายบริเวณรอบบริเวณสายส่ง ประกอบด้วยทั้งประจุบวกและประจุลบตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC) ประจุที่กระจายอยู่รอบบริเวณสายส่งจะมีเพียงประจุบวก หรือประจุลบ หรือทั้งประจุบวกและประจุลบในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการส่งจ่ายไฟฟ้าว่าเป็นแบบโมโนโพลาร์ (Monopolar) หรือเป็นแบบไบโพลาร์ (Bipolar) นอกจากนี้แล้วระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าตามเวลา ทำให้บริเวณที่ผิวตัวนำของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแส

ตรงสะสมความเครียดสนามไฟฟ้าได้เร็วและเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอากาศรอบสายตัวนำได้ง่ายกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าประจุไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าปกติแล้ว ยังขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรคดาวน์บางส่วนของอากาศรอบสายตัวนำที่เรียกว่าปรากฏการณ์โคโรนาอีกด้วย ซึ่งระดับของการเกิดโคโรนาจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล [12]

สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะพิจารณาประจุไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าของระบบ และประจุไฟฟ้าเมื่อสายส่งอยู่ภายใต้สภาวะการเกิดโคโรนาซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ระดับของการเกิดโคโรนาของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะขึ้นอยู่กับค่าเกรเดียนท์โวลท์เตจบริเวณที่ผิวของสายตัวนำและจากฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้อากาศรอบสายตัวนำมีสภาพการเป็นฉนวนแตกต่างกันออกไป สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 300 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 300 kV

ลักษณะของข้อมูล	**สายส่งไฟฟ้า** 300 kV
System voltage	$\pm$ 300 kV
Conductor type	2x954 kcmil ACSR
Span length	450 m
Ground clearance	8.50 m
Sag of conductor	15.00 m at 75 $^{\circ}$C
Right of way width	40 m
Maximum conductor gradient	23.2 kV/m
Beneath conductor	28.5 kV/m

สรุปการใช้ประโยชน์จากไฟฟ้าแรงสูง

ประโยชน์จากไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (HVAC)

1. เพื่อส่งและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากๆ
2. ทดสอบอุปกรณ์และวัสดุฉนวนที่จะนำไปใช้กับระบบที่จะสั่งจ่ายแรงดันสูง หรือเพื่อการวิจัยในการออกแบบอุปกรณ์

ประโยชน์จากไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC)

1. ระบบสายส่งประหยัดกว่า เนื่องจาก Loss และ Voltage drop มีน้อยกว่า
2. สามารถใช้น้ำทะเลเป็นสายดินเป็นทางกลับของไฟฟ้าได้
3. ไม่มีกำลังสูญเสียในฉนวน เนื่องจากการสลับขั้วของรูปคลื่นแรงดัน
4. เป็นตัวเชื่อมโยงระบบแหล่งจ่าย AC ที่มีความถี่ไม่เหมือนกันได้ เช่น ประเทศอังกฤษ ความถี่ 60 Hz ประเทศฝรั่งเศส ความถี่ 50 Hz
5. เป็นตัวเชื่อมระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ไม่เท่ากัน เช่นประเทศไทยมีการเชื่อมระบบไฟฟ้ากับประเทศมาเลเซียด้วย DC 300 MW 300 kV 1,000 A ระยะทาง 110 กิโลเมตร สถานี inverter (AC230 kV/DC 300 kV) ของประเทศไทยอยู่ที่ คลองแงะ จังหวัดสงขลา ของประเทศมาเลเซียอยู่ที่ Gurun รัฐ Kedah (AC275 kV/DC 300 kV)

ข้อเสียของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (HVAC)

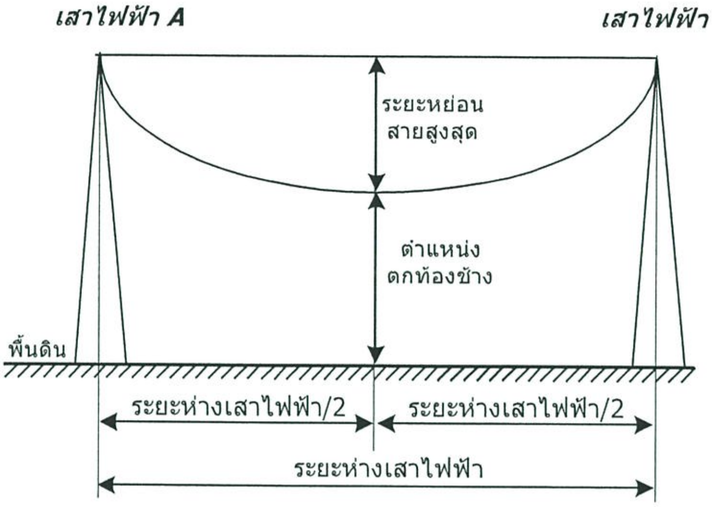
1. สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ที่มีระยะทางไกลมากๆ ต้องใช้คะแปซิเตอร์ รีแอกเตอร์ หรือ Synchronous Machine เป็นตัวแก้แรงดันตกและแก้ Power Factor
2. สายส่ง AC เกิด Corona ได้ง่ายกว่า DC ที่แรงดันเท่ากัน

ข้อเสียของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC)

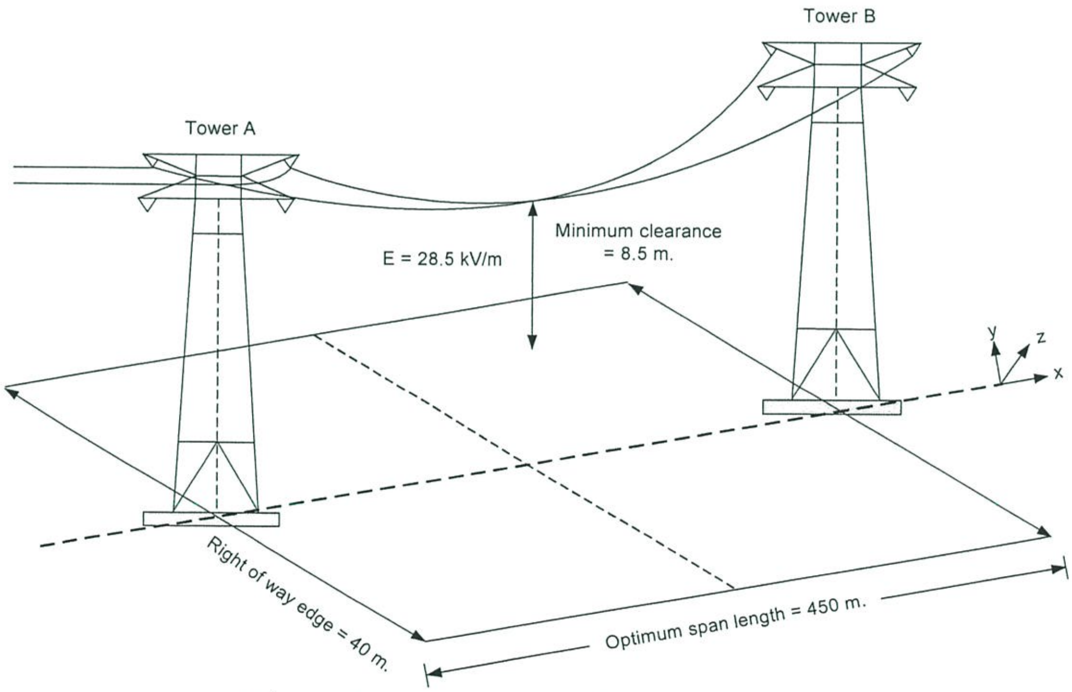
1. ระบบ DC ไม่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ชนิดรีแอกทีฟได้
2. DC ต้องมีสถานีเปลี่ยนระบบแรงดันเป็น AC คือ inverter station ซึ่งมีราคาแพงและเป็นตัวปัญหาในการกำเนิด Harmonics ทางไฟฟ้า

2.2.2 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดระหว่างเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นดินที่เกิดขึ้นบริเวณใต้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าความเข้มสูงสุดในบริเวณที่ตำแหน่งสายตัวนำที่อยู่ใกล้กับพื้นดินมากที่สุด คือตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง (Midspan) โดยมีระยะห่างจากพื้นดินเป็นระยะห่างปลอดภัยต่ำสุด (Mininmum clearance) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 ที่ตำแหน่งนี้สายตัวนำจะมีระยะหย่อนตัวสูงสุด (Maximum sag) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าว จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดในบริเวณระหว่างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งที่วิเคราะห์สนามไฟฟ้าสูงสุด



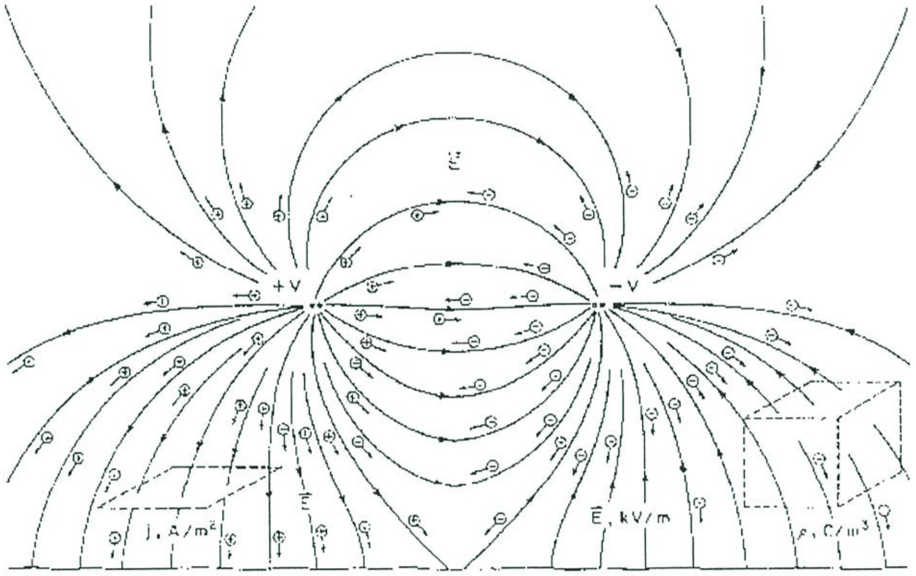
รูปที่ 2.4 ลักษณะการวางสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ในการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุด ที่ตำแหน่งตกท้องช้าง พิจารณาให้ตัวนำไฟฟ้าอยู่สูงจากพื้นดินเป็นระยะเท่ากับระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าต่ำสุด (กรณีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV มีระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าในแนวดิ่งต่ำสุดสำหรับพื้นที่ทั่วไปจะ

มีค่าเท่ากับ 8.5 เมตร) นอกจากนี้ระบบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้ถือว่ามีการจ่ายโหลดที่สมดุลเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนนี้น้อยมาก

2.2.3 การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเหนี่ยวนำกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งลักษณะการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า Object charging ที่เกิดจากประจุไฟฟ้าบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 แรงดันตกคร่อมวัตถุตัวนำที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง จะพิจารณาในรูปฟังก์ชันของค่าความต้านทาน



รูปที่ 2.5 การกระจายประจุไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้า

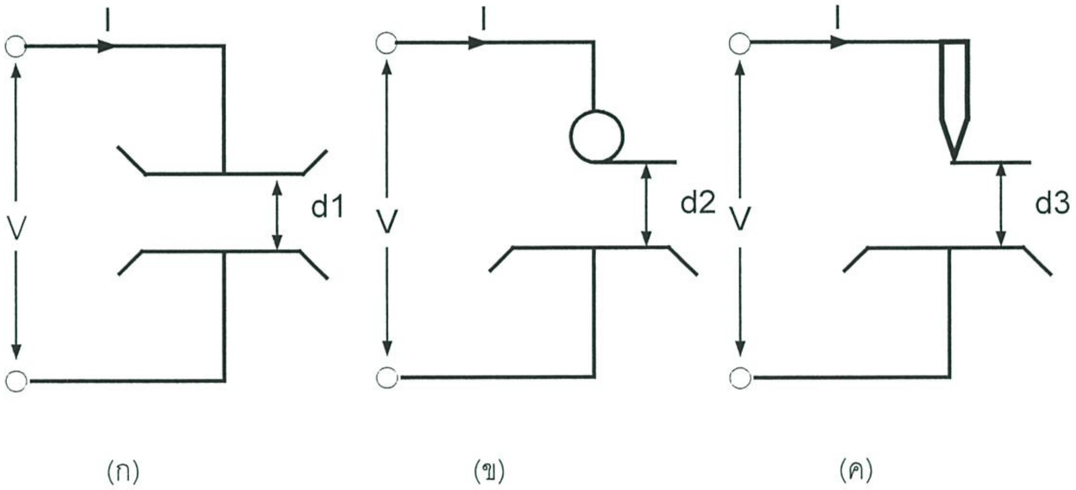
เนื่องจากในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าในการทดลองผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะต้นกล้า ในการออกแบบชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้ารวมถึงการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น จะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีคือ ลักษณะของสนามไฟฟ้า รูปร่างของอิเล็กโทรด [13] และการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้า สภาพฉนวนจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี เมื่อเกิดการสปาร์คหรือวาบไฟหรือมีการเบรกดาวน์ผ่านฉนวนในก๊าซ หรือของเหลวหลังจากสภาพฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้า และจะคงอยู่ถ้าแรงดันนั้นสูงพอ และจะกลับคืนสู่

สภาพการเป็นฉนวนดังเดิม หลังจากการเบรกดาวน์หรือสปาร์คได้ผ่านพ้นไปแล้ว ซึ่งแตกต่างไปจากฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากการเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการเป็นฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร

2.3.1 **ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า** (Dielectric Strength)

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดฉนวนไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเบรกดาวน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นโวลท์ต่อเซนติเมตร (V/cm) หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไป จะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) คือเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (Plate-to-Plate) ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b (สนามไฟฟ้าวิกฤต) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น รูปลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริค (Dielectric) เวลาเป็นต้น



รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

(ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)

(ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.6 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1, d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็

ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ สามารถวัดได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่งส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่ง ระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่การเบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

2.3.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโทรดที่มีค่าสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่าง อิเล็กโทรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d} \qquad (2.4)$$

เมื่อ V : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด หน่วย โวลท์หรือ กิโลโวลท์

d : ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วย เซนติเมตร

E_{av} : ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรดหน่วยโวลต์ต่อเซนติเมตรหรือ กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

E_{max} : ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งเท่ากันทุกจุด ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสก่อนจะเกิดเบรกดาวน์นั้นจะวัดไม่ได้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ ก็คือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{V_b}{d} \qquad (2.5)$$

เมื่อ V_b : แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

2.3.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดแบบนี้ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.6 (ข) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมอาจคำนวณได้จาก

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d.\eta^{\cdot}} \tag{2.6}$$

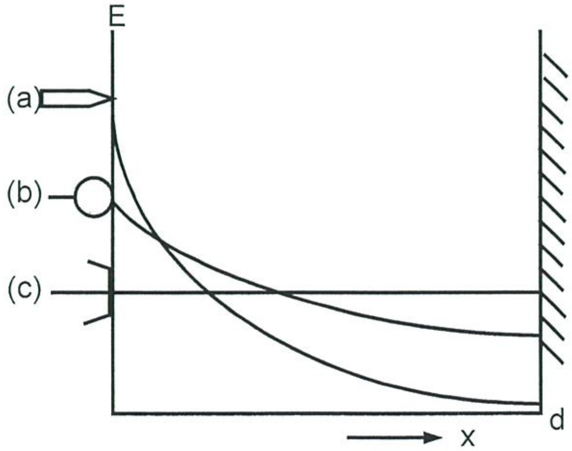
เมื่อ $\eta^{\cdot}$: คือแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) มีค่า ≤ 1 นิยามว่า

$$\eta^{\cdot} = \frac{E_{av}}{E_{max}} \tag{2.7}$$

แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า คือดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟคเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงสามารถคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

$$E_{b} = \frac{V}{d.\eta^{\cdot}} \tag{2.8}$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา (Colona) หรือพรีดิสชาร์จ (Predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.6 (ข) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดการเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต E_{b}



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเช่นปลายแหลมดังรูปที่ 2.6 (ค) เมื่อระยะห่างออกจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.7 อิเล็กโทรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะยังไม่เกิดการเบรกดาวน์ แต่จะเกิดโคโรนาพรีดิสชาร์จขึ้น ในบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโทรด คือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดการดิสชาร์จ (Discharge) ที่ไม่สมบูรณ์ คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด เรียกว่าการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงๆ จึงทำให้กระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเบรกดาวน์เรียก กระแสโคโรนา (Colona Circuit) หรือกระแสพรีดิสชาร์จ การเกิดโคโรนาเป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุหมอก (Space Charge) แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ยังคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 แต่ η^{*} จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวน จะคำนวณจากสมการที่ 2.8 ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการที่ 2.8 นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ

$$E_i = \frac{V_i}{d.\eta^{*}} \qquad (2.9)$$

เมื่อ E_i : ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

V_i : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Colona Inception Voltage)

โดย E_i และ V_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้น สมการที่ 2.9 จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด หรือกล่าวได้ว่าสมการที่ 2.9 นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage, Threshold Voltage, Inception Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นเบรกดาวน์ ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด ในกรณีที่เป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น จึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปว่า

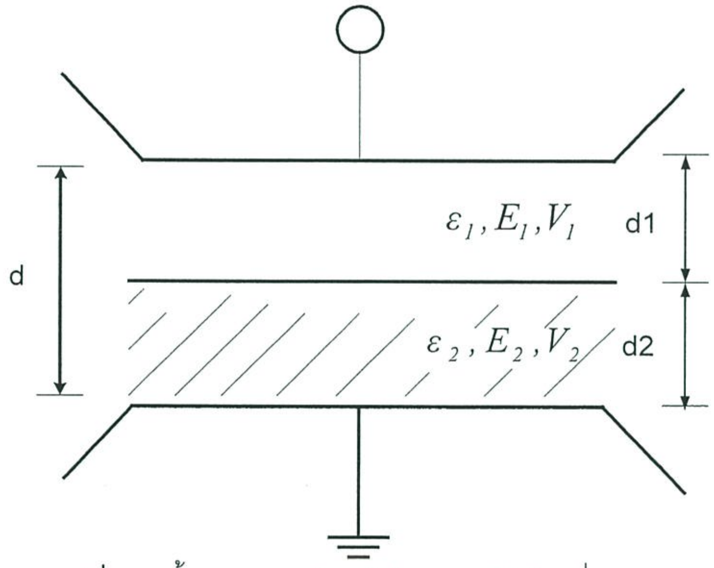
$$V_i = E_i.d.\eta^{*} \qquad (2.10)$$

เมื่อ V_i : แรงดันเริ่มต้น

E_i : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น V_i

2.3.4 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

ในอิเล็กโทรดแบบระนาบกรณีที่ใช้ฉนวนต่างชนิดกันย่อมมีค่าเปอร์มิติวิตี้ (Permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นรอยต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง การวางฉนวนต้องให้รอยต่อฉนวนขนานกับระนาบของอิเล็กโทรด ค่าสัมบูรณ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัว หรือเท่ากันตลอด



รูปที่ 2.8 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + d_2\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)} \tag{2.11}$$

$$E_2 = \frac{V}{\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)d_1 + d_2} \tag{2.12}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \rightarrow \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 = ... \tag{2.13}$$

เมื่อ E_1 คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ฉนวนที่ 1

E_2 คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ฉนวนที่ 2

V คือแรงดันไฟฟ้า

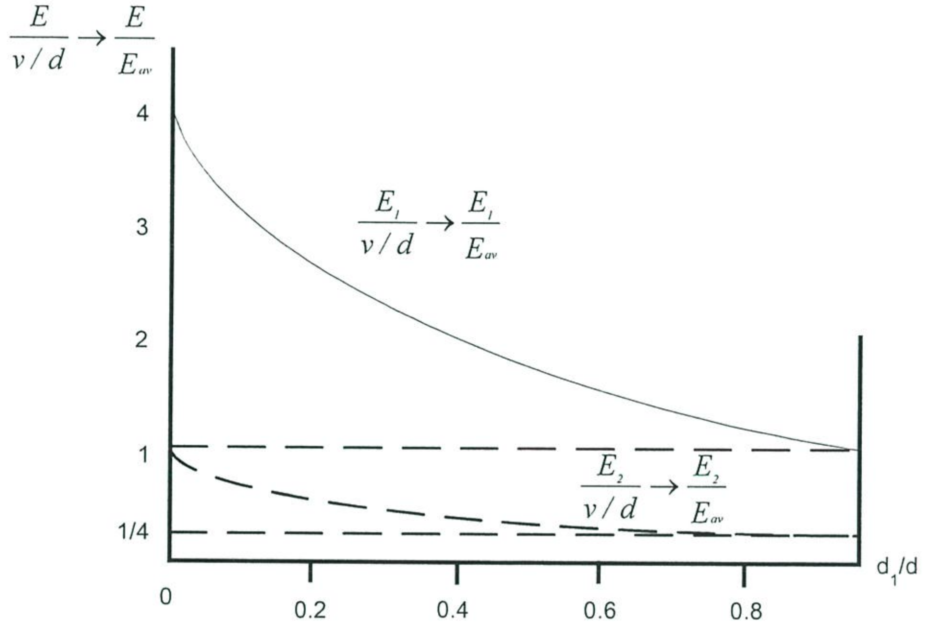
d_1 คือระยะห่างช่องอากาศของฉนวนที่ 1

d_2 คือระยะห่างช่องอากาศของฉนวนที่ 2

ε_1 คือเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนที่ 1

ε_2 คือเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนที่ 2

จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ เมื่อ $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนแต่ละชั้น กับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่า ถ้าในส่วนฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำ ยิ่งบาง สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมาก



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย Uniform field ฉนวนซ้อนกันที่ V และ d คงที่โดยเปลี่ยนค่า d_1 และค่า $d_2 = d - d_1$ ฉนวนที่ $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = 4$

2.4 **บทสรุป**

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV คือ 28.5 kV/m มาใช้ในทดลองการปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้า โดยอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าที่ใช้ทดลองเป็นอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และชุดอัดประจุไฟฟ้าหรือชุดอิเล็กโทรดใช้อลูมิเนียมระนาบหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 120 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคือ 20 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้า และค่าโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรด คือ 4,560 โวลต์ คำนวณโดยใช้สมการที่ 2.6 ดังนี้คือ

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d.\eta^{\cdot}}$$

จากค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้คือ 28.5 kV คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดหรือ E_{max}

ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคือ 20 เซนติเมตร คือค่า d

แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้คือ 0.8 คือค่า η

แทนค่า

$$28.5 \times 1000 = \frac{V}{20 \times 10^{-2} \times 0.8}$$

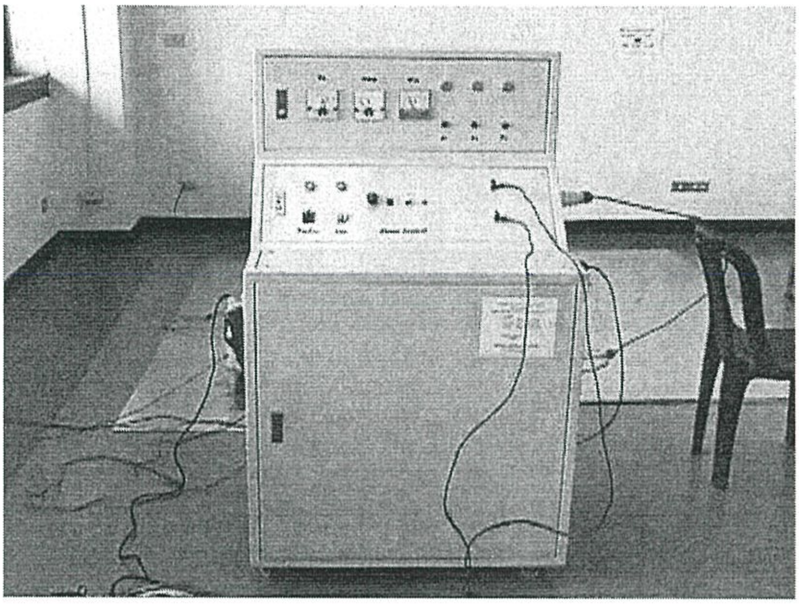
$$V = 4560 \quad \text{โวลต์}$$

บทที่ 3
การออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

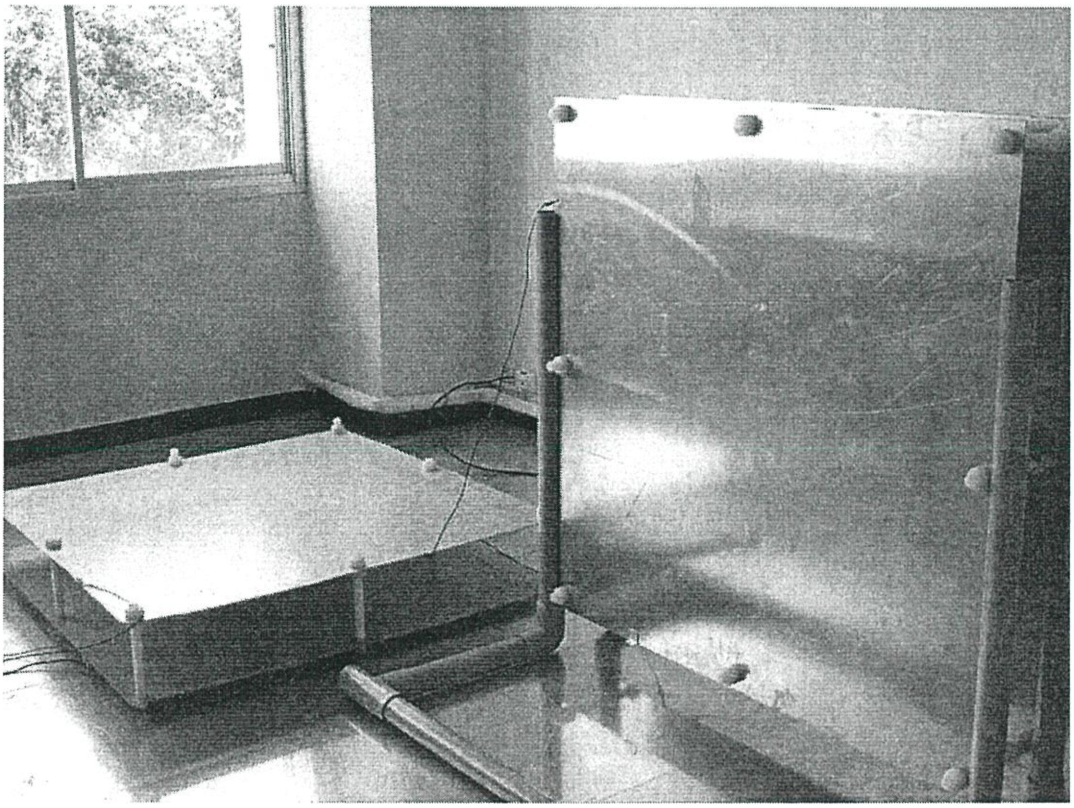
3.1 บทนำ

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแรงสูง มีวงจรการสร้างแบบ Voltage- double circuit โดยแรงดันอินพุตควบคุมด้วยวงจรโซลิดเสตท ส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ไดโอดสำหรับเรียงกระแส ตัวคาปาซิเตอร์สำหรับยกระดับแรงดัน และลดริปเปิลแฟคเตอร์ (Ripple factor) ฉนวนที่กั้นระหว่างอุปกรณ์เป็นแบบเรซินฉนวนแข็ง สามารถสร้างแรงดันกระแสตรงได้ 50 kV กระแส 3 mA และมีค่าริปเปิลแฟคเตอร์น้อยกว่า 3 % สามารถเลือกขั้วแรงดันใช้งานได้ทั้งแบบขั้วบวกกับกราวนด์ และขั้วแรงดันแบบลบกับกราวนด์ได้

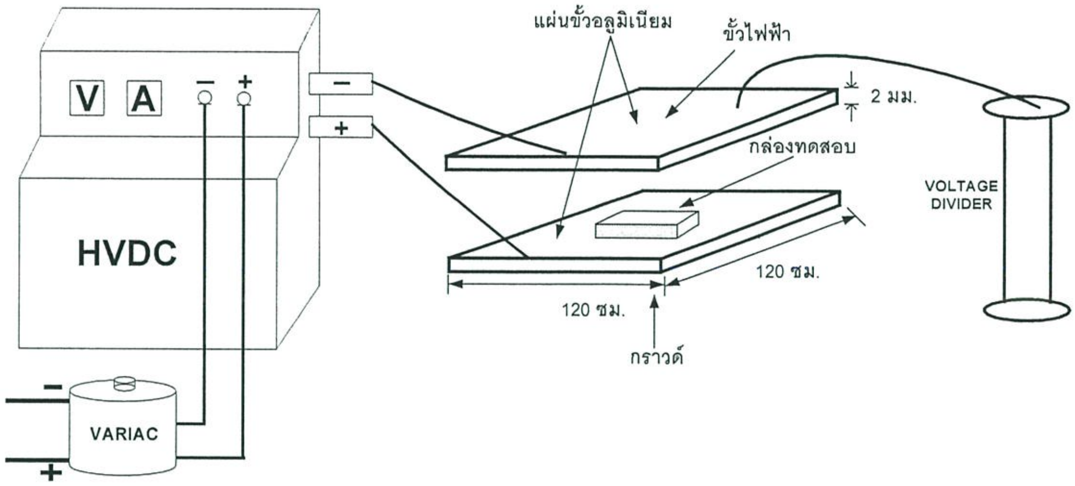
ชุดอัดประจุไฟฟ้า ส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง และแผ่นระนาบอิเล็กโทรดอัดประจุ ชนิดแผ่นอลูมิเนียมแบบระนาบหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 120 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร ยึดติดด้วยแท่งพลาสติกแบบมีเกลียว สามารถปรับระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบอิเล็กโทรดได้ ในการทดสอบใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบอิเล็กโทรด 20 เซนติเมตร กล่องพลาสติกที่ปลูกต้นข้าวมีความกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 23 เซนติเมตร สูง 8.8 เซนติเมตร การใช้กล่องพลาสติกความสูงของกล่องทดสอบคือ 8.8 เซนติเมตร เพราะมีการทดลองให้สนามไฟฟ้าต่อเนื่อง 7 วัน ความสูงของต้นข้าวจะไม่สูงเกินความสูงของกล่องพลาสติก และต้องใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบอิเล็กโทรด 20 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ ในการทดลองมีการวางกล่องพลาสติกที่ปลูกต้นข้าวไว้บริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นระนาบอิเล็กโทรดล่างและแผ่นระนาบอิเล็กโทรดบน เพื่อให้ต้นข้าวได้รับสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอเท่ากัน มีการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขั้วลบให้กับขั้วไฟฟ้าบนหรือแผ่นระนาบอิเล็กโทรดด้านบน และต่อขั้วไฟฟ้าบวกกับกราวด์หรือแผ่นระนาบอิเล็กโทรดล่าง โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุคือ 28.5 kV/m ซึ่งวิเคราะห์มาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบดีซีพิกัดขนาด 300 kV และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทดลองเปรียบเทียบคือ 97 kV/m และ 4 kV/m แรงดันที่ใช้ประมาณ 0-50 kV ในการทดสอบแสดงดังรูปคือ



รูปที่ 3.1 แหล่งจ่ายแรงดันแรงสูงกระแสตรงใช้วงจรทวีแรงดัน 3 Stage



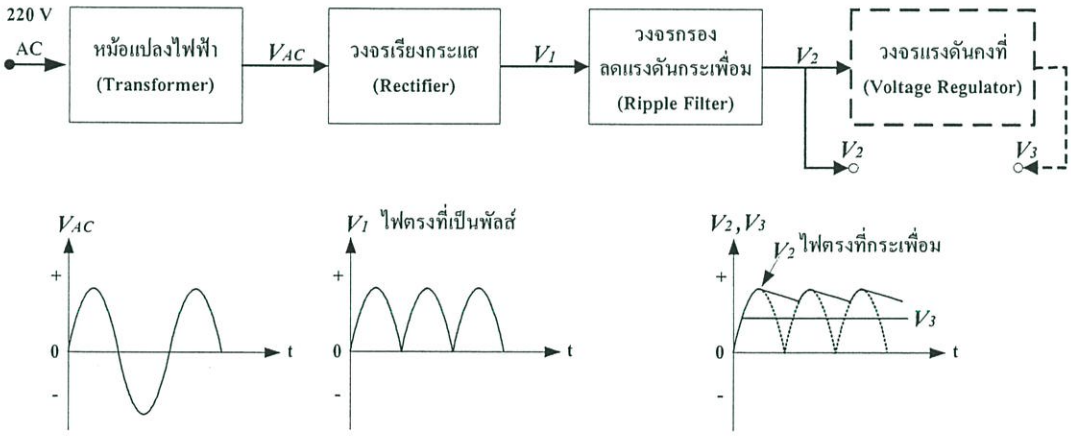
รูปที่ 3.2 การจัดวางชุดอัดประจุในการทดลอง



รูปที่ 3.3 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อทดลอง แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ชุดอัดประจุ

3.2 **การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง** (DC High Voltage)

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง จากวงจรจ่ายไฟจากไฟบ้าน บล๊อกไดอะแกรมของวงจรจ่ายไฟแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรจ่ายไฟตรงจากไฟบ้าน

ค่าแรงดันไฟฟ้าของไฟบ้าน (Line Voltage) โดยทั่วไปจะมีค่า 220 โวลต์ หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้มีค่าตามที่ต้องการ ส่วนใหญ่จะเป็นการลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลง และบางระบบอาจมีทั้งเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและลดแรงดันไฟฟ้า

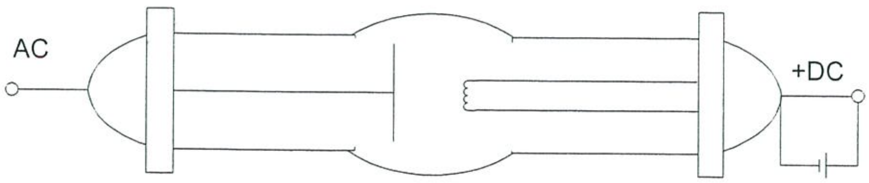
เมื่อหม้อแปลงได้เปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการแล้ว วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ก็จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ซึ่งวงจรเรียงกระแส อาจจะใช้ไดโอดเพียง 1 ตัว 2 ตัว หรือ 4 ตัวต่อวงจร ไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแส จะเป็นลักษณะเป็นพัลส์ (Pulsating DC) มีการกระเพื่อมสูงมาก (Ripple) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถทำงานได้ จากไฟตรงที่มีการกระเพื่อมอย่างมากเช่นนี้ วงจรกรองแรงดันที่กระเพื่อมออกมาจากไฟตรงที่เป็นพัลส์ V_2 จะเป็นไฟตรงที่มีการกระเพื่อมน้อยลง วงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปจะสามารถทำงานได้จากไฟตรงที่มีการกระเพื่อมเล็กน้อยเช่นนี้ (% Ripple น้อยกว่า 10%)

วงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อม จะสร้างขึ้นมาได้จากตัวอุปกรณ์ที่เป็นรีแอคทีฟ (Reactive) ได้แก่ตัวเก็บประจุ C และตัวเหนี่ยวนำ L ซึ่งจะต่อวงจรในลักษณะกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) วงจรอิเล็กทรอนิกส์บางวงจรที่ต้องการไฟตรงที่เรียบมากๆ วงจรแรงดันคงที่ (Voltage Regulator) จะทำหน้าที่กำจัดแรงดันกระเพื่อมที่ยังหลงเหลืออยู่เล็กน้อยของ V_2 ให้หมดไป ไฟตรงที่ได้จากวงจรแรงดันคงที่จะมีคุณภาพใกล้เคียงกับแบตเตอรี่มาก ในปัจจุบันได้มีวงจรรวมซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแรงดันคงที่ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย [14]

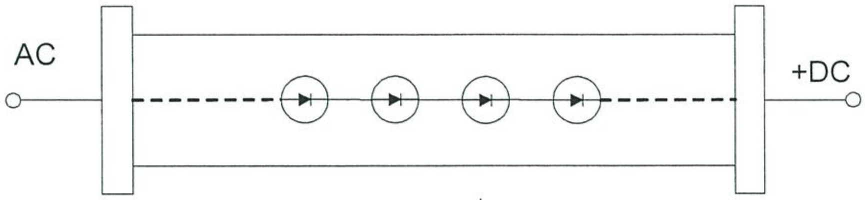
3.2.1 สร้างแรงดันสูงกระแสตรงด้วยวิธีเรคติฟายเออร์

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงด้วยวงจรเรคติฟายเออร์ที่ใช้กันในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงนั้น ในสมัยก่อนนั้นใช้หลอดสูญญากาศดังรูปที่ 3.5 (ก) เป็นตัวเรียงกระแส แต่ในปัจจุบันนี้โดยทั่วไปจะใช้ไดโอดสารกึ่งตัวนำมาต่ออันดับกันดังรูปที่ 3.5 (ข) นอกจากในกรณีที่ต้องการใช้กระแสสูงๆ หลายแอมแปร์และแรงดันไม่เกิน 10 kV มักจะใช้เรคติฟายเออร์ไอปรอท

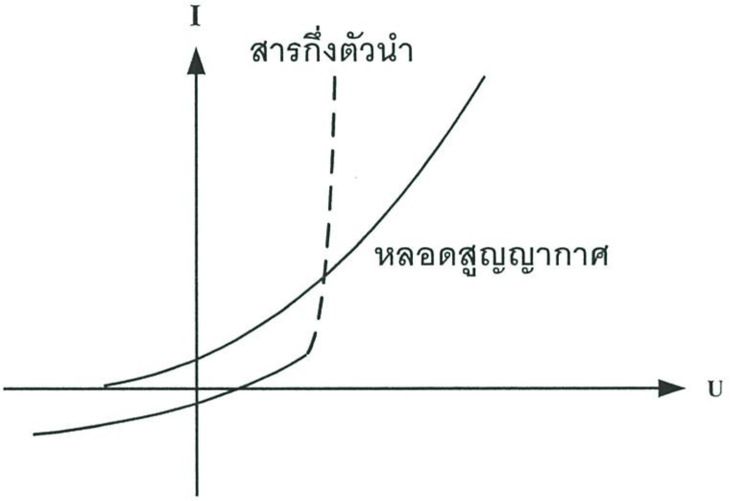
หลอดไดโอดสูญญากาศแรงสูงนี้ทำงานเหมือนหลอดไดโอดทั่วไป คืออิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาจากไส้คาโถด แล้วถูกเร่งวิ่งเข้าหาแอดโนดด้วยอำนาจสนามไฟฟ้า หลอดสูญญากาศดังกล่าวนี้ สามารถทนแรงดันสูงกลับทางค่ายอดได้ถึง 200 kV แต่มีค่าพิกัดกระแสต่ำประมาณ 0.1 A เมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลอดสูญญากาศกับไดโอดสารกึ่งตัวนำแบบหลัง มีข้อดีตรงที่ไม่ต้องมีไส้หลอดร้อน แต่อย่างไรก็ดีไดโอดสารกึ่งตัวนำก็ยังมีกระแสไหลในขณะที่แรงดันกลับทาง (reverse voltage) และมีปัญหาในเรื่องแรงดันกระจายไม่สม่ำเสมอขณะที่แรงดันกลับทาง



(ก) หลอดไดโอดสูญญากาศ



(ข) ไดโอดสารกึ่งตัวนำ



(ค) เส้นลักษณะ I-U

รูปที่ 3.5 ไดโอดแรงสูงและเส้นลักษณะ

ไดโอดควรจะนำกระแสอย่างเต็มที่ในทิศทางนำ แต่จะกั้นไม่ให้กระแสไหลในทิศทางแรงดันกลับทาง ในทางปฏิบัติทำได้เพียงใกล้เคียงเท่านั้น ดังนั้นในรูปที่ 3.5 (ค) ไดโอดสารกึ่งตัวนำจะเกิดแรงดันตกคร่อมเล็กน้อยในทิศทางนำกระแส และยอมให้กระแสไหลเล็กน้อยในทิศทางที่แรงดันกลับทาง การพิจารณาเลือกไดโอดนั้นจะคำนึงถึงค่าพิกัดของ

- แรงดันกลับทาง (peak reverse voltage)
- กระแสที่กำหนด (permissible load current)
- กระแสเสอร์จ (surge current)

เรคติฟายเออร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันทั่วไป มีค่าพิกัดแรงดันกลับทาง และพิกัดกระแสโหลดเต็มที่

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบชนิดสารกึ่งตัวนำ

ค่าพิกัด	ชนิดของสารกึ่งตัวนำ		
	Selenium (Se)	Germanium (Ge)	Silicon (Si)
ค่ายอดแรงดันกลับทาง V	30-50	150-300	1,000-2,000
ค่ากระแสพิกัด A/cm^2	0.1-0.5	50-150	50-150

เมื่อเปรียบเทียบไดโอด Se และ Si จะเห็นได้ว่า Se ทนกระแสและทนแรงดันได้ต่ำ จึงใช้ปริมาตรมาก แต่การทดสอบไฟฟ้าแรงสูงในห้องทดลองโดยทั่วไปจะใช้กระแสน้อย คือไม่เกิน 100 mA เช่นนี้ Se จะเหมาะแก่งานดังกล่าว เพราะว่าแต่ละเซลล์มีค่าความจุไฟฟ้าสูง ซึ่งจะเป็นผลดีในเรื่องการกระจายแรงดัน เมื่อนำเอาไดโอดมาต่ออันดับกันมากๆ กล่าวคือสามารถใช้ต่ออันดับกันทนแรงดันกลับได้ถึง 600 kV โดยไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุต่อชดเชย และที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ไม่ไวต่อกระแสเสอร์จ แต่ Se ต้องการปริมาตรสำหรับต่อวงจรมาก จึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำ ในกรณีที่ใช้กับกระแสสูงๆ Si จะเหมาะกว่าวงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

วงจรทั้งหมดที่ใช้เรคติฟายเออร์สำหรับเรียงกระแสสร้างแรงดันกระแสตรง ทั้งแรงดันต่ำและแรงดันสูง จะมีวงจรพื้นฐานเป็นแบบ

1. วงจรเรคติฟายเออร์ครึ่งคลื่น (Half wave rectifier)
2. วงจรเรคติฟายเออร์เต็มคลื่น (Full wave rectifier)

ในกรณีที่มีตัวจ่ายกระแสสลับแรงดันไม่สูงนัก จะสร้างแรงดันกระแสตรงสูงมากๆ ได้ โดยใช้วงจรพื้นฐานมาต่อขั้นบันได ในห้องทดลองแรงสูงทั่วไป จะใช้วงจรเรคติฟายเออร์ครึ่งคลื่น

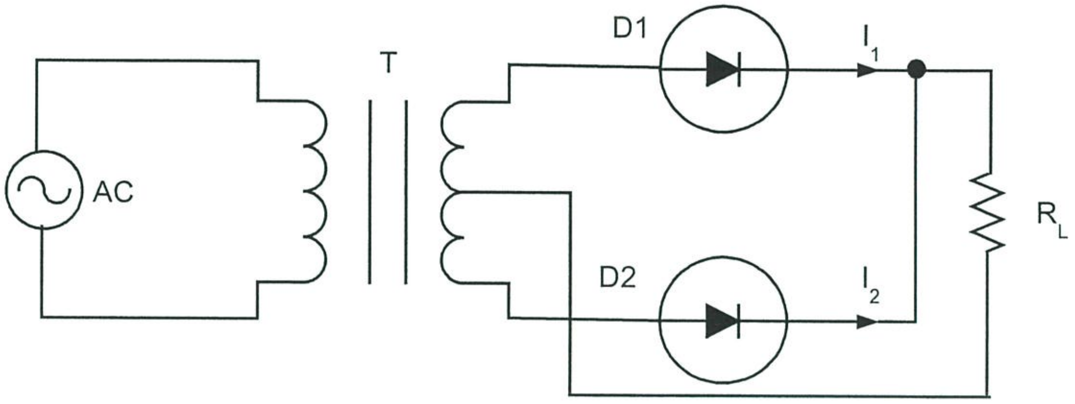
3.2.2 **วงจรเรคติฟายเออร์เต็มคลื่น** (Full wave rectifier)

หมายถึง วงจรที่ได้รับสัญญาณ AC จำนวน 1 Cycle แล้วเปลี่ยนเป็นไฟ DC ด้วยค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นเอาต์พุตเต็มคลื่นหรือเต็มไซเคิล ในวงจรเรคติฟายเออร์รูปที่ 3.6 เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่เรียงกระแสแต่ละตัวตัวละครึ่งคลื่น โดยได้รับแรงดันมาจากหม้อแปลงที่มีที่ต่อตรงกลางขดลวด วงจรแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แรงดันที่ได้จากหม้อแปลงตัวจ่ายกำลังออกที่ป้อนให้กับไดโอดทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 180 องศา คือข้างหนึ่งเป็นบวกอีกข้างหนึ่งเป็นลบ นั่นคือขณะที่ V_1 เป็นบวก กระแสอัดประจุจะไหลผ่านไดโอด D_1 พอถึงช่วงคลื่นลบไดโอด D_1 จะไม่นำกระแส แต่ V_2 เป็นบวกไดโอด D_2 จึงนำกระแส กระแสอัดประจุจะไหลผ่าน D_2 ไปยังโหลด R_L จะเท่ากับผลรวม i_1+i_2

$$I_{dc} = \frac{2\hat{I}}{\pi} \qquad \text{(A)} \qquad (3.1)$$

$$I_{rms} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

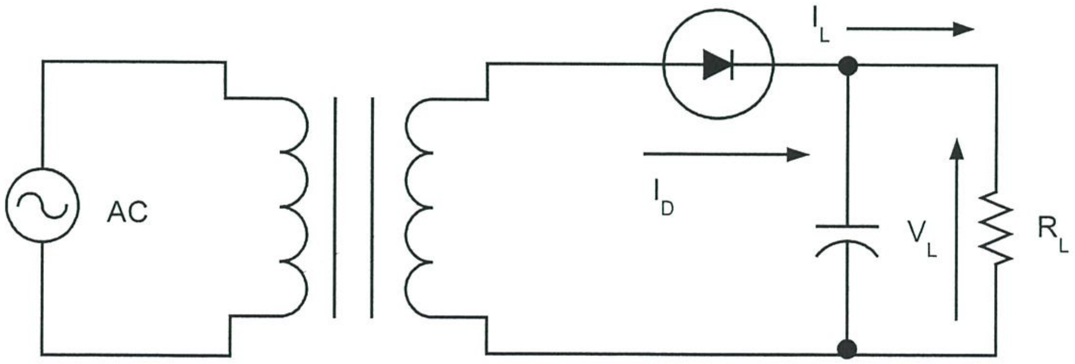
เพราะฉะนั้นแฟคเตอร์ระลอก $r = \sqrt{(1.11)^2 - 1}$ = 0.48 หรือ 48%



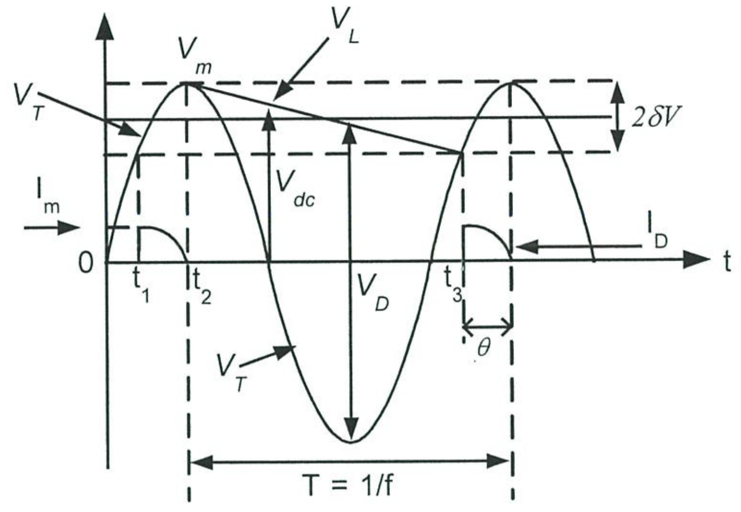
รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น Full wave rectifier

3.2.3 **ตัวเก็บประจุกรองกระแส** (Capacitor filter)

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทำให้แฟคเตอร์ระลอกลดลง เมื่อเทียบกับวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น คือจะลดลงมาจาก 121% ลดเหลือ 48% แต่ก็ยังนับว่ามีค่าสูงต่อการใช้งาน ปัญหานี้แก้ได้โดยใช้วิธีกรองกระแส ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้ตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อลดแฟคเตอร์ระลอกให้น้อยลง ตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้จะต่อคร่อมหรือขนานกับโหลด จึงอัดประจุในช่วงที่ไดโอดนำกระแส และจะปล่อยหรือคายประจุให้กับโหลดในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส



(ก) วงจร



(ข) รูปคลื่นแรงดัน

รูปที่ 3.7 วงจรเรคติฟายเออร์มีตัวเก็บประจุกรองกระแส

ในรูปที่ 3.7 (ก) แสดงถึงวงจรเรคติฟายเออร์ครึ่งคลื่น มีตัวเก็บประจุกรองกระแสให้คลื่นเรียบ ได้แรงดันออกมาดังในรูปที่ 3.7 (ข) สมมุติว่าไดโอดมีความต้านทานน้อย และวงจรทำงานถึงสภาพอยู่ตัว ที่ t = 0 แรงดันตัวจ่าย V_T เป็นศูนย์ แต่แรงดันคร่อมโหลด R_L กับ C เป็น V_L และ V_L จะลดลงตามเวลา เนื่องจากคายประจุให้ R_L ในขณะที่แรงดันตัวจ่าย V เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง V_T เริ่มจะสูงกว่า V_L เล็กน้อยที่ t_1 ไดโอดจะนำกระแส กระแสอัดประจุ i_D จะพุ่งขึ้นรวดเร็วเพื่อให้สอดคล้องกับความสัมพันธ์

$$i_D = \frac{Cdu}{dt} \tag{3.2}$$

กระแสอัดประจุนี้จะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันตัวจ่ายขึ้นสูงสุดถึงค่ายอด ขณะนั้นแรงดันอัดประจุคร่อม C จะเท่ากับค่ายอดของแรงดันตัวจ่าย $\hat{V}_T$ กระแส i_D จะหยุดไหล เมื่อแรงดันตัวจ่าย V เริ่มลดลงต่ำกว่า V_L ที่ t_2 ในช่วงอัดประจุ $t_1<t<t_2$

$$V_L = \hat{V} \tag{3.3}$$

ในช่วงคายประจุ $t_2<t<t_3$

$$VL = \hat{V}_m e^{-(t-t_2)/RC} \tag{3.4}$$

ในที่นี้

$$V_m = \hat{V}_T \tag{3.5}$$

เมื่อถึง t_3 แรงดันตัวจ่ายเริ่มมากกว่า V_L ไดโอดเริ่มนำกระแสอีก ครบรอบและซ้ำเดิมต่อไป กระแสที่ไหลผ่านโหลด R_L จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ V_L แต่จะไม่เป็นศูนย์ เพราะเมื่อ C หยุดอัดประจุ C จะคายประจุให้ R_L ต่อไป ค่าเฉลี่ยของกระแสจะสูงขึ้นมาก เมื่อเทียบกับวงจรเรคติฟายเออร์ครึ่งคลื่นที่ไม่มีตัวเก็บประจุกรองกระแส และคลื่นกระแสสลับ (ระลอก) ก็จะต่ำลง แฟคเตอร์ระลอกจะต่ำลงมากด้วย

3.2.4 การคำนวณหาแฟคเตอร์ระลอกเมื่อใช้วงจรมีตัวเก็บประจุกรองกระแส

เมื่อมีตัวเก็บประจุกรองกระแส แรงดันเรียงกระแสแล้ว หรือแรงดันกระแสตรงจะราบเรียบมากขึ้น มีค่าสูงสุด V_m เท่ากับค่ายอดของแรงดันตัวจ่ายคือ $V_m = \hat{V}_T$ แรงดันคลื่นระลอก หรือกระแสสลับที่ซ้อนอยู่คือ δV ฉะนั้นแรงดันเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง V_{dc} จะได้

$$V_{dc} = \hat{V}_T - \delta V \qquad (3.6)$$

ช่วงระยะอัดประจุ t_2-t_1 ยิ่งน้อย จะทำให้แรงดันที่เรียงกระแสแล้วราบเรียบมากขึ้น ไดโอดจะนำกระแสในช่วงสั้น แต่ไดโอดจะต้องรับแรงดันในช่วงแรงดันกลับทาง หรือในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแสมีค่า 2 เท่าของค่ายอดของแรงดันตัวจ่ายคือ

$$\hat{V}_D = 2\hat{V}_T \qquad (3.7)$$

เมื่อ $\hat{V}_D$ คือแรงดันคร่อมไดโอด เนื่องจากช่วงระยะเวลาอัดประจุ $t_d = t_2 - t_1 << T$

ฉะนั้นอาจคิดได้ว่าช่วงระยะเวลาที่แรงดันกลับทางเท่ากับ $T = \frac{1}{f}$ และเพราะว่าแรงดันระลอก δV มีค่าน้อยเทียบกับ V_{dc} $(\delta V << V_{dc})$ ฉะนั้นกระแสที่ตัวเก็บประจุ C จ่ายให้กับโหลดคิดเป็นประจุถ่ายทอด Q หาได้จาก

$$Q = I_{dc}T \approx 2C\delta V \left(I_{dc} = \frac{1}{T}\int_0^T i_L\, dt \right) \qquad (3.8)$$

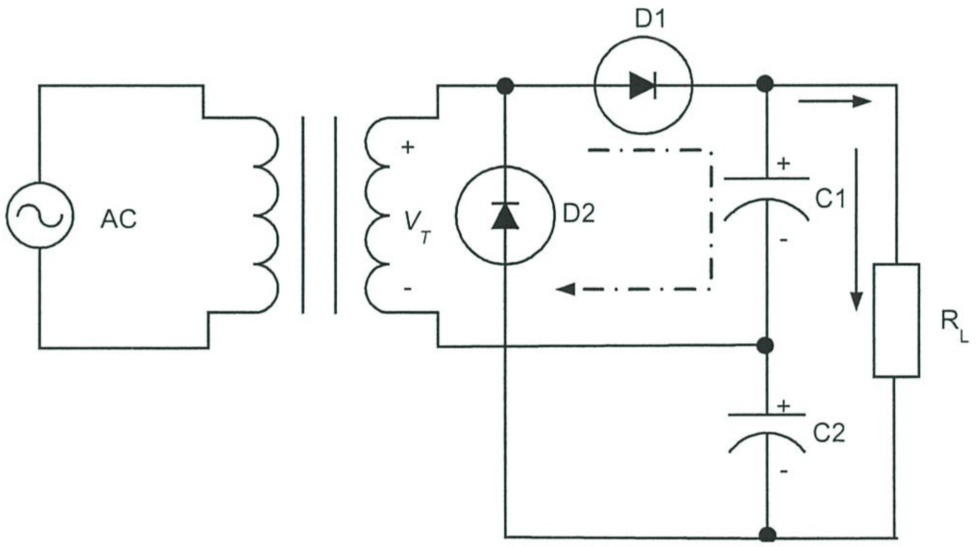
$$\delta V = \frac{I_{dc}}{2fc} \qquad (3.9)$$

ฉะนั้นแฟคเตอร์ระลอกคำนวณได้จากความสัมพันธ์

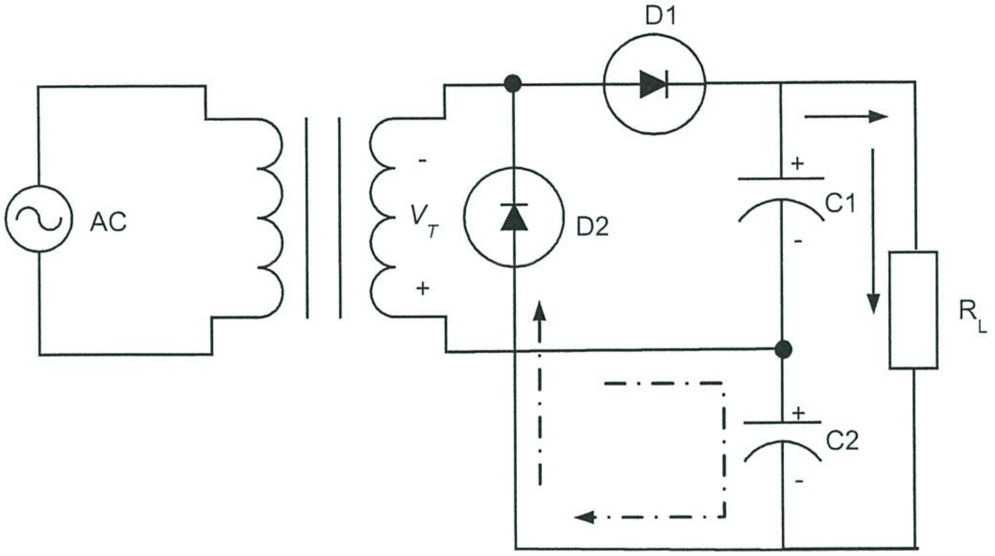
$$r = \frac{\delta V}{V_{dc}} \qquad (3.10)$$

3.2.5 **วงจรทวีแรงดันแบบเต็มคลื่น** (Full wave doubler)

วงจรทวีแรงดันแบบเต็มคลื่นสร้างมาจากวงจร Half wave rectifier แบบไฟบวกและแบบไฟลบ วงจรทวีแรงดันแบบเต็มคลื่นที่แสดงในรูปที่ 3.8 วงจรจะมีเร็กกูเรชั่นที่ดีกว่าแบบครึ่งคลื่น (Half wave) และออกแบบวงจรฟิลเตอร์ได้ง่ายกว่าด้วย วงจรนี้จะผลิตแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากแรงดันไฟฟ้าสลับ V_T ไปเป็นแรงดัน $2V_T$ ตกคร่อมที่ R_L การทำงานของวงจรนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ครึ่งไซเคิลแสดงที่รูป 3.8 (ก) ไดโอด D_2 จะคัทออฟและ D_1 จะนำกระแส แรงดันที่ C_1 จะเท่ากับ V_T ในครึ่งไซเคิลต่อมา จากรูปที่ 3.8 (ข) แรงดันที่เป็นบวกจะถูกแทนที่โดยแรงดันที่เป็นลบทำให้ D_2 ทำงานนำกระแสและ D_1 คัทออฟ ทำให้แรงดันที่ R_L ซึ่งตกคร่อมอยู่ระหว่าง C_1 และ C_2 ที่อนุกรมกันอยู่ทำให้แรงดันที่ R_L เท่ากับแรงดันที่ C_1 รวมกับแรงดันที่ C_2 คือ V_T บวก จะได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $2V_T$



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงสองเท่าแบบเต็มคลื่น

3.2.6 การหาขนาดของไดโอด

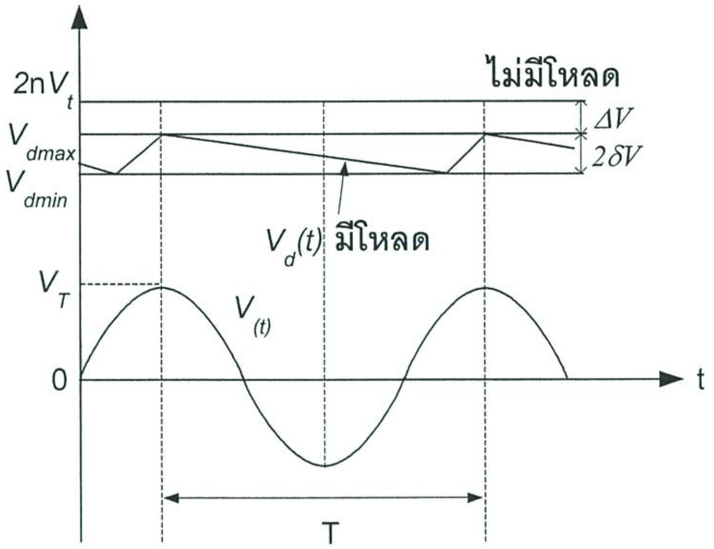
จากการพิจารณาและวิเคราะห์วงจร Full wave rectifier ข้างต้นนั้นจะเห็นว่าเมื่อ D_1 นำกระแสจะมีแรงดันตกคร่อม D_2 เท่ากับ $2V_P$ ในทำนองเดียวกันขณะที่ D_2 นำกระแสปรากฏว่ามีแรงดันตกคร่อม D_1 เท่ากับ $2V_P$ เช่นกันเพราะฉะนั้นในการเลือกขนาดไดโอดนั้นจะต้องทนแรงดัน reversed bias ไม่ต่ำกว่า $2V_P$

3.2.7 การคำนวณหาแรงดันระลอก

แรงดันกระแสที่ได้จากการเรคติฟายจากแรงดันกระแสสลับ โดยใช้ไดโอดเรียงกระแส และมีตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อให้ได้คลื่นเรียบ แต่คลื่นที่ได้ก็ยังเป็นระลอกดังที่ได้กล่าวแล้วในวงจรพื้นฐาน แรงดันระลอกของวงจรขั้นบันไดก็อาจหาได้เช่นเดียวกับวงจรที่มีไดโอดและตัวเก็บประจุกรองกระแสอย่างละตัว ในรูปที่ 3.7

ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ
$$\delta V = \frac{I_{dc}}{2fC} \tag{3.11}$$

เมื่อ	I_{dc}	=	ค่ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด (A)
	δV	=	ค่าแรงดันกระเพื่อม (V_p)
	f	=	ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันกระแสสลับที่จะแปลงเป็นกระแสตรง (Hz)
	C	=	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกรองกระแส (F)



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงในขณะมีโหลด

n = จำนวนขั้น

δV = แรงดันระลอก

ΔV = แรงดันตก

3.2.8 การคำนวณหาแรงดันตก ΔV

ผลจาก ripple ทำให้มีค่า voltage drop ผิดไปจากที่คิดตอนไม่มีโหลด ไปมีโหลด คาปาซิเตอร์พักประจุทุกตัวจะได้รับแรงดันอัดประจุน้อยกว่าที่คิด และส่งผลให้แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์กรองกระแสน้อยกว่าควรจะเป็น ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทจะตกลงจากรูปที่ 3.8 ในแต่ละไซเคิลจากการพิจารณาการจ่ายโหลดกระแส I_d ออกไปยังโหลดด้วยประจุ Q ไซเคิลช่วงบวก D_1 นำกระแสดังนั้นที่ C_1 จะต้องจ่ายประจุออกมา 1Q แรงดันตกใน $C_1 = \Delta V_{C1} = \dfrac{I_d}{fC}$

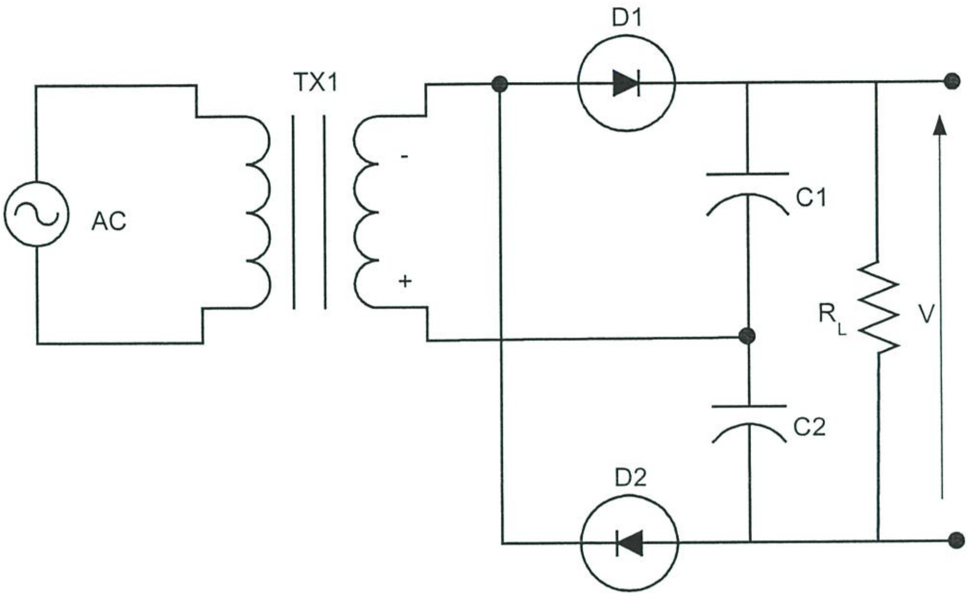
3.3 แหล่งจ่ายไฟแรงสูงกระแสตรง 50 kV

3.3.1 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแรงสูงกระแสตรง

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแรงสูง มีวงจรการสร้างแบบ Voltage- double circuit โดยแรงดันอินพุตควบคุมด้วยวงจรโซลิดเสตท ส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ไดโอดสำหรับเรียงกระแส ตัวคาปาซิเตอร์สำหรับยกระดับแรงดัน และลดริปเปิลแฟคเตอร์ (Ripple factor) ฉนวนที่กั้นระหว่างอุปกรณ์เป็นแบบเรซินฉนวนแข็ง สามารถสร้างแรงดันกระแสตรงได้ 50 kV กระแส 3 mA และมีค่าริปเปิลแฟคเตอร์น้อยกว่า 3 % สามารถเลือกขั้วแรงดันใช้งานได้ทั้งแบบขั้วบวกกับกราวนด์ และขั้วแรงดันแบบลบกับกราวนด์ได้ [15]

3.3.2 การออกแบบวงจรและออกแบบคาปาซิเตอร์

โดยการคิดที่ 1 stage



รูปที่ 3.10 วงจรทวีแรงดัน 1 stage

ข้อกำหนด

แรงดันเอาท์พุต	V_{dc}	=	50 kV_{dc}
กระแสเอาท์พุต	I_{dc}	=	3 mA
ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ	f	=	50 Hz
เปอร์เซ็นต์ริปเปิล	%ripple	≤	3%

จากข้อกำหนดข้างต้น จะพบว่าแรงดันเอาท์พุต 50 kV_{dc} นี้

เมื่อคิดแรงดันที่ 1 stage จะได้แรงดันที่เอาท์พุท

$$V = \frac{50000}{3000}$$

$$= 16.67 \ kV_{dc}$$

$$\therefore V = 16.67 \ kV_{p}$$

จากสมการที่ 3.11 $\delta V = \dfrac{I_{dc}}{2fC}$

$$\%ripple = \frac{\delta V_{rms}}{V_{dc}}$$ จาก %ripple = 3%

$$0.1 = \frac{\delta V_{rms}}{V_{dc}}$$

$$\delta V_{rms} = 0.1x16.667 \text{ kV}_p$$

$$\delta V = 1.667x\sqrt{2}$$

$$= 2.357 \text{ kV}_p$$

แทนค่า $$2.357 \text{ kV}_p = \frac{3\times 10^{-3}}{2\times 50\times C}$$

$$C = \frac{3\times 10^{-3}}{2\times 50\times 2.357\times 10^{3}}$$

$$\therefore C = 12.73 \text{ nF}$$

Safety factor 1.25

$$C = 15.91 \text{ nF}$$

เลือกใช้ C ที่ใช้งานจริง 0.208 μF

$$\delta V = \frac{I_{dc}}{2fC}$$

$$= \frac{3\times 10^{-3}}{2\times 50\times 0.208\times 10^{-6}}$$

$$= 144.231 \text{ V}_p$$

$$\delta V_{rms} = \frac{144.231}{\sqrt{2}}$$

$$= 101.987 \text{ V}_{rms}$$

หา %ripple $$= \frac{\delta V_{rms}}{V_{dc}}\times 100\%$$

$$= \frac{101.987}{16.667\times 10^{3}}\times 100\%$$

$$\therefore \%ripple = 0.6119\%$$

$\therefore$ ใช้ C ขนาด 0.208 μF %ripple ที่ได้จะไม่เกิน 3% ตามขอบเขตที่ต้องการ

3.3.3 การหาขนาดของหม้อแปลง

จากสูตร $$V_{dc} = 2nV_T - \Delta V - 2\delta V$$

โดย $$\delta V = 2.357 \text{ kV}_p$$

$$2\delta V = 4.714 \text{ kV}_p$$

หา $$\Delta V = \frac{I_d}{fC}$$

$$C = 0.208\ \mu\text{F}$$

$$\Delta V = \frac{3\times 10^{-3}}{50\times 0.208\times 10^{-6}}$$

$$\therefore \Delta V = 288.5 \text{ V}$$

ทำการคิดที่ 1 stage

$$16.667\ kV_p = 2(1)V_T - 288.5 - 4.7144\ \text{kV}_p$$

$$2V_T = 16.667kV_p + 288.5 + 4.714kV_p$$

$$= 21.67\ \text{kV}_p$$

$$V_T = 10.83\ \text{kV}_p$$

$$V_T = \frac{10.83kV_p}{\sqrt{2}}$$

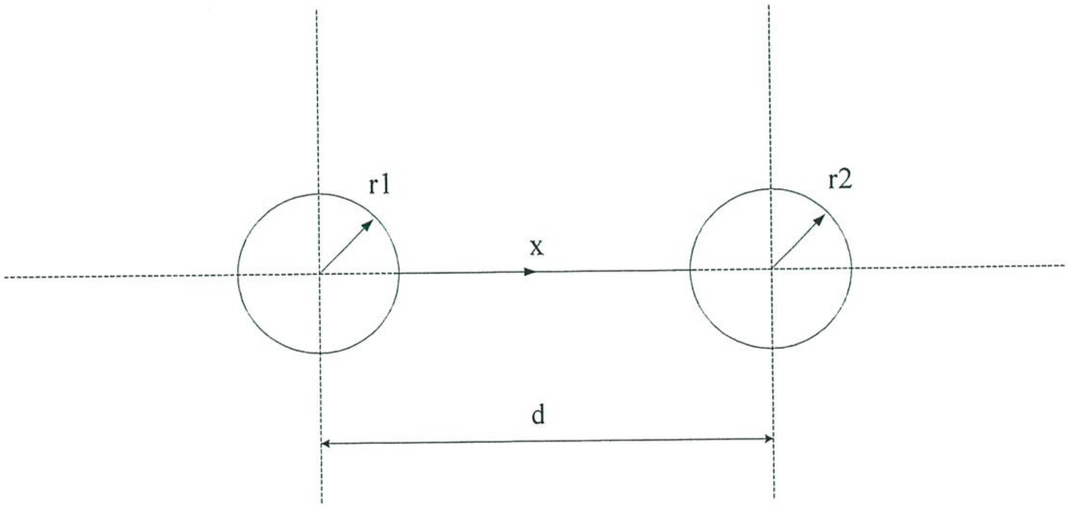
$$= 7.658\ \text{kV}_{rms}$$

ดังนั้นทำการเลือกหม้อแปลงขนาด 8 kV แต่ในการพันหม้อแปลง 8 kV กับ 10 kV นั้นราคาใกล้เคียงกันมาก และเพื่อประโยชน์ในการปรับค่า Error ที่เกิดขึ้นจึงเลือกใช้หม้อแปลงขนาด 220/10 kV

3.3.4 การออกแบบโครงสร้างและลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ที่เหมาะสม

การคำนวณหาระยะห่างของตัวเก็บประจุ

การคำนวณระยะห่างของตัวเก็บประจุแต่ละแถวบนแผ่นพลาสติก โดยคิดที่จุดบัดกรีของไดโอดระหว่างแถว ซึ่งพิจารณาจุดบัดกรีมีลักษณะเป็นอิเล็กโทรดแบบ ทรงกลม-ทรงกลม (Sphere to Sphere) ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สนามไฟฟ้าทรงกลม-ทรงกลม (ตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง)

ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$E_{max} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{x^2}+\frac{1}{(d-x)^2}\right) \quad (3.12)$$

$$E_{max} = \frac{U\left(\frac{1}{x^2}+\frac{1}{(d-x)^2}\right)}{\left(\frac{1}{r_A}+\frac{1}{r_B}-\frac{2}{d}\right)} \quad (3.13)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดที่ผิวทรงกลม ($x = r_1 = r_A = r_B = r_2$)

$$E_{max} = \frac{U\left(\frac{1}{r_B^2}+\frac{1}{(d-r_B)^2}\right)}{\left(\frac{1}{r_A}+\frac{1}{r_B}-\frac{2}{d}\right)} \quad (3.14)$$

โดย E_{max} = ค่าเฉลี่ยความคงทนของเรซิ่น ≈ 292.8 kV/เซนติเมตร

U = ค่าแรงดันยอดคลื่น = 60 kV

x = $r_A = r_B$ เป็นรัศมีของทรงกลมเล็กที่สุด = 0.2 เซนติเมตร

แทนค่า

$$\frac{292.8kV}{60kV} = \frac{\frac{1}{0.2^2}+\frac{1}{d^2}}{\frac{2}{0.2}-\frac{2}{d}}$$

$$4.88 = \frac{\frac{25d^2+1}{d^2}}{\frac{10d-2}{d}}$$

$$4.88 = \frac{25d^2+1}{d(10d-2)}$$

$$25d^2+1 = 4.88(10d^2-2d)$$

$$0 = 48.8d^2-9.76d-25d^2-1$$

$$0 = 23.8d^2-9.76d-1$$

จากกำลังสองสมบูรณ์

$$d = \frac{b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

$$= \frac{(9.76) \pm \sqrt{(9.76)^2-4(23.8)(1)}}{2(23.8)}$$

$$= \frac{9.76 \pm 13.801}{47.6}$$

d = 0.495 เซนติเมตร

เมื่อ Safety factor 250%

จะได้ระยะทางระหว่างจุดบัดกรี d = 1.238 เซนติเมตร

จะได้ระยะห่างระหว่างแถว $d+2r$ = 1.638 เซนติเมตร

3.3.5 การออกแบบหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 220 V/ 220 V 120 VA

ตารางที่ 3.2 แสดงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดขนาด 220/220 V

พิกัด = 120 VA	B = 0.9 T	A = 3.2 x 4 $(cm)^2$	
ด้านปฐมภูมิ			
N_1 = 860 turn	turn/ชั้น = 118 turn	V/ชั้น = 37.76 V	จำนวนชั้นทั้งหมด = 8 ชั้น
ขนาดขดลวด = # 25 SWG.			
ด้านทุติยภูมิ			
N_2 = 860 turn	turn/ชั้น = 118 turn	V/ชั้น = 37.76 V	จำนวนชั้นทั้งหมด = 8 ชั้น
ขนาดขดลวด = # 25 SWG.			

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 220 V/ 10,000 V 250 VA

ตารางที่ 3.3 แสดงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดขนาด 220/10,000 V

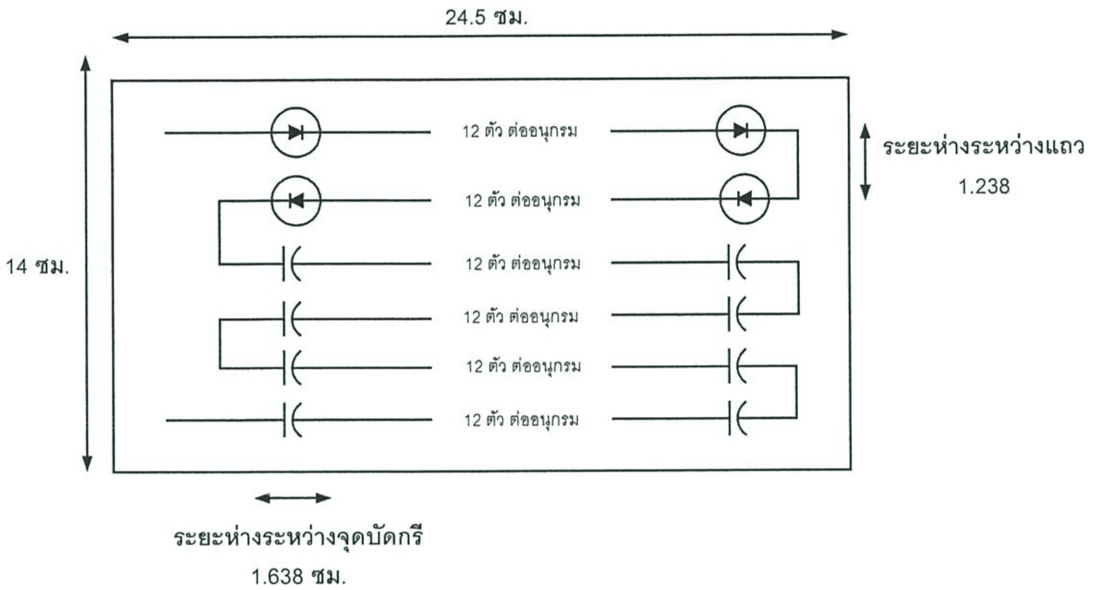
พิกัด = 250 VA	B = 0.9 T	A = 3.2 x 6 $(cm)^2$	
ด้านปฐมภูมิ			
N_1 = 575 turn	turn/ชั้น = 85 turn	V/ชั้น = 40.687 V	จำนวนชั้นทั้งหมด = 7 ชั้น
ขนาดขดลวด = # 22 SWG.			
ด้านทุติยภูมิ			
N_2 = 26,150 turn	turn/ชั้น = 592 turn	V/ชั้น = 283.42 V	จำนวนชั้นทั้งหมด = 45 ชั้น
ขนาดขดลวด = # 42 SWG.			

3.3.6 การออกแบบโครงสร้างและติดตั้งอุปกรณ์

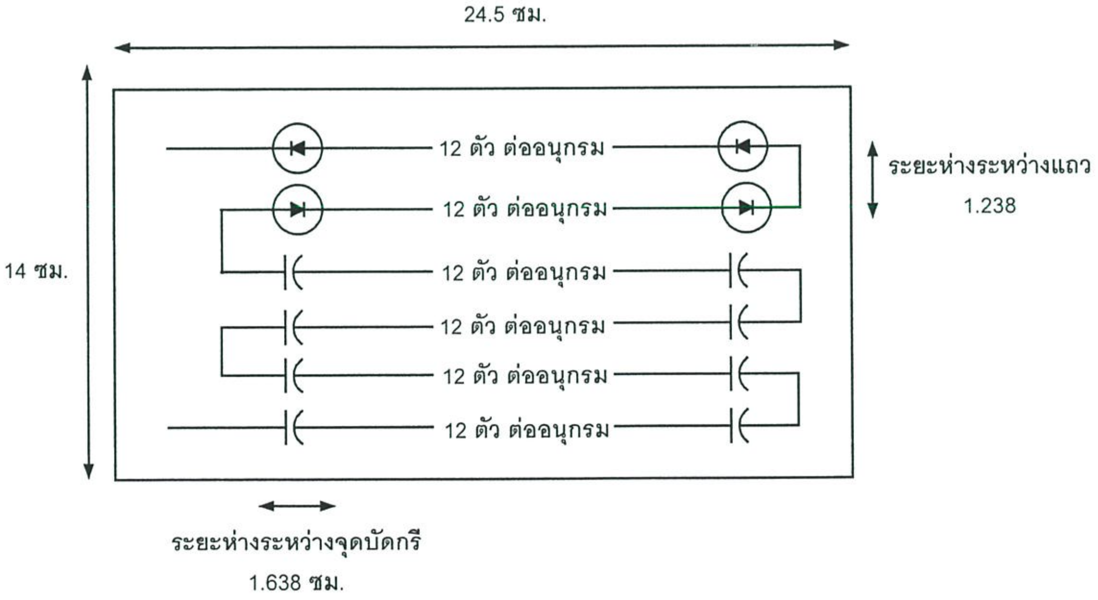
3.3.6.1 การจัดวางคาปาซิเตอร์และการจัดวางไดโอด

จากชุดทดลองตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบอิเล็กทรอไลน์ ซึ่งมีค่า 10 μF ทนแรงดันได้ 450 V นำมาอนุกรมกัน 48 ตัว จะได้ค่าคาปาซิเตอร์ 0.208 μF ซึ่งเมื่อต่ออนุกรมแล้ว คาปาซิเตอร์

สามารถทนแรงดันได้ 20 kV ต่ออนุกรมกับไดโอดซึ่งใช้ Power Diode เบอร์1N5408 จำนวน 24 ตัวตัวละ 1.2 kV ซึ่งทนแรงดันได้ 28.8 kV โดยแผงอุปกรณ์จะแบ่งเป็น แผงที่ 1 กับแผงที่ 2 ของแต่ละ Stage ซึ่งในแต่ละแผงนั้นจะประกอบด้วยไดโอด 1 ตัว และคาปาซิเตอร์อีก 1 ตัว ดังรูปที่ 3.12



(ก) แผงอุปกรณ์ชุดบวก

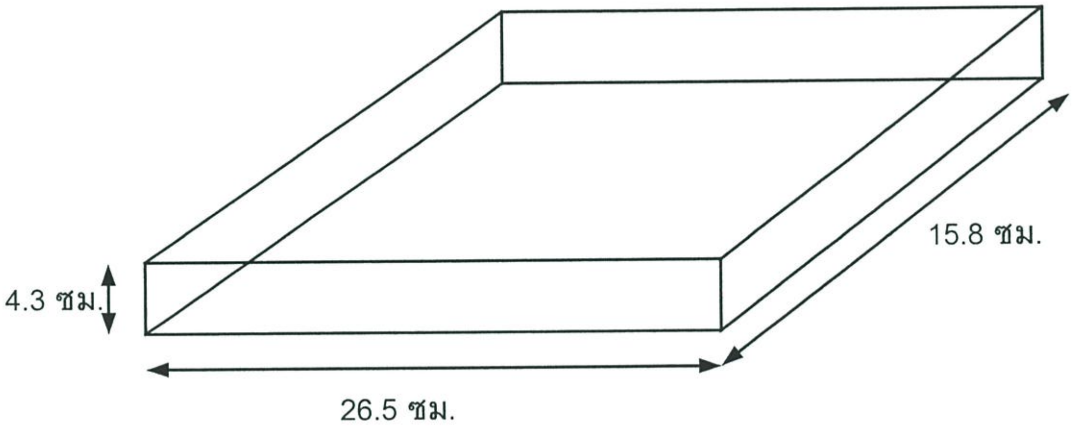


(ข) แผงอุปกรณ์ชุดลบ

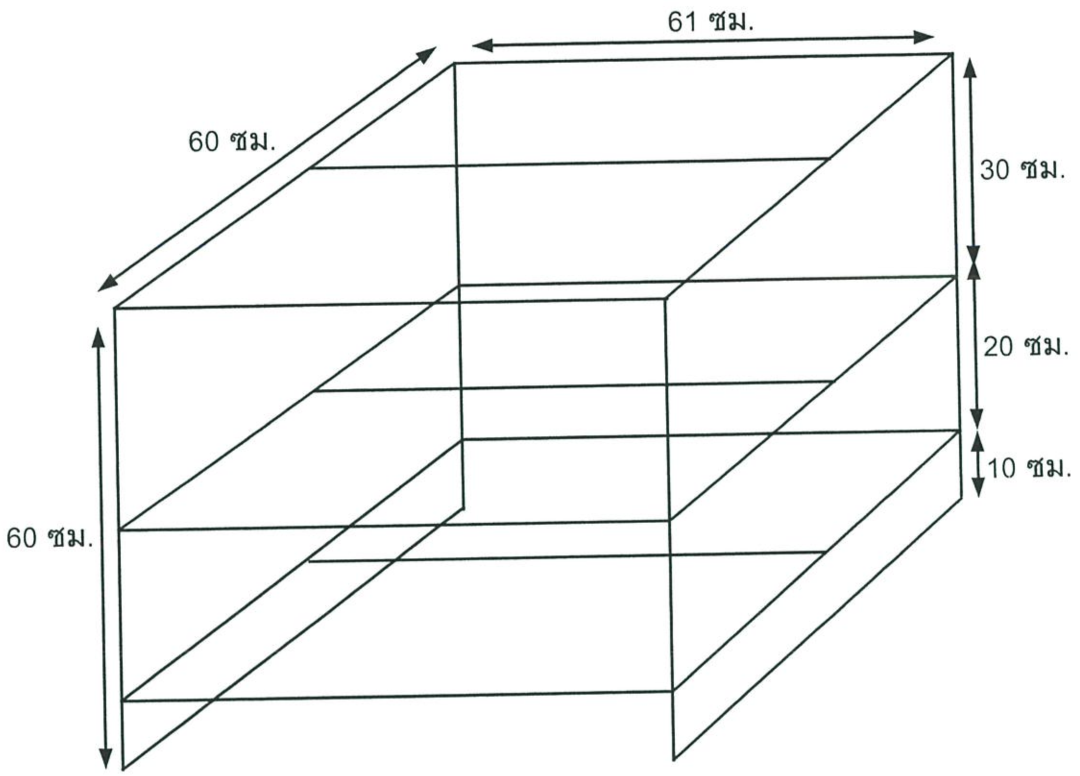
รูปที่ 3.12 การจัดวางคาปาซิเตอร์และไอโอด

3.3.6.2 **การออกแบบโครงสร้าง**

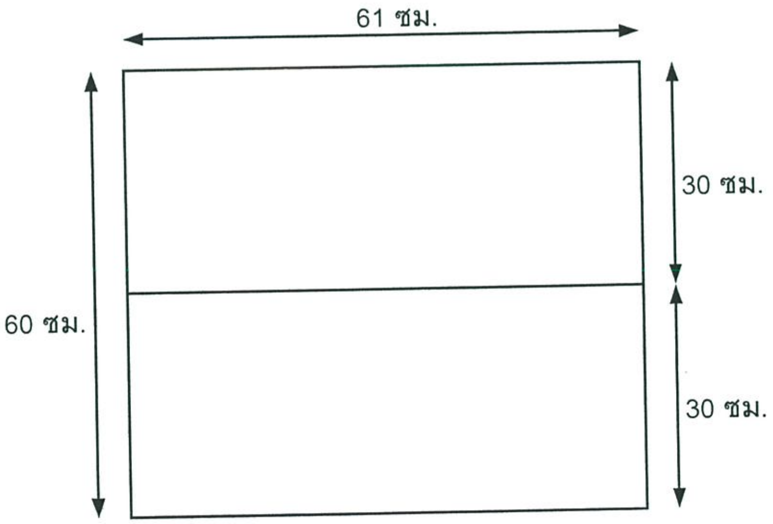
เป็นการเอาอุปกรณ์คือคาปาซิเตอร์และไดโอด โดยนำมายึดบนแผ่นพลาสติกหนา 0.6 เซนติเมตร โดยการเจาะพลาสติกเพื่อใช้สำหรับจับยึดตัวอุปกรณ์ คือ คาปาซิเตอร์ และไดโอด โดยปล่อยให้จุดเชื่อมต่ออุปกรณ์ลอยอยู่เหนือวัสดุที่นำมาทำโครงสร้างคือ แผ่นพลาสติกมีความหนา 0.4 เซนติเมตร โดยประกอบแผ่นพลาสติกเป็นถังสี่เหลี่ยมขนาด 15.8 x 26.5 x 4.3 เซนติเมตร เพื่อเป็นกล่องในการหล่อเรซินกับอุปกรณ์ โดยจะประกอบชั้นวางอุปกรณ์เป็น 2 ชั้น โดยที่แบ่งเป็นชั้นวางแผงอุปกรณ์คาปาซิเตอร์และไดโอดไว้ด้านบน ส่วนด้านล่างเป็นที่รองรับหม้อแปลง โดยทำการออกแบบให้มีขนาด 90 x 76 x 448 เซนติเมตร ชั้นล่างสูง 24 เซนติเมตร ชั้นบนสูง 22 เซนติเมตร โดยชั้นบนได้ใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1 x 1 นิ้ว ทำเป็นโครง ส่วนชั้นนั้นใช้แผ่นพลาสติกขนาด 0.6 เซนติเมตร เป็นพื้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.13



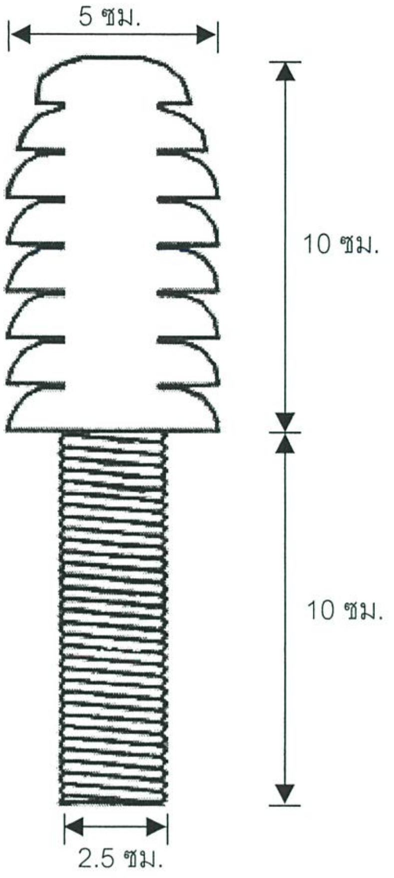
(ก) โครงสร้างของกล่องบรรจุคาปาซิเตอร์และไดโอดที่มองภาพโดยรวม



(ข) โครงสร้างของชั้นวางที่มองจากภาพโดยรวม



(ค) โครงสร้างของชั้นวางที่มองจากด้านบน

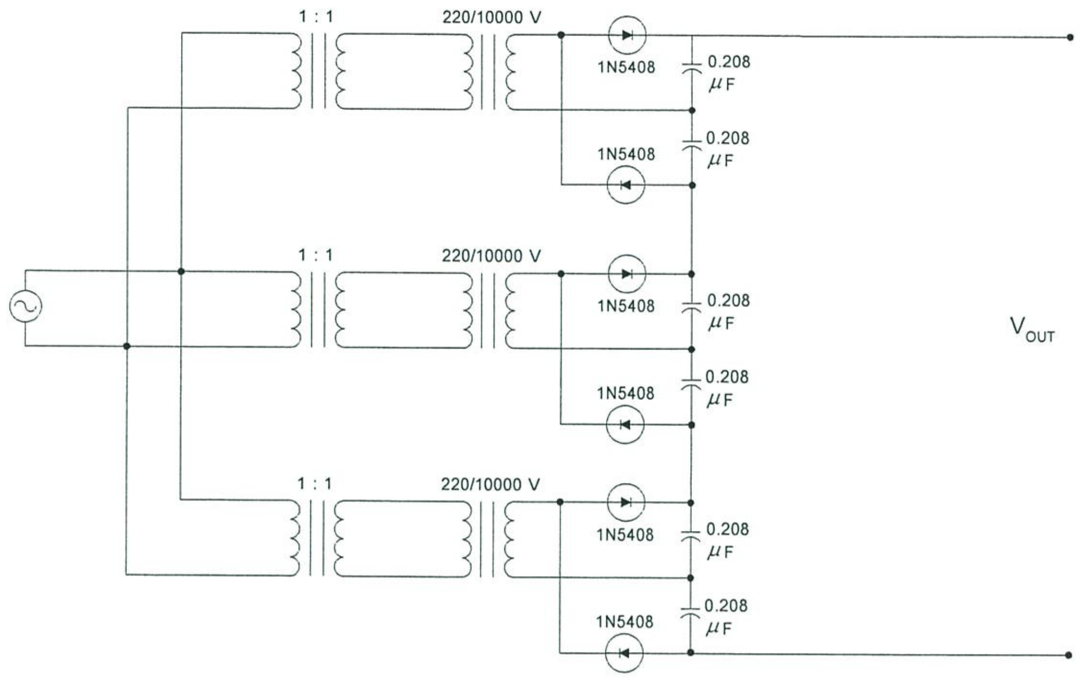


(ง) ขั้ว Output ทางด้าน 50 kV

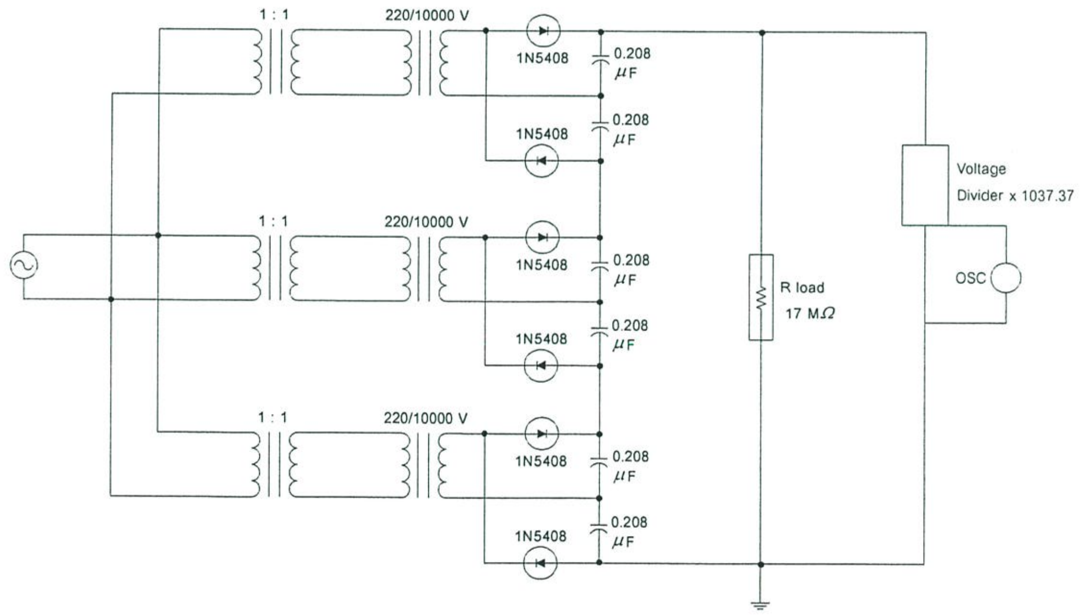
รูปที่ 3.13 โครงสร้างและชั้นวางอุปกรณ์

3.4 **การทดสอบวงจรทวีแรงดัน** 3 Stage (Cascade Double Circuit Test)

การทดสอบและประเมินผล เพื่อหาคุณลักษณะสมบัติของวงจรสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ตามที่ได้ทำการออกแบบได้ว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ ทำให้ทราบองค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อแรงดันตกคร่อม แรงดันระลอก คือตัวเก็บประจุ ไดโอด ตัวต้านทาน ในการทดสอบแบ่งตามการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เอาต์พุตแบบบวก (Positive) จะทดสอบแบบไม่มีโหลด และมีโหลด โหลดทดสอบ คือ Resistance 17 MΩ (100% ของกระแสโหลดสูงสุดที่ 3 mA) วงจรทวีแรงดัน 3 Stage และวงจรในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.14 วงจรทวีแรงดัน 3 Stage



รูปที่ 3.15 การทดสอบวงจรทวีแรงดัน 3 Stage แบบ Positive

3.4.1 ขั้นตอนการทดสอบวงจรทวีแรงดัน 3 Stage

1. ต่อวงจรในการทดสอบวงจรทวีแรงดันในรูปที่ 3.16

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงโดยใช้ Variac เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (แรงดันอินพุตของหม้อแปลง) จ่ายแรงดัน Step ละ 20 โวลท์

3. ทดสอบแบบไม่มีโหลด

    3.1 ปรับแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{DC} Output) ของ DC High Voltage Generator จากออสซิลโลสโคป YOKOGAWA โดยใช้ Probe x 10

    3.2 บันทึกค่าลงตาราง

4. ทดสอบแบบมีโหลด

    4.1 ปรับแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{DC} Output) ของ DC High Voltage Generator จากออสซิลโลสโคป YOKOGAWA โดยใช้ Probe x 10

    4.2 บันทึกค่าลงตาราง

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าการทดสอบแบบไม่มีโหลด

V_{AC} (Input) (V)	$I_{(total)}$ (A)	V_{DC} (Output) (kV)	V_{ripple} (V)	% ripple (%)
20	0.13	6.62	331.95	5.01
40	0.18	13.50	331.95	2.45
60	0.22	20.67	331.95	1.60
80	0.25	29.01	331.95	1.14
100	0.27	36.72	352.70	0.96
120	0.29	43.42	352.70	0.81
140	0.32	51.19	352.70	0.68
155	0.34	56.40	352.70	0.62

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าการทดสอบแบบมีโหลด โหลดทดสอบ คือ Resistance 17 MΩ

V_{AC} (Input) (V)	$I_{(total)}$ (A)	V_{DC} (Output) (kV)
20	0.18	5.14
40	0.31	10.58
60	0.44	15.75
80	0.58	21.78
100	0.71	27.26
120	0.82	32.04
140	0.97	37.54
160	1.12	43.33
180	1.27	48.26
200	1.44	53.19
220	1.63	58.56

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าเปอร์เซนต์ริปเปิล (% ripple)

V_{AC} (Input) (V)	V_{DC} (Output) (kV)	V_{ripple} (V)	% ripple (%)	I_{DC} (mA)
20	5.14	342.33	6.65	0.32
40	10.58	352.70	3.33	0.66
60	15.75	373.45	2.37	0.98
80	21.78	394.20	1.81	1.36
100	27.26	404.57	1.48	1.70
120	32.04	414.94	1.29	2.00
140	37.54	435.69	1.16	2.34
160	43.33	456.44	1.05	2.70
180	48.26	456.44	0.94	3.01
200	53.16	487.56	0.91	3.32
220	58.56	497.93	0.85	3.66

การคำนวณค่าเปอร์เซนต์ Voltage regulation จะคำนวณโดยใช้ค่าแรงดันอินพุตที่พิกัดแรงดัน 100 V

$$V_{full-load} \approx 27.30 \text{ kV}$$

$$V_{no-load} \approx 36.70 \text{ kV}$$

$$V_{ripple} = \delta V_{rms} = \frac{2\delta V_{rms}}{2}$$

$$= \frac{809.14}{2}$$

$$= 404.57 \; V_{rms}$$

$$\% \text{ ripple} = \frac{\delta V_{rms}}{V_{DC}} \times 100$$

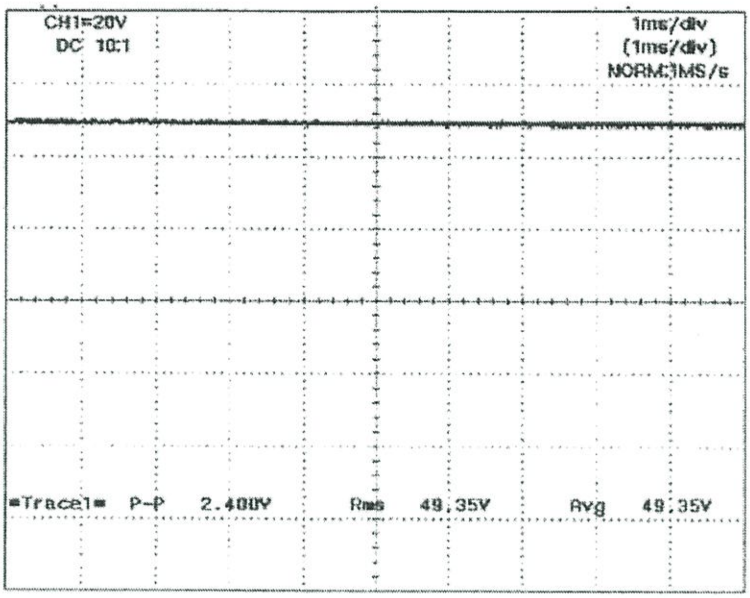
$$= \frac{404.57}{27.26 \times 10^{3}} \times 100$$

$$= 1.48 \%$$

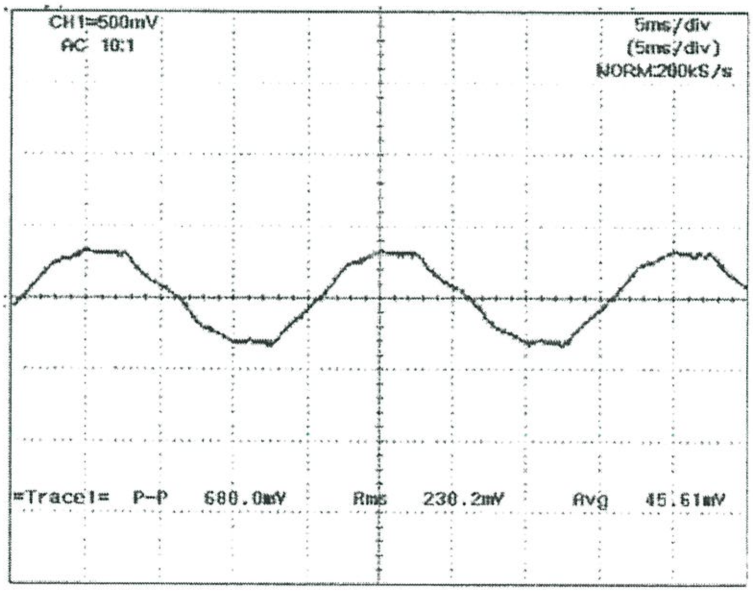
$$\% \text{ Voltage regulation} = \frac{V_{no-load} - V_{full-load}}{V_{full-load}} \times 100\%$$

$$= 34.40 \%$$

รูปสัญญาณแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Variac ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุต รูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 แสดงสัญญาณแรงดัน Output ขณะไม่มีโหลด และสัญญาณแรงดันระลอก Output ขณะไม่มีโหลด เมื่อจ่ายแรงดัน Input 140 Volt โดยใช้ Oscilloscope YOKOGAWA โดยใช้ Probe x 10 โดยวัดผ่านตัวแปลงแรงดัน (R Divider อัตราส่วน 1037:1) ซึ่งจากการวัดสัญญาณดังกล่าว จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ Ripple เท่ากับ 1.37 % ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของ IEC 60-1 ที่กำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันสูงต้องมีค่าเปอร์เซ็นต์ Ripple ไม่เกิน 5 %



รูปที่ 3.15 สัญญาณแรงดัน Output ขณะไม่มีโหลด เมื่อจ่ายแรงดัน input 140 Volt



รูปที่ 3.16 สัญญาณแรงดันระลอก Output ขณะไม่มีโหลด เมื่อจ่ายแรงดัน input 140 Volt

3.5 **การนำแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรงมาใช้ในงานวิจัย**

ในงานวิจัยนี้ได้นำแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรงมาใช้ โดยมีพิกัดขนาด 50 kV กระแส 3 mA ripple น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3% เป็นการสร้างแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรงโดยอาศัยวงจรพื้นฐานการสร้างแรงดันสองเท่ามาต่ออนุกรมกัน สามารถเลือกขั้วแรงดันใช้งานได้ทั้งแบบขั้วบวกกับกราวนด์ และขั้วแรงดันแบบลบกับกราวนด์ได้ โดยในงานวิจัยเลือกใช้งานแบบขั้วแรงดัน

ลบและขั้วแรงดันบวกต่อลงกราวด์ สนามไฟฟ้ามีทิศชี้ขึ้นจากแผ่นระนาบอิเล็กโทรดล่างไปยังแผ่นระนาบอิเล็กโทรดบน

บทที่ 4
การประยุกต์ใช้งานไฟไนท์อิลิเมนต์ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า

4.1 บทนำ

วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite element method: FEM) [16] เป็นวิธีเชิงตัวเลขหรือวิธีการหาคำตอบโดยประมาณที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบของปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างใดๆ เนื่องจากการหาคำตอบตามวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์นั้น ต้องแบ่งโดเมนที่ต่อเนื่องของปัญหาทั้งหมดออกเป็นโดเมนย่อยๆ (Sub domains) หรือที่เรียกว่าอิลิเมนต์ ก่อน แล้วจากนั้นจึงสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ อิลิเมนต์ต่างๆเหล่านี้จะเชื่อมต่อกันที่จุดโหนด (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณหาค่าของตัวแปรตามที่ต้องการ ขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับการหาคำตอบของปัญหาในลักษณะเดียวกันด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์นั้นจะกระทำได้ยาก และยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับรูปร่างปัญหาในการหาคำตอบอีกด้วย นอกจากนี้วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์จะให้คำตอบในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากเมทริกซ์สุดท้ายของระบบสมการจะเป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยศูนย์เป็นส่วนใหญ่ ขณะเดียวกันวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์มีข้อด้อยคือ เมื่อนำมาใช้หาคำตอบที่บริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่งจะไม่สามารถทำได้ เนื่องจากไม่สามารถที่จะแบ่งอิลิเมนต์ถึงระยะอนันต์ตามขั้นตอนของวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ได้ และปัญหาหน่วยความจำไม่เพียงพอในการคำนวณ แต่กล่าวโดยรวมแล้ว วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้หาคำตอบปัญหาสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดที่จ่ายให้กับเมล็ดข้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งานกับงานวิจัยนี้ ซึ่งมีรูปร่างต่างๆได้ดี

4.2 ขั้นตอนวิธีทางไฟไนท์อิลิเมนต์

การวิเคราะห์โดยหลักวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ของระบบทางวิศวกรรม จะต้องสร้างไฟไนท์อิลิเมนต์โมเดลขึ้น ซึ่งจะอธิบายโมเดลนี้ในทางคณิตศาสตร์ โดยจำลองตามแบบของระบบจริง โมเดลประกอบด้วย Node, Element และ Boundary Condition

1. Node เป็นตำแหน่งพิกัดใน Space ที่ องศาอิสระเป็นระยะขจัด (Displacment) ตำแหน่งโหนดแถวบนป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0 V และแถวล่างเท่ากับ 5.7 kV เพื่อที่ Node จะพิจารณาสิ่งที่กระทำต่อระบบ คือสนามไฟฟ้า

2. Element เป็นเส้น (Line) พื้นที่ (Area) ของโมเดลใน 2 มิติ หรือ 3 มิติ ซึ่งสามารถแทนในรูปทางคณิตศาสตร์ เป็นเมตริกซ์ที่เรียกว่า Stiffness Matrix หรือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ (Coefficient Martix) แทนการทำงานทั้งหมดที่องศาอิสระ ของชุดโหนด Node และอิลิเมนต์ ซึ่งใน

งานวิจัยจะพิจารณา 2 มิติ กำหนดชนิดของอิลิเมนต์เป็น PLANE 121 โดยใช้อิลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมในบริเวณอากาศ ชุดอิเล็กโทรด และบริเวณเมล็ดข้าว [17]

3. Boundary Condition คือเงื่อนไขขอบเขตที่กระทำต่อระบบ งานวิจัยนี้ใช้แรงดันกระแสตรง 5,700 โวลต์ ที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง และแรงดัน 0 โวลต์ ที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดด้านบน ขั้วอิเล็กโทรดมีขนาด 1.2 x 1.2 เมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร โดยไม่มีอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นมาเกี่ยวข้อง

วิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอนคือ

1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย
2. การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ เช่นอิลิเมนต์สี่เหลี่ยมประกอบด้วย 3 จุดต่อ โดยที่จุดต่อนั้นเป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่รู้ค่า ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนอิลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้
3. การสร้างสมการมาทำการแก้ไขปัญหาเพื่อหาค่าในแต่ละอิลิเมนต์
4. การนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ทำให้เกิดสมการของระบบทั้งหมด
5. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต และแก้สมการที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ
6. เมื่อมีการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากจุดต่อออกมาแล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการได้ต่อไป

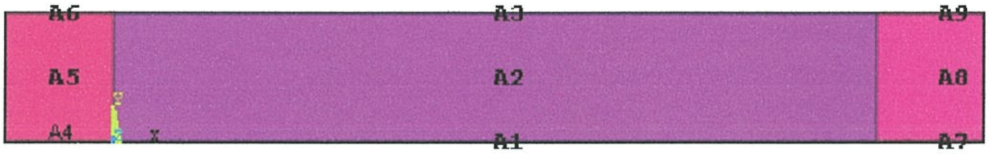
เมื่อทราบจุดมุ่งหมายในการวิเคราะห์และใช้การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์กับทางไฟฟ้า โดยวิเคราะห์หาการกระจายศักย์ไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้ากรณีชุดอิเล็กโทรดว่างไม่มีการใส่ชิ้นงานภายในแผ่นอิเล็กโทรด และในกรณีที่กระทำกับเมล็ดข้าว โดยวิเคราะห์ในลักษณะ 2 มิติ

ข้อยกเว้นในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

1. การพิจารณาสนามไฟฟ้าจะไม่พิจารณาบริเวณกล่องพลาสติกที่ใส่เมล็ดข้าว และกระดาษทดสอบความงอกที่ใส่ในกล่องพลาสติก แต่จะพิจารณาบริเวณเมล็ดข้าว และอากาศภายใต้แผ่นอิเล็กโทรด
2. การใส่เมล็ดข้าวภายในกล่องทดสอบจำนวน 100 เมล็ด แต่ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเบื้องต้น จะใช้เมล็ดข้าว 1 เมล็ด
3. การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าไม่พิจารณาหัวข้ออุณหภูมิ และความชื้น
4. ในการวาดรูปเมล็ดข้าว เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ในการศึกษาเบื้องต้น จึงวาดรูปเมล็ดข้าวเป็นแบบดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นแบบง่ายที่สุดมีขนาดใกล้เคียงเมล็ดจริงมากที่สุด

4.3 การนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้า

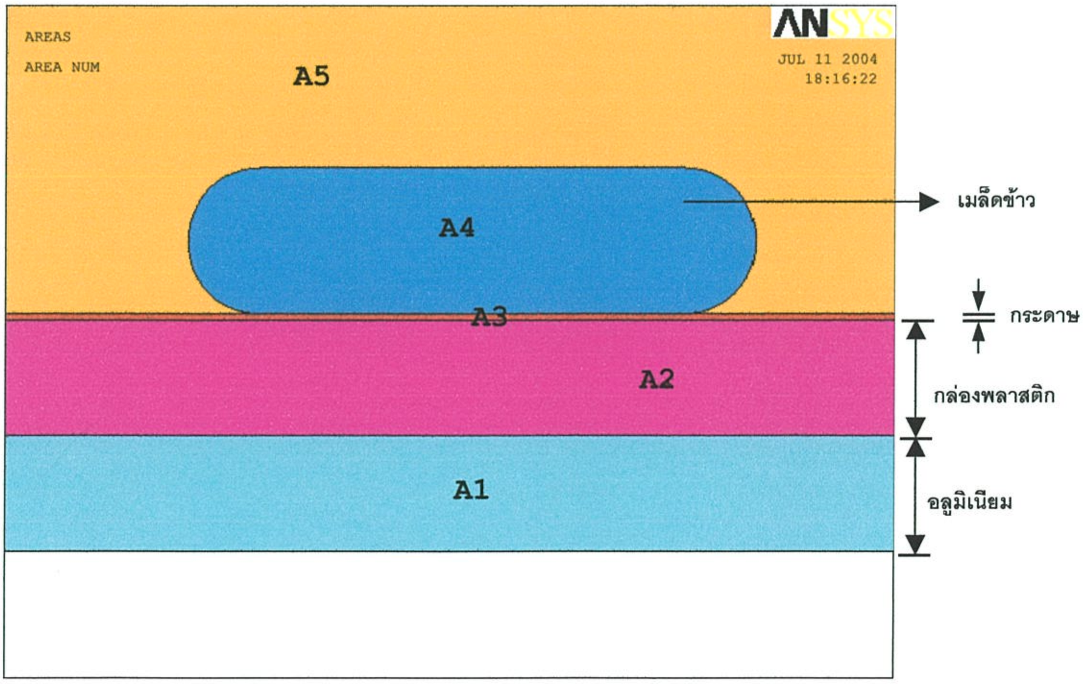
วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์นำมาใช้หาคำตอบปัญหาการกระจายระดับแรงดันสนามไฟฟ้า ระหว่างชุดอิเล็กโทรด และสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเมล็ดข้าว โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งบริเวณโดเมนที่ต่อเนื่องของปัญหาทั้งหมดออกเป็นโดเมนย่อยๆ หรืออิลิเมนต์ แบ่งอิลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม พิจารณาในระนาบ 2 มิติ คือบริเวณแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า บริเวณอากาศว่าง และบริเวณเมล็ดข้าว จากนั้นมีการประมาณคำตอบคำตอบภายในแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งเป็นในกรณีที่ยังไม่ใส่เมล็ดข้าวเข้าไปในขั้วอิเล็กโทรด มีการแบ่งพื้นที่ดังรูปที่ 4.1 และในกรณีใส่เมล็ดข้าวเข้าไปในบริเวณกลางแผ่นอิเล็กโทรดอลูมิเนียม มีการแบ่งพื้นที่ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะการแบ่งโดเมนที่ต่อเนื่องออกเป็นขอบเขตต่างๆ

หมายเหตุ : บริเวณ A2, A4, A5, A6, A7, A8 และ A9 คือบริเวณอากาศ

บริเวณ A1 และ A3 คือบริเวณแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 4.2 พื้นที่ในการวิเคราะห์ (บริเวณเมล็ดข้าว)

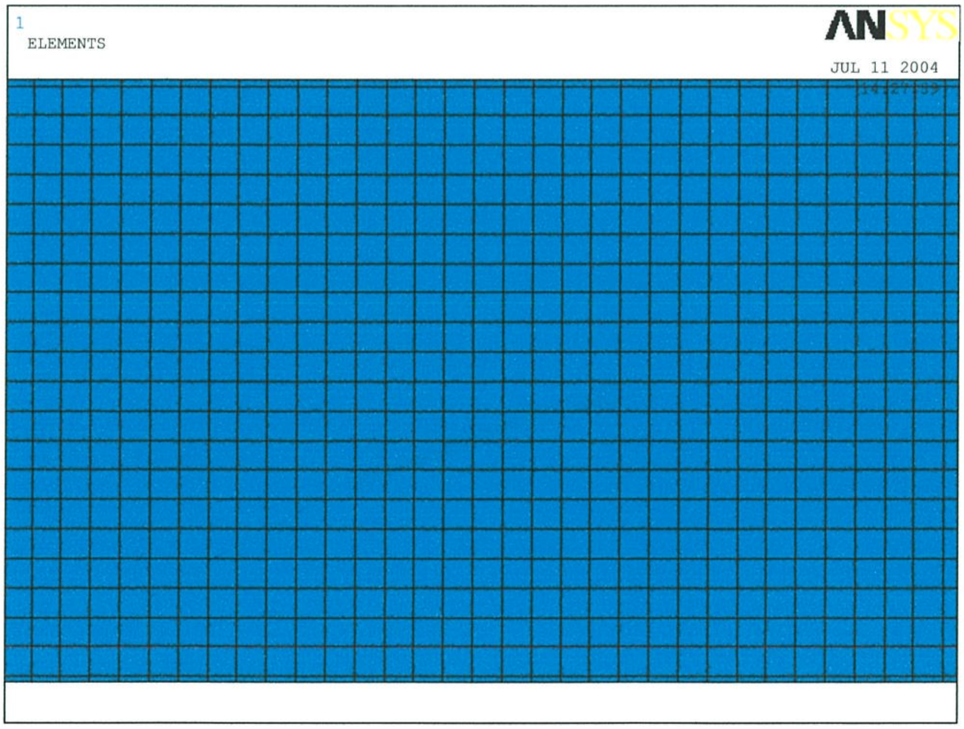
หมายเหตุ : A5 หมายถึงบริเวณอากาศห่างจากบริเวณอลูมิเนียม 20 เซนติเมตร

A4 หมายถึงเมล็ดข้าว ขนาดกว้าง 2.53 มิลิเมตร และยาว 9.87 มิลิเมตร รัศมีความโค้ง 1.23 มิลลิเมตร การวาดรูปเมล็ดข้าวได้ใกล้เคียงเมล็ดข้าวจริงได้ดังรูปแบบดังกล่าว ค่าที่ใช้ในการคำนวณ เป็นค่าที่คิดจากเนื้อเมล็ดทั้งหมด โดยเมล็ดข้าววางอยู่บนกล่องพลาสติก หนา 0.2 เซนติเมตร และวางบนกระดาษหนา 0.1 เซนติเมตร (พื้นที่ A3) ดังนั้นเมล็ดจะห่างจากขั้วอิเล็กโทรดล่าง 0.3 เซนติเมตร

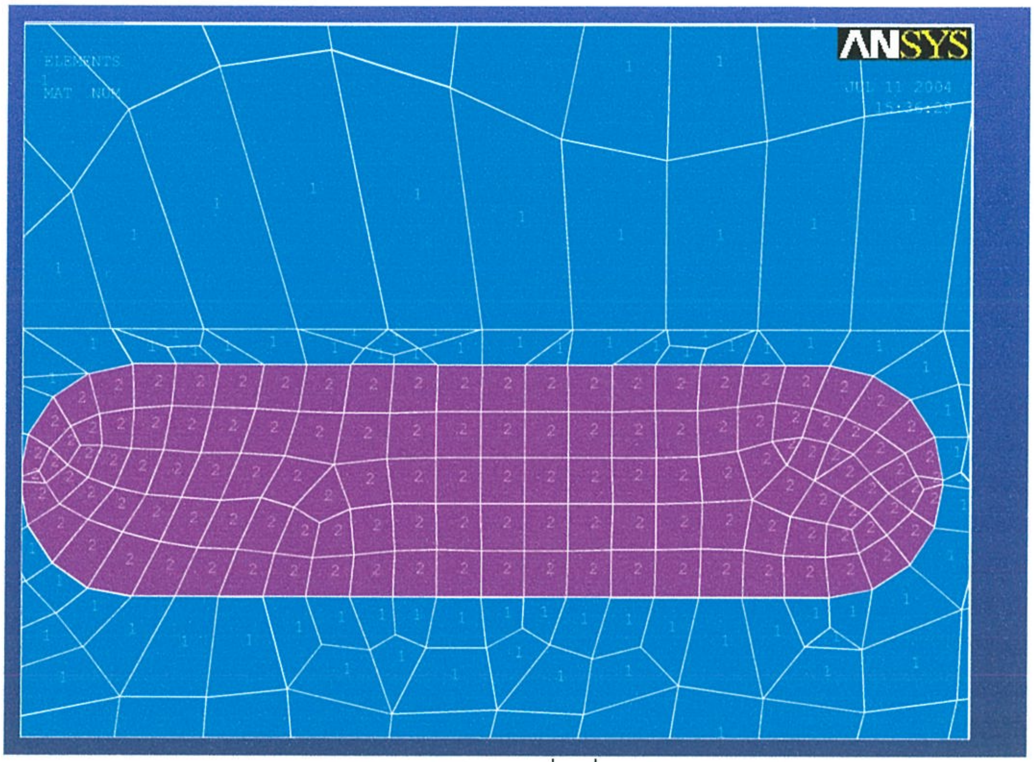
A5 หมายถึงบริเวณอลูมิเนียมความหนา 0.2 เซนติเมตร ความยาว 1.2 เมตร

4.3.1 ลักษณะการกระจายระดับแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้อิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ แบ่งโครงสร้างของชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้า อากาศว่าง และเมล็ดข้าวเป็น 10 พื้นที่ กำหนดโมเดลของแผ่นอิเล็กโทรด ขนาด 1.2 x 1.2 เมตร และไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 20 เซนติเมตร แบ่งออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย 7,040 อิลิเมนต์ ขนาดอิลิเมนต์ละ 0.01 x 0.01 เมตร มีจำนวนโหนด 15,181 โหนด มีการแบ่งอิลิเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมในพื้นที่ทั่วไป และบริเวณเมล็ดข้าว สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.3



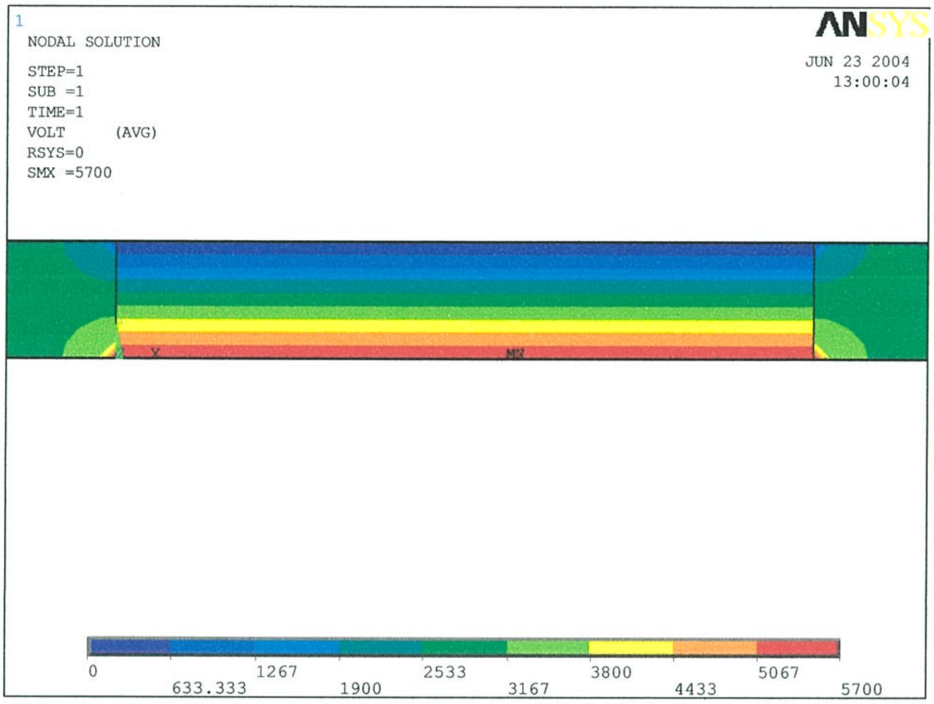
(ก) การแบ่งอิลิเมนต์กรณีแผ่นอิเล็กโทรดว่างไม่มีชิ้นงาน



(ข) การแบ่งอิลิเมนต์เป็นแบบสี่เหลี่ยมบริเวณเมล็ดข้าว

รูปที่ 4.3 การแบ่งอิลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ไฟไนท์อิลิเมนต์

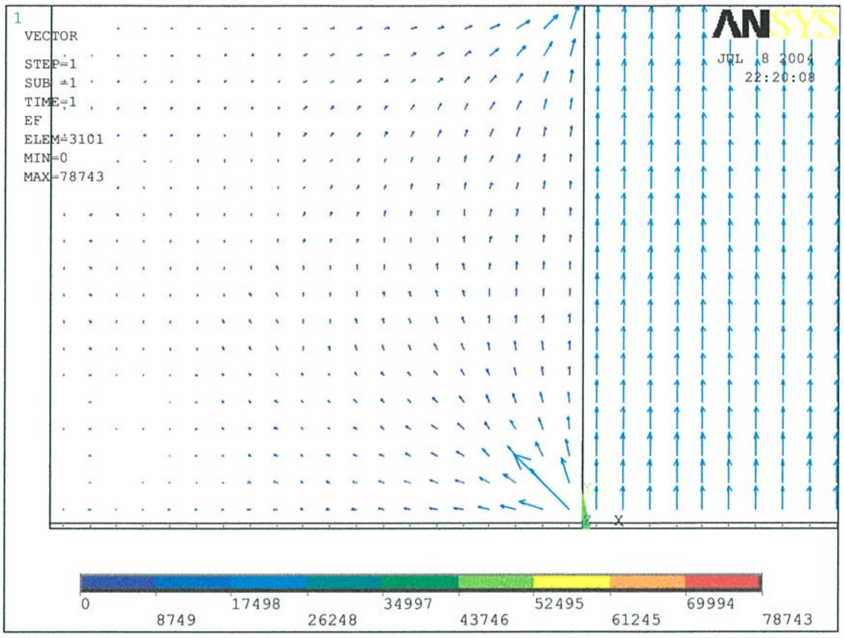
กำหนดชนิดของอิลิเมนต์เป็น PLANE 121 ซึ่งหมายถึงอิลิเมนต์แบบ 2 มิติ 8 Node เป็นอิลิเมนต์แบบสนามไฟฟ้าสถิตย์ แต่ละอิลิเมนต์มีมุมอิสระ ซึ่งเหมาะกับการใส่ค่า Voltage ซึ่งสามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เมื่อป้อนแรงดันที่เงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งโหนดแถวบนป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0 V และแถวล่างเท่ากับ 5.7 kV ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ หาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าภายใต้อิเล็กโทรดแบบระนาบ 2 มิติ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระดับแรงดันจะกระจายอยู่ภายในแผ่นอิเล็กโทรด โดยแรงดันระดับสูงสุดจะอยู่ด้านล่างของแผ่นอิเล็กโทรด ไล่ระดับแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆ จากมากไปหาน้อย และระดับต่ำสุดอยู่ด้านบน และแรงดันโค้งออกบริเวณอากาศด้านนอกแผ่นอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.4 การกระจายระดับแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรดผ่านตัวกลางอากาศแบบระนาบ 2 มิติ

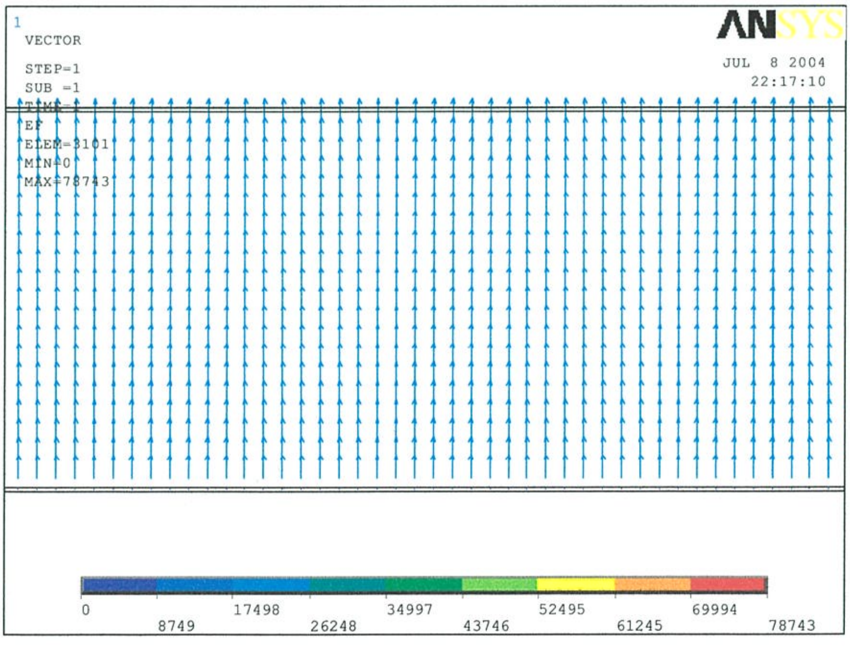
จากผลของการหาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้ในการหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าภายในชุดอิเล็กโทรด การกระจายของเส้นแรงสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศว่าง และทิศทางของสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงการกระจายแนวแรงสนามไฟฟ้าซึ่งกระจายไปยังขอบด้านข้างชุดอัดประจุ ผ่านตัวกลางอากาศ มีการการกระจายของเส้นแรงสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนผ่านอากาศจากแผ่นอิเล็กโทรดด้านล่างไปสู่แผ่นอิเล็กโทรดด้านบน ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าบริเวณด้านขอบนอกชุดอัดประจุ มีค่าต่ำกว่าบริเวณภายในชุดอัดประจุอลูมิเนียม

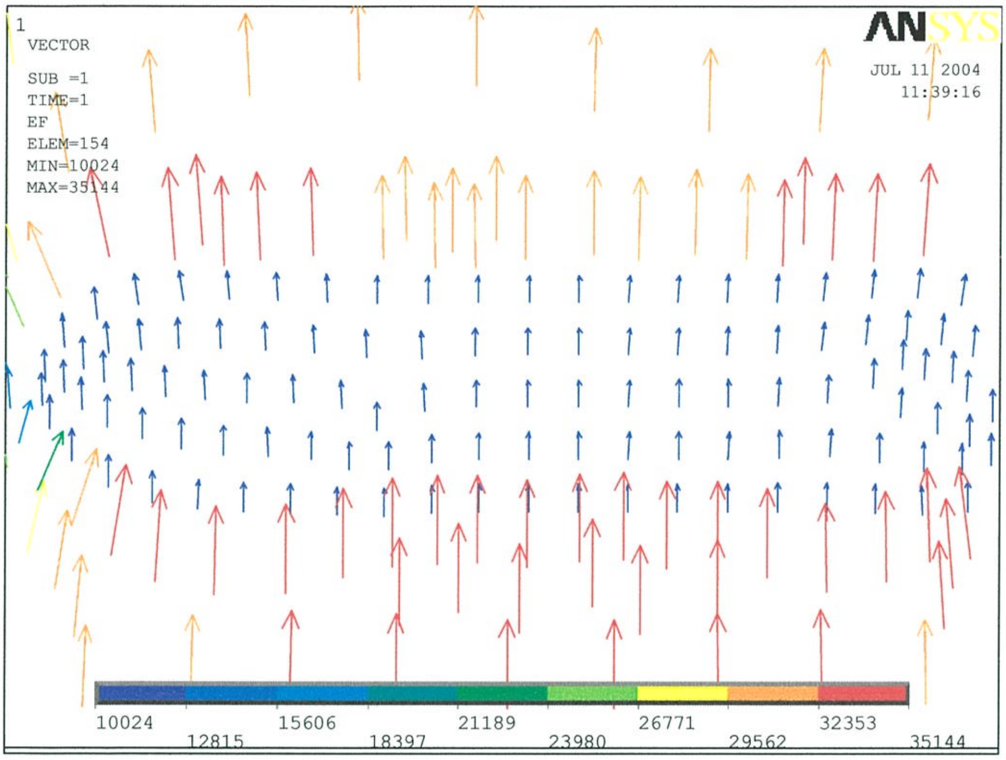


รูปที่ 4.5 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศว่างใกล้ขอบด้านนอกอิเล็กโทรด

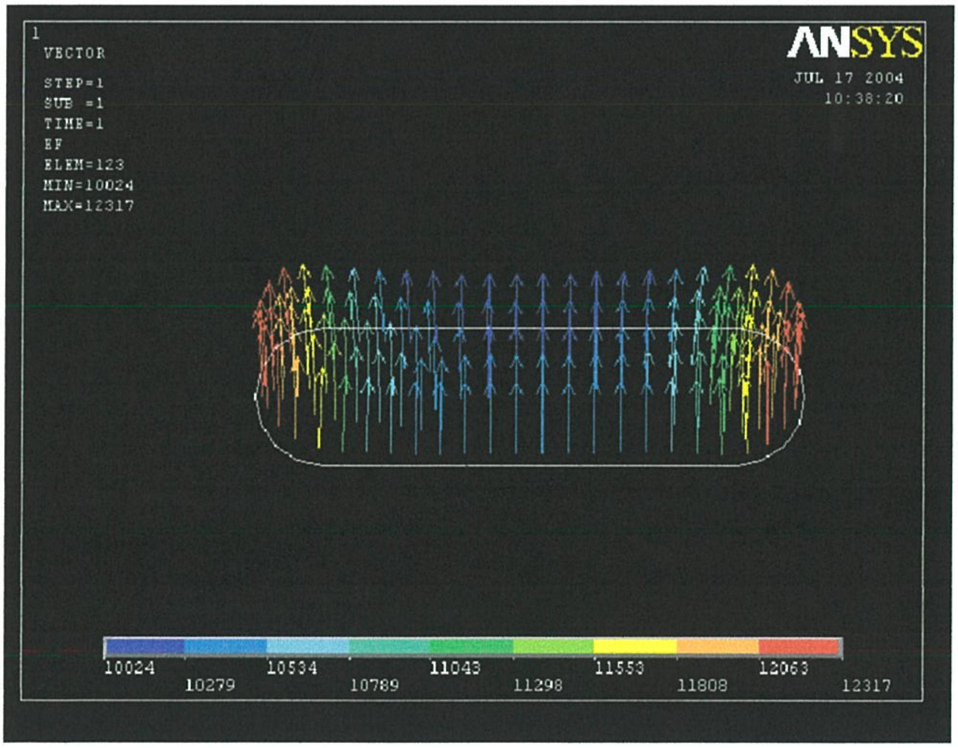
จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงการกระจายแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณภายในชุดอัดประจุ ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันทุกจุด เป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.6 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณกลางชุดอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.7 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศและเมล็ดข้าว (บริเวณเมล็ดคือเส้นสีฟ้า)



รูปที่ 4.8 ทิศทางแนวแรงสนามไฟฟ้าบริเวณเมล็ดข้าว

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้าผ่านตัวกลางคืออากาศ จะเห็นได้ว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากันทุกจุด เป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ แต่สนามไฟฟ้าในบริเวณเมล็ดข้าวจะมีค่าระหว่าง 12,063 ถึง 12,314 V/m ซึ่งน้อยกว่าสนามไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางอากาศหรือบริเวณระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งมีค่าระหว่าง 26,771 ถึง 29,562 V/m จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าบริเวณเมล็ดข้าว จะมีค่าสูงบริเวณปลายด้านนอกทั้งสองข้าง และค่อยๆลดลงไปเล็กน้อยจนถึงบริเวณกลางเมล็ด โดยดูค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละ Node ได้ในภาคผนวก ง.

4.4 บทสรุปและวิเคราะห์ผล

จากการวิเคราะห์ชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้า ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ แบบ 2 มิติ เพื่อดูลักษณะของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเมล็ดข้าว ซึ่งวางกล่องทดสอบไว้บริเวณกลางแผ่นอิเล็กโทรด พบว่าสนามไฟฟ้าในบริเวณแผ่นอิเล็กโทรดมีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field) แต่บริเวณด้านขอบของแผ่นอิเล็กโทรด มีการโค้งของสนามไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าในบริเวณเมล็ดข้าวจะมีค่าน้อยกว่าสนามไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางอากาศ จะมีค่าสูงบริเวณปลายด้านนอกทั้งสองข้าง และค่อยๆลดลงไปจนถึงบริเวณกลางเมล็ด ซึ่งการงอกของเมล็ดข้าวจะงอกจากด้านปลายเมล็ด การที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณปลายเมล็ดทั้งสองด้านอาจไปกระตุ้นให้เมล็ดข้าวเจริญเติบโตได้ดี และจากผลการทดลองจะพบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นไม่เกิน 193 kV การเจริญเติบโตของเมล็ดข้าวจะมากกว่ากลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าต่ำและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

บทที่ 5
โครงสร้างของเมล็ดข้าว

5.1 บทนำ

ข้าวเป็นธัญพืชที่สำคัญของประชากรกว่าครึ่งโลกที่ใช้บริโภคเป็นอาหารหลัก ได้มีการปลูกและใช้บริโภคกันมากในประเทศแถบทวีปเอเชีย เช่นอินเดีย ปากีสถาน เนปาล บังคลาเทศ พม่า ไทย มาเลเซีย ฟิลิปินส์ จีน เกาหลี และญี่ปุ่น นอกจากบริเวณดังกล่าวแล้ว ก็พบว่ามีการปลูกและบริโภคกันบ้างในอเมริกา บราซิล แอฟริกา ออสเตรเลีย และประเทศในยุโรป ตะวันออกกลางบางประเทศ

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า มีลำต้นเป็นไม้เนื้ออ่อน และส่วนใหญ่เป็นพืชหญ้าล้มลุกที่มีอยู่ได้เพียงปีเดียว มีใบเป็นชนิดใบเลี้ยงเดี่ยว มีรากเป็นระบบรากฝอย สามารถจะเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน ซึ่งเป็นเขตมรสุม แต่ก็มีความสามารถเจริญเติบโตได้ดี แม้ในเขตอบอุ่น เราอาจพบข้าวป่า แม้แต่บริเวณที่อยู่สูงกว่าระดับทะเลปานกลาง 1,800 เมตร ก็พบว่าข้าวสามารถขึ้นได้ ดังนั้นข้าวจึงนับว่าเป็นพืชที่มีความสามารถในการพัฒนาและปรับตัวให้เหมาะสมกับภูมิประเทศและภูมิอากาศได้อย่างกว้างขวางพืชหนึ่งของโลก

ข้าวที่มนุษย์เราได้นำมาปลูกไว้เพื่อใช้บริโภคนั้นอาจแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ๆ ได้ 2 พวกคือ ข้าวเอเชีย (Oryza sativa L.) และข้าวแอฟริกา (Oryza glaberrima Steud) ข้าวอื่นนอกจากข้าวทั้งสองสกุลนี้แล้ว เราอาจจะจัดไว้เป็นพวกข้าวป่า (wild rice) [18]

เริ่มแรกมนุษย์รู้จักการดำรงชีวิตด้วยการหาของป่ากิน ข้าว ก็นำมาจากป่าเช่นเดียวกัน มนุษย์รู้จักคัดเลือกข้าวป่าชนิดต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับระบบนิเวศ โดยการผสมข้ามระหว่างข้าวที่ปลูกกับวัชพืชที่เกี่ยวข้อง จึงเกิดข้าวพันธุ์พื้นเมืองขึ้นมากมายหลายพันธุ์ ที่เรียกว่าข้าวลูกผสม มีประมาณ 120,000 พันธุ์ทั่วโลก คนไทยรู้จักการปลูกข้าวทำนามาแล้วประมาณ 5,417 ปี ก่อนคริสต์ศักราช ก่อนจีนและอินเดียราว 1,000 ปี โดยมีหลักฐานเก่าแก่ทางประวัติศาสตร์ คือ รอยแกลบข้าวที่ผสมอยู่ในภาชนะดินเผาที่พบหลายแห่งในไทย เช่นเครื่องปั้นดินเผาบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี เครื่องปั้นดินเผาในสมัยพ่อขุนรามคำแหงมหาราช และบนหลักศิลาจารึกว่า ในน้ำมีปลาในนามีข้าว จากข้าวป่า คนไทยโบราณรู้จักปรับปรุงพันธุ์ข้าว แต่ยังไม่มีการรวบรวมพันธุ์อย่างเป็นทางการ กระทั่งสมัยรัชกาลที่ 5 ซึ่งก่อนหน้านั้นไทยส่งข้าวไปขายที่ยุโรป ผ่านบริษัทของอินเดีย แต่ข้าวไทยขายสู้ข้าวอินเดียไม่ได้ เพราะส่วนมากแตกหัก แต่ข้าวอินเดียมีเมล็ดยาวสวยกว่า รัชกาลที่ 5 ทรงตั้งข้อสังเกตว่าชาวนาไทยปลูกข้าวหลายพันธุ์มากเกินไป ไม่มีการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ จึงมีพระราชดำริให้เกษตรกรนำพันธุ์ข้าวพื้นเมืองมาประกวดกันเป็นครั้งแรก เมื่อปี 2540 ที่อำเภอธัญ

บุรี จังหวัดปทุมธานี พันธุ์ข้าวที่ส่งประกวดนั้น ทางการได้นำมาปลูกเพื่อคัดเลือกพันธุ์ที่มีคุณภาพ เมล็ดดีจนเป็นพันธุ์ข้าวดีเพื่อแนะนำให้เกษตรกรปลูก หลังจากนั้นเป็นต้นมา ชาวนาจึงรู้จักคัดเลือกพันธุ์ข้าวมาปลูกมากกว่า การยึดพันธุ์พื้นเมือง

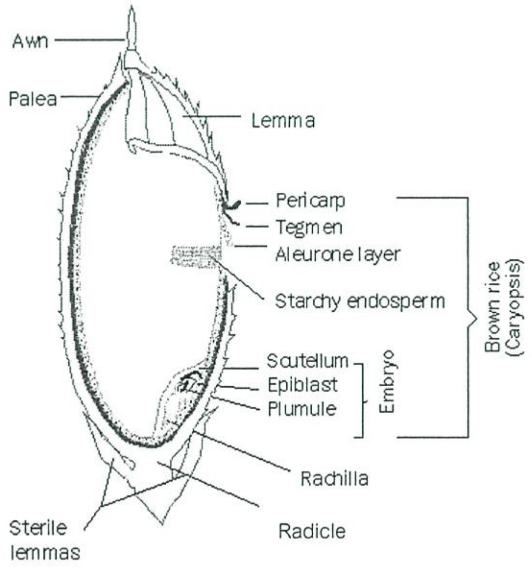
ข้าวได้กลายเป็นพืชเศรษฐกิจเพื่อการส่งออก และการบริโภคที่สำคัญของไทย ซึ่งข้าวที่ส่งออกพันธุ์ที่ดีที่สุดและเป็นที่รู้จัก คือพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 หรือที่เรียกว่าข้าวหอมมะลิ ไทยส่งออกไปขายมากที่สุดในโลก

ส่วนการตั้งชื่อพันธุ์ข้าว จะตั้งตามชื่อคน ชื่อสถานที่ และลักษณะตามธรรมชาติของข้าว หรือตั้งตามศูนย์วิจัยที่พัฒนาพันธุ์ข้าวขึ้นมา เช่นพันธุ์ กข. มาจาก กรมการข้าว พันธุ์สุพรรณบุรี ปราจีนบุรี ปทุมธานี เป็นต้น หรือชื่ออื่นในความหมายที่ดีเป็นมงคล เช่นมาจากวันครบรอบ 60 พรรษาของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว หรือสมเด็จย่า เป็นต้น

ประเทศไทยมีผืนนาทั้งประเทศประมาณ 60 ล้านไร่ ส่วนพื้นที่ถือครองปลูกข้าวมีประมาณ 57-58 ล้านไร่ [19]

5.2 ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว (Rice Seed) คือผล แต่เป็นผลชนิดหนึ่งที่เรียกว่า Caryopsis กล่าวคือเป็นผลแห้ง มีผลเดียว ติดแน่นกับเปลือกหุ้มผลอันเกิดจากรังไข่ชนิดลอยตัว คำว่า Caryopsis นี้บางครั้งใช้เรียกเฉพาะผลของหญ้าเท่านั้น ผลหรือเมล็ดของข้าวจะมีความแตกต่างกันในส่วนของ ขนาด รูปร่าง สี ความมีหางหรือไม่มีหาง รวมถึงหางยาวและหางสั้นด้วย และขนบนเปลือก รูปที่ 5.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดข้าว [20]



รูปที่ 5.1 แสดงส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

ส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวประกอบไปด้วยส่วนสำคัญคือ

5.2.1 ส่วนหุ้มเมล็ดหรือส่วนหุ้มผล

ถ้าเรานำข้าวเปลือกมาทำการกะเทาะส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว หรือผลนี้ ก็คือแกลบ (Husk) นั่นเอง ส่วนหุ้มเมล็ดข้าว จะมีลักษณะเป็นแผ่นหรือกลีบบางแต่แข็งมาก ส่วนหุ้มผลหรือส่วนหุ้มเมล็ดนี้ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (Lemma) และเปลือกเล็ก (Palea) เปลือกทั้งสองนี้จะขบซึ่งกันและกัน (Inter Lock) แน่น ตามความยาวด้านข้างทั้ง 2 ของเมล็ด โดยจะขบกันในลักษณะเปลือกใหญ่ขบเปลือกเล็ก ส่วนหุ้มเมล็ดข้าวทั้ง 2 ที่เป็นเปลือก คือส่วนที่จะเป็นแกลบนั้น อาจมีสีแตกต่างกันได้ตามลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวพันธุ์นั้นๆ เมื่อเมล็ดแก่

5.2.2 เนื้อผล

เนื้อผลคือผลแท้ (True Fruit) หรือข้าวกล้อง (Brown rice) หรือ Caryopsis นั่นเอง เนื้อผลเป็นส่วนที่อยู่ภายในส่วนหุ้มผล หรือเปลือกข้าว (แกลบ) เนื้อผลส่วนใหญ่จะเป็นแป้ง ส่วนในของเนื้อผลจะมีเยื่อบางๆ ที่เป็นเนื้อเยื่อที่แตกต่างกันห่อหุ้มอยู่หลายชั้น คือ

1. เยื่อชั้นนอก หรือ เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เยื่อชั้นนอกที่หุ้มผลอยู่นี้จะมีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ด้วยเซลล์ที่มีผนังเป็นเส้นใย 6 ชั้น และจะมีสารสี หรือ รงควัตถุ ปนอยู่ด้วย ดังนั้นการที่เราเห็นข้าวกล้องเป็นสีต่างๆ เช่นข้าวขาว ข้าวแดง ข้าวเหนียวดำ นั่นก็คือการมีสารสีปรากฏอยู่ในเยื่อชั้นนี้ของข้าวกล้องนั่นเอง
2. เยื่อหุ้มชั้นกลาง หรือ เยื่อหุ้มเมล็ด (Testa) เป็นเยื่อชั้นที่อยู่ถัดจากเยื่อชั้นนอกเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาวเรียงตามขวางและมีผนังบางๆ กั้นอยู่ ส่วนที่อยู่ภายในเซลล์ของเยื่อหุ้มเมล็ดนี้ จะมีไขมันอยู่เป็นส่วนใหญ่ และมีสารสี หรือรงควัตถุ ที่ทำให้ข้าวกล้องมีสีแตกต่างกันอยู่ด้วย เช่นเดียวกับในชั้นเยื่อชั้นนอก
3. เยื่อชั้นใน (Aleurone Layer) เป็นเยื่ออยู่ในสุดถัดจากเยื่อหุ้มชั้นกลางเข้ามา ทำหน้าที่ห่อหุ้มคัพภะ (Embryo) และเนื้อข้าว (Endosperm) เยื่อชั้นนี้จะประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น และเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ด (Dorsal) จะหนากว่าเยื่อที่หุ้มด้านท้อง (Ventral) ความหนาของเยื่อชั้นในนี้จะแตกต่างกันแล้วแต่พันธุ์และชนิดของข้าว เช่น เมล็ดข้าวป้อม สั้น จะมีเยื่อชั้นในหนากว่าข้าวเมล็ดยาว ข้าวไร่จะมีเยื่อชั้นในหนากว่าข้าวนาสวนเป็นต้น ภายในเซลล์ของเยื่อชั้นในจะมีเม็ดโปรตีนอยู่มาก เป็นชั้นไขมันบางๆ ห่อหุ้มอยู่ และที่ผนังเซลล์ (Cell Wall) จะมี Protein, Hemicellulose และ Cellulose ประกอบอยู่ด้วย เยื่อชั้นในประกอบด้วย

3.1 คัพภะหรือเชื้อชีวิต (Embryo) ของผลหรือเมล็ดข้าว จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ (Lemma) ส่วนสำคัญที่อยู่ภายในคัพภะนี้ คือรากอ่อนในเมล็ด (Radicle) และต้นอ่อน (Plumule) รวมทั้งใบเลี้ยง (Cotyledon) ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีใบเดียวคือ Scutellum เป็นส่วน

บางๆ อยู่ด้วย การงอกของข้าวเป็นต้นใหม่ จะเกิดจากการงอกของรากอ่อนในเมล็ด และต้นอ่อนออกมาจากคัพภะ โดยใช้อาหารสำรองระยะงอกจาก Endosperm การงอกจะเกิดขึ้นได้จากเมล็ดที่แก่จัดและสมบูรณ์ รวมทั้งเป็นเมล็ด (ผล) ที่ไม่มีการพักตัว หรือพ้นระยะการพักตัวแล้ว หรือเมล็ดที่ผ่านการทำลายการพักแล้ว และต้องได้รับน้ำ (ความชื้น) อย่างเพียงพอ พอต่อการงอกในสภาพของอุณหภูมิและอากาศที่เหมาะสมต่อการงอกด้วย

3.2 เนื้อข้าว (Endosperm) เนื้อผลนอกจากจะมีคัพภะแล้ว ยังมีเนื้อข้าวที่มีปริมาณมากเป็นส่วนใหญ่ หรือประมาณ 83% ของเมล็ดข้าว เนื้อข้าวภายใจเซลล์จะถูกอัดแน่นด้วยเม็ดแป้ง (Starch Granule) ของกลุ่มแป้ง (Starch Compounds) โดยมีโปรตีน (Protein Body) แทรกอยู่ระหว่าง กลุ่มแป้ง และในผนังเซลล์จะมี Protein, Hemicellulose และ Cellulose เป็นส่วนประกอบสำคัญในเนื้อข้าว จะมีโปรตีนอยู่หนาแน่นบริเวณที่เป็นผิวมากกว่าบริเวณภายในของเมล็ดข้าว ขนาดของกลุ่มแป้ง มีขนาดประมาณ 40x50 ถึง 80x105 ไมครอน ส่วนเม็ดแป้งนั้น จะมีลักษณะเป็นผลึกหลายเหลี่ยมและมีขนาดเล็กมาก ขนาดของผลึกมีขนาดเล็กมากใกล้เคียงกันทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว

5.3 การเจริญเติบโตของต้นข้าว

การเจริญเติบโตของต้นข้าวตั้งแต่เริ่มงอกจากเมล็ดจนถึงขั้นที่แก่เก็บเกี่ยวได้อาจแบ่งได้เป็น 3 ระยะคือ ระยะการเจริญทางลำต้นและใบ ระยะการเจริญทางการสืบพันธุ์และระยะการเจริญทางด้านเมล็ด การแบ่งระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าว อาจแตกต่างกันในรายละเอียดตามชนิดของพันธุ์ข้าวและวิธีการปลูก อย่างไรก็ตาม วงจรชีวิต ของข้าวจะมีขบวนการและลำดับขั้นตอนในการเจริญเติบโตที่แน่นอน กล่าวคือ เริ่มงอกจากเมล็ดเจริญเป็นต้นอ่อน หลังจากนั้นจะแตกกอออกรวง มีการผสมเกสรเจริญเติบโตเป็นเมล็ด และเมล็ดแก่พร้อมที่จะขยายพันธุ์ได้ต่อไป

5.3.1 **การงอกของเมล็ดข้าว** (Germination)

เมล็ดข้าว ที่แก่จัดและเป็นเมล็ดที่สมบูรณ์ ความงอกยังไม่เสื่อมหรือหมดอายุแล้วและไม่มีการพักตัว หรือไม่อยู่ในช่วงที่มีการพักตัวหรือได้ผ่านการทำลายการพักตัวมาแล้ว เมื่อนำมาทำการเพาะในสภาพแวดล้อมที่เหมาะต่อการงอก เมล็ดข้าวจะเริ่มงอกออกมาเป็นต้นข้าวต้นใหม่ สิ่งสำคัญและจำเป็นต่อการงอกของข้าว ได้แก่ การมีน้ำอย่างเพียงพอ เมื่อเมล็ดอยู่ในสภาพที่พร้อมจะงอก จะไม่งอก ถ้ามีน้ำหรือความชื้น น้อยหรือต่ำเกินไป ข้าวต้องการน้ำมากในระยะแรกของการงอก ฉะนั้นจึงต้องทำการแช่น้ำนานประมาณ 12-24 ชั่วโมงก่อน ก่อนนำไปเพาะหรือตกกล้า เมล็ดข้าว ซึ่งแห้งและมีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 14%) จะดูดน้ำเข้าไปอย่างเต็มที่ เมื่อน้ำถูกเมล็ดดูดเข้าไปจะทำให้เมล็ดข้าวมีการขยายตัวและเพิ่มน้ำหนักมากขึ้น น้ำเมื่อถูกเมล็ดข้าวดูดเข้าไปแล้วจะเกิดปฏิกิริยาและเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างภายในเมล็ดข้าว ทำให้เกิดพลังงานและมีความร้อน

เพิ่มขึ้น สารอาหารที่อยู่ในเนื้อข้าว เช่นแป้ง โปรตีนและไขมันจะเกิดการเปลี่ยนรูปกลายเป็นอาหารอย่างง่าย สำหรับให้คัพภะนำไปใช้ในกระบวนการงอก และจะเจริญเปลี่ยนแปลงกลายเป็น ต้นข้าวอ่อน หรือกล้า (Seedling) ต้นกล้าคือต้นอ่อนที่งอกมากจากคัพภะของเมล็ด ด้วยการงอกโผล่พ้นออกมาจากเปลือกหุ้มเมล็ด (Seed Coat) แล้วเจริญเติบโตเป็นต้นอ่อนจนสามารถหาอาหารจากภายนอกเลี้ยงตัวเองได้ การที่เมล็ดข้าว ทำการดูดน้ำเข้าไปในเมล็ด เพื่อทำให้เกิดการงอกเป็นต้นใหม่ขึ้นมานั้นสามารถสรุปได้เป็น 3 ระยะคือ

1. ระยะการอมน้ำ (Imbibition Stage)

ระยะอมน้ำ เป็นช่วงเวลาแรกของกระบวนการงอก กล่าวคือ เมื่อได้น้ำเมล็ดข้าวไปทำการแช่น้ำ ในช่วง 18 ชั่วโมงแรกของการแช่น้ำ เมล็ดข้าวจะดูดน้ำเข้าไปภายในเมล็ดอย่างรวดเร็วด้วยแรงดูดเพื่อการอมน้ำ ผลจากการแช่เมล็ดข้าวในน้ำในช่วงแรกนี้ จะทำให้เมล็ดข้าวมีน้ำเพิ่มมากขึ้นสูงถึง 25-35 % สภาพของอุณหภูมิโดยรอบจะไม่มีอิทธิพลต่อการดูดน้ำของเมล็ด และรวมทั้งไม่มีผลต่อการระงับการหายใจของเมล็ดด้วย

2. ระยะเริ่มงอก (Activation Stage : Germination)

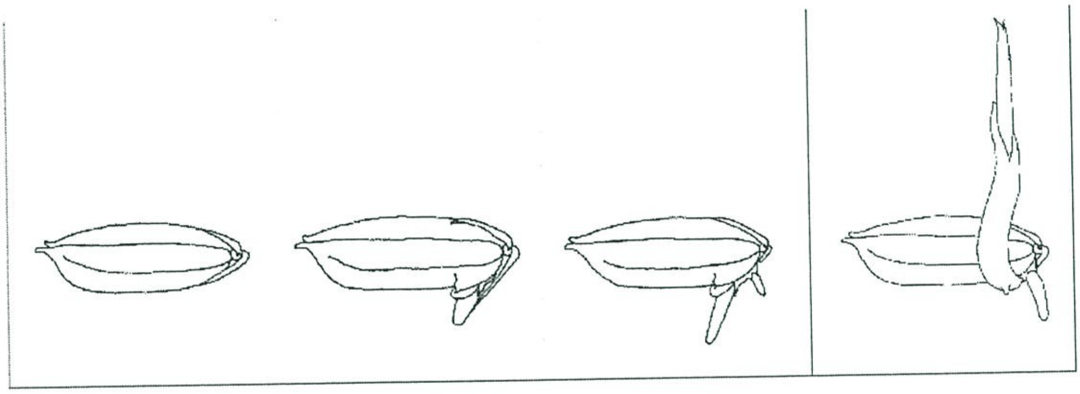
ระยะเริ่มงอก เป็นระยะที่อยู่ในช่วงของการดูดน้ำของเมล็ด ซึ่งจะเริ่มต่อจากระยะการอมน้ำ กล่าวคือจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณชั่วโมงที่ 18-72 ของการแช่น้ำ ซึ่งในช่วงนี้ อุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการงอก การงอกจะเกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงของการทำงานอย่างเต็มที่ของเมตาโบลิกในเมล็ดข้าว ปริมาณน้ำในเมล็ดเมื่อเริ่มงอกมีอยู่ประมาณ 30-40% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในช่วงชั่วโมงที่ 54-72 อันเป็นช่วงสุดท้ายของระยะนี้ จะปรากฏปลายสีขาว (White tip) ของปลอกหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) โผล่พ้นออกมาจากบริเวณคัพภะด้วยการแตกแยกของเปลือกหุ้มเมล็ด และการปรากฏของใบแรก ที่มองเห็นได้อย่างชัดเจน ดังนั้นความหมายของ Activation Stage คือการงอกนั่นเอง

3. ระยะการเจริญเติบโตหลังงอก (Post germination Growth Stage)

ระยะการเจริญเติบโตหลังงอก เป็นระยะสุดท้ายของการดูดน้ำของเมล็ด ระยะนี้เป็นระยะที่เมล็ดได้งอกเป็น ต้นอ่อน ต่อจากระยะเริ่มงอกในระยะเริ่มงอก หรือหลังจากชั่วโมงที่ 72 ของช่วงเวลาในการแช่ข้าวไปแล้วนั่นเอง

ภายใต้สภาวการณ์ของอากาศที่มีอุณหภูมิพอเหมาะ กล่าวคือประมาณ 25°-30° C เป็นต้น ซึ่งถือได้ว่าเป็นสภาวการณ์ของสิ่งแวดล้อมที่เหมาะต่อการงอก เมล็ดข้าวเปลือก ประกอบด้วยเปลือก อันเป็นส่วนที่แข็งมากที่อยู่นอกสุด (Lemma and Palea หรือแกลบ) และส่วนที่อยู่ในเปลือก (Brown Rice : Caryopsis) ที่ประกอบด้วย คัพภะและเนื้อข้าว ในส่วนที่เป็นเนื้อข้าวนี้จะมีแป้ง เป็นส่วนใหญ่ประมาณ 80-90% โดยมีโปรตีนและไขมันเป็นส่วนประกอบรองลงมา ส่วนประกอบที่มีอยู่ในเนื้อข้าวเหล่านี้จะเป็นแหล่งสะสมอาหาร สำหรับให้คัพภะได้นำไปใช้ในช่วงที่จะ

เกิดการงอกเป็นต้นใหม่ในระยะแรกของการงอก การงอกของเมล็ด หมายถึงการคืนสู่สภาพการเจริญเติบโตที่ Active ของเมล็ด โดยคัพภะจะเริ่มตื่นตัวจากการพัก แล้วเจริญเปลี่ยนแปลงออกมาเป็นต้นใหม่ เมื่อสภาพแวดล้อมต่อการงอกอำนวยให้ ขั้นตอนการงอกจะแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการงอกของเมล็ดข้าว

สรุปการงอกของเมล็ดข้าวจะเกิดขึ้นเมื่อ [18]

1. หมดระยะการพักตัวหรือได้ทำลายการพักตัวแล้ว
2. เมล็ดได้ดูดน้ำไปใช้ในปริมาณที่มากพอ
3. มีอุณหภูมิที่เหมาะต่อการงอก

5.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า

ในช่วงแรกแห่งการเจริญเติบโตของต้นกล้า การเจริญเติบโตของปลอกหุ้มต้นอ่อนและใบข้าว ในเวลาต่อมาจะได้สารอาหารจากเมล็ดส่วนที่ถูกสะสมไว้ภายในเนื้อข้าวมาใช้ ผลของการศึกษาพบว่าระยะการเจริญเติบโตหลังงอก สารอาหารในเมล็ดประมาณ 60% ของน้ำหนักเมล็ดจะถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นอวัยวะใหม่ของต้นอ่อน และส่วนของสารอาหาร 60% นี้เรียกว่า Growth Efficiency ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ดีระหว่างอุณหภูมิ 20°-32° C การเจริญเติบโตหลังงอกของข้าวได้มีผู้รายงานถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิจะมีอิทธิพลที่เป็นผลต่อการงอกของเมล็ดข้าวตั้งแต่ระยะเริ่มงอกและระยะการเจริญเติบโตหลังงอก มากกว่าสัปดาห์หลังๆ กล่าวคือในสัปดาห์แรกถ้าอุณหภูมิประมาณ 22°-32° C อัตราการเจริญเติบโตเป็นแนวตรงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในช่วงสัปดาห์แรกนี้กว่า 70% ของอาหารในเมล็ดจะสนับสนุนการสร้างความเจริญเติบโตของต้นกล้าในเวลาต่อมา แต่หลังจากสัปดาห์แรกแล้วอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อต้นกล้าจะน้อยลง มีรายงานผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิระหว่าง 25°-30° C (หรืออาจถึง 35° C)

เป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของกล้า แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 40° C ต้นกล้าอาจตายได้ อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาพบว่า อุณหภูมิวิกฤตต่ำสุดของการยืดตัวของต้น (Shoot Elongation) จะอยู่ระหว่าง 7°-16° C และการยืดตัวของราก (Root Elongation) จะอยู่ระหว่าง 12°-16° C กล่าวโดยสรุป อุณหภูมิ 10° C อาจถือได้ว่าเป็นอุณหภูมิวิกฤตต่ำสุดของการเจริญเติบโต (ยืดตัว คือ Elongation) ของทั้งต้นและทั้งรากกล้า (Shoot and Root) การหุ้มข้าว 2 วัน อุณหภูมิ 27°-37° C ความงอกจะสูงถึง 90-97% อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 27° C และอุณหภูมิลดลงถึง 15° C จะไม่มีการงอกของข้าว และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 42° C จะไม่มีการงอก อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิวิกฤติดังกล่าว อาจแปรเปลี่ยนไปแล้วแต่พันธุ์ข้าว การเก็บรักษาเมล็ด และวิธีการจัดการในการปลูกหรือตกกล้าเป็นส่วนประกอบด้วย

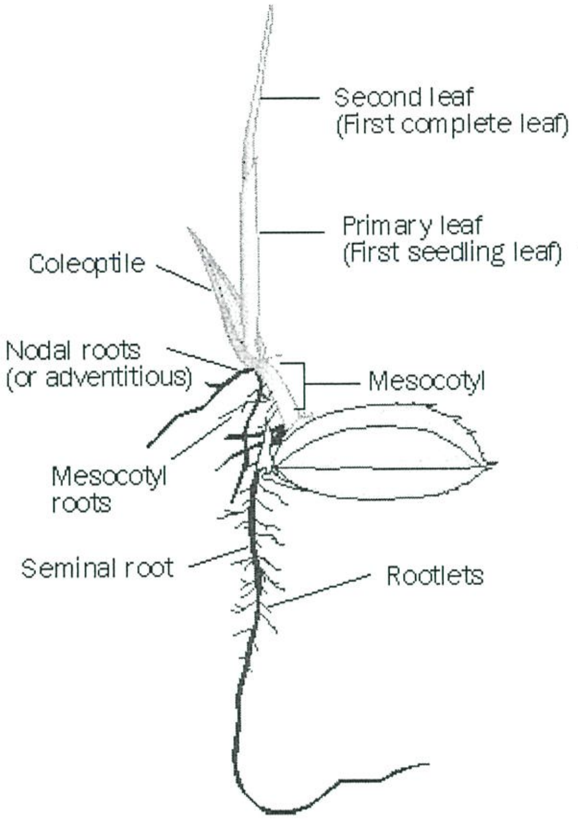
2. แสง (Light) แสงจะมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของกล้าข้าวอยู่บ้าง กล่าวคือ แสงสว่างจะช่วยระงับไม่ให้ปลอกหุ้มต้นอ่อน Mesocotyl ใบแรกและใบที่ 2 ของต้นอ่อน และปล้องแรกและปล้องที่ 2 บนต้นกล้า ไม่ยืดตัวมากเกินไป แต่ถ้าเรานำเมล็ดไปเพาะในที่มืด จะทำให้อวัยวะดังกล่าวยืดตัวมากกว่าปกติผิดไปจากการเพาะในสภาพที่ได้รับแสง

3. ออกซิเจน (Oxygen) โดยทั่วไปแล้วเมล็ดข้าว สามารถจะงอกได้ในสภาพขาดอากาศหรือขาดออกซิเจนได้ในระยะแรก แต่ในช่วงต่อมาของการเจริญเติบโต การขาดอากาศจะมีผลต่อการเจริญเติบโตได้ ตัวอย่างเช่นในสภาพน้ำท่วม อากาศในน้ำจะมีอยู่อย่างจำกัด การงอกระยะแรกจะเกิดได้ตามปกติ แต่ปลอกหุ้มต้นอ่อนจะยาวผิดธรรมดา ใบแรก รากอ่อน และรากข้าวที่เกิดที่ข้อ (Nodal Roots) จะไม่เจริญเติบโตหรือถ้าจะโผล่ออกมา ก็จะพิการหรือเจริญผิดรูปแบบไปมาก แต่ถ้าความชื้นไม่เพียงพอด้วยแล้ว จะทำให้การเจริญเติบโตของ รากอ่อนและ Plumule หยุดการเจริญเติบโตหรืออาจตายได้

5.3.3 ระยะการเจริญทางลำต้นและใบ

การเจริญเติบโตช่วงนี้เริ่มตั้งแต่การงอกของเมล็ดจนถึงระยะก่อนกำเนิดช่อดอก โดยการเจริญเติบโตในช่วงนี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ระยะคือ

1. ระยะกล้า ระยะนี้จะเริ่มตั้งแต่ต้นข้าวเริ่มงอกจากเมล็ดจนกระทั่งต้นข้าว เริ่มแตกกอ รากรุ่นแรกจะงอกออกมาจากเมล็ดทางจมูกข้าว หลังจากนั้นประมาณ 12-24 ชั่วโมง ยอดอ่อนจะงอกออกมา ทางด้านตรงข้าม เมื่ออายุได้ประมาณ 2 สัปดาห์ ซึ่งเป็นช่วงที่ยอดอ่อนกำลังเจริญเติบโตและพัฒนาเป็นใบอ่อนนั้น รากชุดใหม่ซึ่งเป็นรากรุ่นที่สองจะงอกออกมาจากโคนต้น เมื่อต้นอ่อนอายุได้ประมาณ 25-30 วัน รากชุดแรกที่งอกออกมาจากเมล็ดก็จะหมดประสิทธิภาพในการหาอาหาร และจะหลุดไปในที่สุด

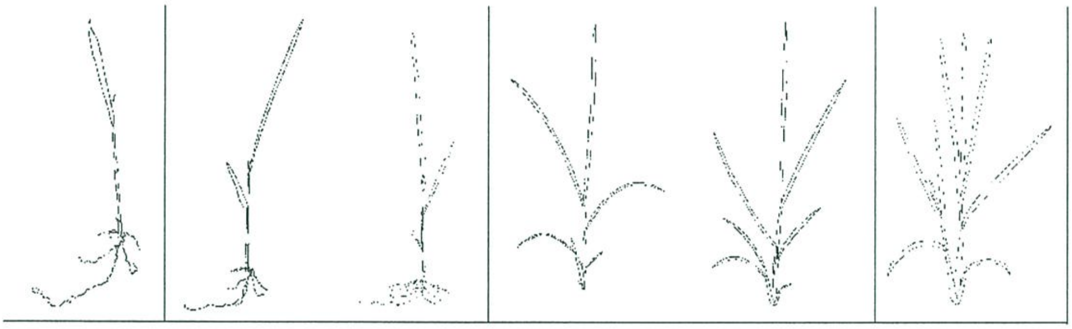


รูปที่ 5.3 แสดงต้นข้าวที่งอกจากเมล็ด 7 วัน

ลำต้นของข้าวจะงอกออกจากเมล็ดตรงส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าวเช่นเดียวกับราก หลังจากที่ยอดอ่อนโผล่พ้นเมล็ดได้ประมาณ 3 วัน จะเห็นใบแรกโผล่ออกมาจากปลอกหุ้มต้นอ่อน ใบที่สองและใบที่สามจะงอกตามออกมาหลังจากนั้นประมาณ 5-10 วัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.3 ในช่วงที่ใบแรกจนถึงใบที่สามเริ่มเจริญออกมานั้น ต้นอ่อนของข้าวใช้อาหารที่สะสมอยู่ในเมล็ด (Endosperm) เมื่อถึงระยะที่เริ่มแตกใบที่สี่ อาหารที่สะสมในเมล็ดจะหมดลง และต้องใช้อาหารที่รากดูดขึ้นมาจากดินแทน เมื่อต้นอ่อนของข้าวมีใบประมาณ 5-7 ใบ หรือมีอายุประมาณ 25-30 วัน ก็พร้อมที่จะถอนไปปักดำได้ ต้นอ่อนของข้าวในระยะนี้ จะมีระบบรากฝอยที่สมบูรณ์ และมีลำต้นสูงประมาณ 20-30 เซนติเมตร เราอาจเรียกต้นข้าวในระยะนี้ว่า ต้นกล้า หรือ กล้าข้าว ในกรณีที่การทำนาเป็นแบบนาดำ กล้าข้าวจะถูกนำไปปักดำในที่แห่งใหม่ สำหรับการทำนาโดยวิธีหว่าน ต้นข้าวจะถูกปล่อยให้เจริญเติบโตในที่เดิมต่อไป การเจริญเติบโตของต้นและใบก็จะดำเนินต่อไปจนเข้าสู่ระยะการแตกกอ

5.2.4 ระยะแตกกอ

การเจริญเติบโตในระยะนี้เริ่มตั้งแต่ต้นข้าวเริ่มแตกกอ จนกระทั่งต้นข้าวเริ่มสร้างดอกอ่อน โดยทั่วไปแล้วหลังจากปักดำได้ 7-10 วัน ต้นกล้าจะเริ่มแตกกอ ความสามารถในการแตกกอวัดได้จากปริมาณของแขนงที่แตกออกมาในแต่ละต้น และช่วงระยะเวลาของการแตกกอ (ซึ่งหมายถึงช่วงระยะเวลาที่ข้าวเริ่มแตกแขนงชุดแรกจนถึงแขนงชุดสุดท้าย) และจะแตกต่างกันตามชนิดของพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อม โดยปกติข้าวที่ให้ผลผลิตสูงจะต้องเป็นข้าวที่แตกกอได้มากและแตกกอได้เร็ว โดยทั่วไปแล้ว ต้นข้าวใช้เวลาในการแตกกอเต็มที่ประมาณ 35-50 วันหลังจากระยะกล้า ต่อจากนั้นถ้าเป็นข้าวพันธุ์ที่ไวแสง ต้นข้าวก็จะรอช่วงแสงพอเหมาะที่จะทำให้มันออกดอก

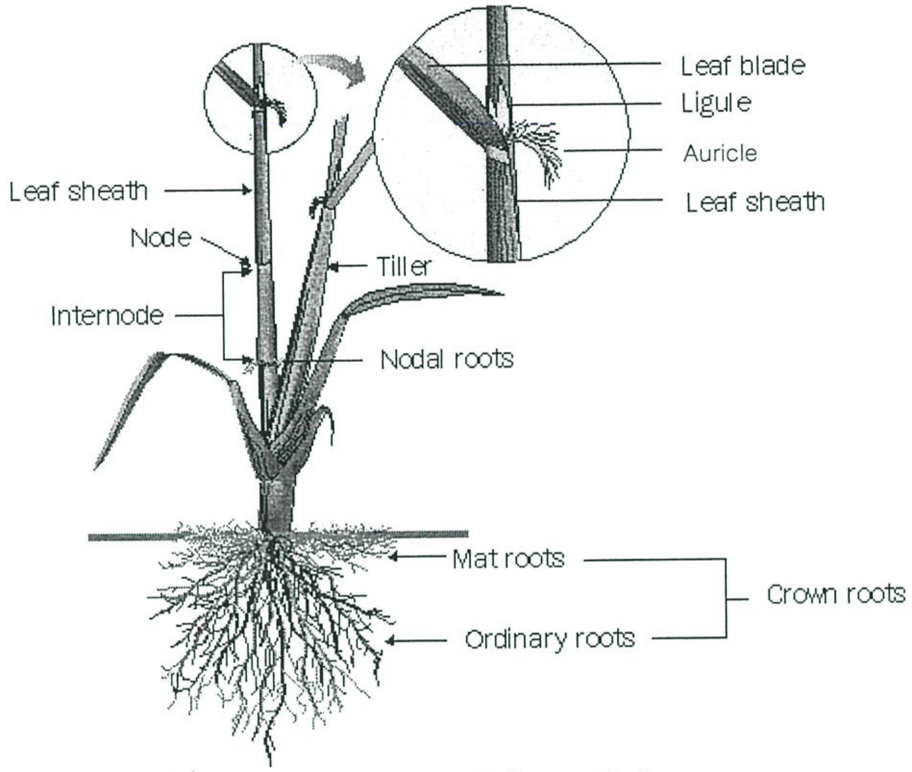


รูปที่ 5.4 แสดงขั้นตอนการเจริญเติบโตของต้นข้าวจากระยะต้นกล้าจนถึงระยะแตกกอ

ตั้งแต่เริ่มระยะต้นกล้า จนถึงระยะแตกกอสูงสุด รากของข้าวจะเพิ่มปริมาณไปพร้อมๆ กับการเจริญทางลำต้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.5 หลังจากนั้นการเพิ่มจำนวนรากก็จะเริ่มช้าลงจนกระทั่งถึงช่วงระยะเวลาออกรวง โดยทั่วไปรากข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ในที่ที่มีน้ำขัง แต่สภาพที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของรากคือ สภาพที่มีความชื้นพอเหมาะและมีปริมาณออกซิเจนในดินสูง ดังนั้นในระยะแตกกอซึ่งเป็นระยะที่รากข้าวเจริญเติบโตได้ดีที่สุด จึงเป็นระยะที่รากข้าวต้องการออกซิเจนสูงกว่าในระยะอื่นๆ ในระยะนี้ถ้ามีการทดน้ำออกจากนาช่วงระยะเวลาหนึ่ง พื้นนาจะได้รับออกซิเจนจากอากาศเป็นการเร่งให้รากข้าวมีการเจริญเติบโต และมีประสิทธิภาพในการดึงดูดธาตุอาหารได้ดียิ่งขึ้น

รากของข้าวจัดอยู่ในระบบรากฝอย (Fibrous root system) การเจริญเติบโตและการกระจายของรากข้าวจะแตกต่างกันตามลักษณะของวิธีปลูก ถ้าปลูกข้าวโดยวิธีหว่านรากจะหยั่งลงลึกแต่การแผ่กระจายและจำนวนของรากมีน้อย ถ้าปลูกแบบปักดำ รากจะอยู่ในระดับตื้นมีจำนวนรากมากและแผ่กระจายดี สำหรับข้าวขึ้นน้ำรากจะยาวและแพร่กระจายอยู่ในน้ำเพื่อดูดธาตุอาหารจากน้ำโดยตรง โดยรากจะงอกออกตามข้อทุกข้อ ยกเว้นข้อแรกและข้อที่สองนับจากรวง

ข้าวลงมา อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะปลูกด้วยวิธีใด ระบบการดูดธาตุอาหารของรากข้าวจะไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 5.5 แสดงระบบรากของต้นข้าวและต้นข้าวแตกกอ

5.4 **คุณสมบัติของพันธุ์ข้าวสุพรรณบุรี 1**

ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ Oryza sativa L. มีชื่อสามัญคือ ข้าวเจ้า (Rice) เป็นพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ มีแหล่งที่มาและประวัติคือ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ได้มาจากการคัดพันธุ์แบบสืบตระกูล ตั้งแต่ พ.ศ. 2528 โดยการผสมพันธุ์ระหว่างลูกผสมชั่วที่ 1 ของ IR25393-57-2-3/RD23/IR27316-96-3-2-2 และพันธุ์ลูกผสมชั่วที่ 1 ของ SPRLR77205-3-2-1/SPRLR79134-51-2-2 ที่สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี ใน พ.ศ. 2529-2531 คัดเลือกให้มีลักษณะดี และต้านโรคแมลงในสภาพธรรมชาติ ต่อมาใน พ.ศ. 2531-2532 ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตภายในสถานีทดลองกับนาเกษตรกร ระหว่าง พ.ศ. 2532-2535 ได้มีการศึกษาเสถียรภาพการให้ผลผลิต ต่อมาใน พ.ศ. 2534-2535 ได้เสนอสถาบันวิจัยข้าวพิจารณาพันธุ์ข้าวดังกล่าวเพื่อปลูกเป็นพันธุ์หลัก กรมวิชาการเกษตรรับรองพันธุ์เมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2537

5.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

1. ประเภทพืชล้มลุก วงศ์หญ้า พวกข้าวเจ้านาสวน ไม่ไวต่อช่วงแสง
2. ต้นสูงปานกลาง (เฉลี่ยประมาณ 125 เซนติเมตร) ทรงกอ ตั้ง ปล้องสีเขียวลำต้นแข็งแรง ไม่ล้ม
3. ใบสีเขียวเข้มและมีขน กาบใบสีเขียว ใบธงค่อนข้างตรง การแก่ของใบช้า
4. ดอก ช่อดอก กลีบรองดอกสีฟาง ความยาวกลีบรองดอกสั้น รวงยาว ระแง้ค่อนข้างถี่ รวงค่อนข้างแน่น การยืดของคอรวงยาว จำนวนรวงต่อตารางเมตรเฉลี่ย 230 รวง
5. เมล็ด จำนวนเมล็ดต่อรวงเฉลี่ย 154 เมล็ด ยอดเมล็ดยาวเรียวมีเปลือกสีฟาง และมีขนยอดเมล็ดสีฟาง ก้นมีจุดบ้าง ขนาดเมล็ดโตเฉลี่ย ยาว 10.07 มิลลิเมตร กว้าง 2.47 มิลลิเมตร และหนา 2.04 มิลลิเมตร น้ำหนัก 11.4 กิโลกรัมต่อถัง ข้าวกล้องสีขาว
6. มีระยะพักตัวของเมล็ด 22 วัน

5.4.2 ลักษณะเด่นประจำพันธุ์

1. ศักยภาพการให้ผลผลิตสูง โดยให้ผลผลิตเฉลี่ย 806 กิโลกรัมต่อไร่ และมีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120 วัน เมื่อปลูกแบบปักดำในฤดูนาปี แต่ถ้าปลูกในฤดูนาปรังอายุจะเพิ่มมากขึ้น 4-5 วัน และตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยดี
2. มีความต้านทางโรคแมลงที่สำคัญคือ ต้านทานโรคไหม้ เพลี้ยกระโดดหลังขาว ดีกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ต้านทานโรคใบหงิกและโรคใบสีส้มในธรรมชาติและต้านทานโรคขอบใบแห้ง ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล

5.5 การเลือกพันธุ์เมล็ดข้าวมาใช้ในงานวิจัย

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้คือ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1) เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง คือแสงไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตในระยะต้นกล้า 45 วัน และมีการใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวดังกล่าวในการเพาะปลูกในพื้นที่ประเทศไทยอย่างกว้างขวาง ซึ่งการทดสอบจะดูระยะการเจริญเติบโตหลังจากการเพาะเมล็ดเป็นระยะต้นกล้า 7 วัน โดยมีการทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้าต่อเนื่อง 7 วัน เนื่องจากมีการปลูกใต้สนามไฟฟ้าซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 เซนติเมตร ทำให้ดูการเจริญเติบโตได้จำกัดเนื่องจากความสูงของลำต้นจะสูงเกินระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ มีการปลูกต้นข้าวเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

บทที่ 6
ระบบที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

6.1 บทนำ

สถิติหมายถึง วิธีการที่ว่าด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูล การนำเสนอข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การตีความหมายข้อมูล และค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง สถิติทดสอบที่ใช้ในปัจจุบันกันอย่างแพร่หลายได้แก่ สถิติทดสอบที (t-test statistic) สถิติทดสอบซี (Z-test statistic) สถิติทดสอบเอฟ (F-test statistic) สถิติทดสอบทั้ง 3 ตัวนี้ใช้ในการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติที่แตกต่างกัน สถิติทดสอบทีและซี มักจะใช้เพื่อสรุปอ้างอิงค่ามัชฌิมเลขคณิต (Arithmetic mean) ของกลุ่มตัวอย่างไปหามัชฌิมเลขคณิตของกลุ่มประชากร ส่วนสถิติทดสอบเอฟมักจะใช้เพื่อสรุปอ้างอิงค่าความแปรปรวน (Variance) จากกลุ่มตัวอย่างไปหาความแปรปรวนของประชากร สถิติทดสอบ ที ซี และเอฟ เป็นสถิติทดสอบแบบพาราเมตริก (Parametric)

6.2 ทฤษฎีพื้นฐานทางสถิติ

6.2.1 เกณฑ์ในการเลือกใช้สถิติทดสอบ

สถิติที่ใช้ในการวิจัยในปัจจุบันอาจแบ่งได้ดังนี้ คือ [21]

1. พิจารณาจุดมุ่งหมายในการใช้ คือเพื่อบรรยายข้อมูลซึ่งเรียกว่าสถิติภาคบรรยาย (Descriptive Statistics) หรือต้องการสรุปอ้างอิงข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างไปหาประชากร จะใช้สถิติสรุปอ้างอิงข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างไปหาประชากร (Inferential Statistics) ซึ่งจะสรุปในตารางดังนี้คือ

ตารางที่ 6.1 แสดงจุดมุ่งหมายในการเลือกใช้สถิติที่เหมาะสม

สถิติภาคบรรยาย	**สัญลักษณ์**		
การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง	**กลุ่มตัวอย่าง**		**ประชากร**
มัชฌิมเลขคณิต	$\overline{X}$	สรุปอ้างอิง	μ
มัชฌิมเรขาคณิต	gm	สรุปอ้างอิง	GM
มัชฌิมฮาร์โมนิค	hm	สรุปอ้างอิง	HM
มัธยฐาน	md	สรุปอ้างอิง	MD
ฐานนิยม	mo	สรุปอ้างอิง	MO

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

สถิติภาคบรรยาย	สัญลักษณ์		
การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง	กลุ่มตัวอย่าง		ประชากร
การวัดการกระจาย			
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S	สรุปอ้างอิง	σ
ความแปรปรวน	S^2	สรุปอ้างอิง	σ^2
พิสัย	ra	สรุปอ้างอิง	RA
ส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์	qd	สรุปอ้างอิง	QD
ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย	ad	สรุปอ้างอิง	AD
การแจกแจง			
ความเบ้	sk	สรุปอ้างอิง	SK
ความโด่งแบน	ku	สรุปอ้างอิง	KU
จำนวน	n	สรุปอ้างอิง	N
ความสัมพันธ์			
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	r	สรุปอ้างอิง	ρ
ความถดถอย		สรุปอ้างอิง	
ค่าคงที่	a	สรุปอ้างอิง	A
น้ำหนักหรือสัมประสิทธิ์ถดถอย	b	สรุปอ้างอิง	B

2. พิจารณาจากจำนวนตัวแปรตาม (Dependent Variable) ที่ใช้ในงานวิจัย ถ้ามี 1 ตัว ใช้การวิเคราะห์ตัวแปรเดียว (Univariate Analysis) ถ้ามี 2 ตัว ใช้การวิเคราะห์ตัวแปรคู่ (Bivariate Analysis) ถ้ามีตัวแปรตามมากกว่า 2 ตัว ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรพหุ (Multivariate Analysis)

3. พิจารณาจากประเภทของข้อมูล โดยดูลักษณะของข้อมูลว่าเป็นข้อมูลบอกจำนวนหรือประเภท (Categorical Data) หรือบอกลำดับที่ (Ordinal data) หรือบอกช่วง (Interval Data) หรือบอกอัตราส่วน (Ratio Scale Data) จากการจำแนกข้อมูลตามสเกลดังกล่าว จะได้สเกลข้อมูลแสดงในตารางดังนี้

ตารางที่ 6.2 แสดงการแยกข้อมูลตามลักษณะของข้อมูล หรือสเกล [22]

สเกลของข้อมูล	**การวัดตำแหน่ง**	**การวัดการกระจาย**	**การทดสอบความมีนัยสำคัญ**
จำนวน (บอกประเภท)	ฐานนิยม	Information H	κ^2 Fisher's exact test
ลำดับที่	มัธยฐาน	เปอร์เซนต์ไทล์	Sign test Run test
บอกช่วง	มัชฌิมเลขคณิต	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย	Z-test t-test F-test
อัตราส่วน	มัชฌิมเรขาคณิต มัชฌิมฮาร์โมนิค	ร้อยละ Variation Decilog การกระจาย	

4. พิจารณาจากจำนวนกลุ่มของข้อมูล การวิจัยบางอย่างศึกษาข้อมูลของคน (หรือสัตว์หรือสิ่งของ) เพียง 1 กลุ่ม ผู้วิจัยก็สามารถใช้สถิติภาคบรรยายและสรุปอ้างอิงจากกลุ่มตัวอย่างไปหาประชากรได้ แต่การวิจัยบางอย่างมีข้อมูลของคนมากกว่า 1 กลุ่มขึ้นไป ผู้วิจัยอาจต้องการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างหรือความคล้ายคลึงของกลุ่มต่างๆได้

6.2.2 คำศัพท์ทางสถิติและสัญลักษณ์

คำศัพท์ทางสถิติที่ใช้กันแพร่หลายได้แก่

1. มัชฌิมเลขคณิต (Arithmetic Mean) ถ้าเป็นกลุ่มตัวอย่างใช้ $(\overline{X})$ และประชากร (μ) เป็นค่าบอกจุดตรงกลางของกลุ่มข้อมูลว่ามีค่าเท่าใด

สูตรคำนวณ

$$\overline{X} = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_i}{n} \tag{6.1}$$

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_i}{N} \tag{6.2}$$

2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ถ้าเป็นกลุ่มตัวอย่างใช้ S และประชากร σ เป็นค่าบอกความมากน้อยของการกระจายข้อมูล ถ้าค่า S มาก แสดงว่าข้อมูลชุดนั้นประกอบด้วยข้อมูลที่มีค่าน้อยและค่ามากปะปนกันอยู่ ถ้าค่า S น้อย แสดงว่าข้อมูลชุดนั้นประกอบด้วยข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าค่า S เป็นศูนย์แสดงว่าข้อมูลชุดนั้นประกอบด้วยข้อมูลที่มีค่าเท่ากันหมด

สูตรคำนวณ

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\left(X_i - \overline{X}\right)^2}{n-1}} \tag{6.3}$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\left(X_i - \mu\right)^2}{N}} \tag{6.4}$$

3. ความแปรปรวน (Variance) คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง ถ้าเป็นกลุ่มตัวอย่างใช้ S^2 และประชากรใช้ σ^2 ความแปรปรวนมีลักษณะพิเศษคือสามารถแบ่งเป็นส่วนๆ แล้วนำมารวมกันได้ (Additive Property)

สูตรคำนวณ

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(X_i - \overline{X}\right)^2}{n-1} \tag{6.5}$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left(X_i - \mu^2\right)}{N} \tag{6.6}$$

4. จำนวนหรือขนาด ถ้าเป็นกลุ่มตัวอย่างใช้ n และถ้าเป็นประชากรใช้ N โดยปกติ n จะเล็กกว่า N

5. สถิติ (Statistics) คือค่าที่คำนวณจากกลุ่มตัวอย่าง เช่น n, $\overline{X}$, S, S^2 ฯลฯ

6. พารามิเตอร์ (Parameter) คือ ค่าที่คำนวณจากกลุ่มประชากรเช่น N, μ, σ, σ^2

6.3 หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การวิเคราะห์เชิงอธิบาย (Descriptive Analysis) ข้อมูลซึ่งได้แก่การวิเคราะห์ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความแปรปรวน ของความสูงของลำต้น ความยาวรากและอัตราการเจริญเติบโตในแต่ละวัน

2. การวิเคราะห์เชิงทดสอบสมมุติฐาน (Hypothesis Testing Analysis) ใช้ในการแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูล เช่นความเชื่อมั่นความแตกต่างค่าเฉลี่ย และใช้ในการอธิบายสรุป

ในการวิเคราะห์เชิงทดสอบสมมุติฐาน เป็นการนำหลักสถิติเชิงอนุมานหรือการใช้สถิติเกี่ยวกับการบทสรุปและบอกความน่าเชื่อถือมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยนี้ มีขั้นตอน 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล
2. การเลือกตัวสถิติที่ใช้วิเคราะห์และทดสอบ
3. การกำหนดค่าความเชื่อมั่น
4. การตั้งสมมุติฐานเพื่อการวิเคราะห์
5. การทดสอบสมมุติฐานทางสถิติและการตัดสินใจ

1. การตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่ได้มีการแจกแจงเป็นไปตามเงื่อนไขตามข้อกำหนดสถิติในการทดสอบสมมุติฐานหรือไม่ คือมีการตรวจสอบข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือการแจกแจงแบบอื่นที่ไม่ใช่แบบปกติ ซึ่งถ้าข้อมูลที่สุ่มมาได้มีการแจกแจงแบบปกติจะใช้สถิติทดสอบแบบมีพารามิเตอร์ (Parametric Test) หรือใช้สถิติทดสอบตามฟังก์ชันของข้อมูลที่สุ่มมา อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก ที่มีจำนวนข้อมูลเป็นจำนวนมาก จึงสามารถที่จะใช้การทดสอบแบบมีพารามิเตอร์โดยเงื่อนไขที่ว่าข้อมูลเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ สามารถประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติหรือใกล้เคียงแบบปกติได้

2. การเลือกตัวสถิติที่ใช้วิเคราะห์และทดสอบ

ตัวสถิติทดสอบเป็นฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเลือกทดสอบสมมุติฐานในการวิจัยเพื่อความเหมาะสมกับค่าสถิติที่ได้มา ตัวสถิติทดสอบมีดังต่อไปนี้

Z-test (Standard Normal Distribution) เป็นการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่างจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติและทั่วๆไป

t-test เป็นการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่างจากประชากรที่มีการแจกแจงใกล้เคียงปกติและขนาดข้อมูลเล็ก (ค่าฟังก์ชัน t-test จะมีค่าเข้าใกล้ Z-test ในกรณีข้อมูลมีขนาดใหญ่)

F-test เป็นการทดสอบสมมุติฐาน ความแปรปรวนของข้อมูลตัวอย่างจากประชากรที่มีการแจกแบบปกติและทั่วไป

ซึ่งจากคุณลักษณะของข้อมูลตัวอย่างที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลขนาดใหญ่ตรงตามเงื่อนไขข้อ 1.และ 2.จึงเหมาะสมในการใช้ตัวสถิติทดสอบ Z-test หรือ t-test ได้

3. การกำหนดค่าความเชื่อมั่น

คือค่าที่บอกความน่าเชื่อถือของการตัดสินใจหรือบอกบทสรุปในงานวิจัยนี้ว่ามีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด ตามหลักการค่าสูงสุดของความน่าเชื่อถือมี 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางปฏิบัติในงานวิจัย เราไม่สามารถสรุปอะไรได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจจะเกิดปัจจัยอื่นๆ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นโดยทั่วไปในทางปฏิบัติก็จะกำหนดค่าความเชื่อมั่น 3 ระดับ คือ 99%, 95% และ 90% ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ระดับค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ประเด็นสำคัญของการกำหนดค่าความเชื่อมั่นคือ การนำไปใช้ในการกำหนดค่าความมีนัยสำคัญในการตัดสินใจค่าจากการทดสอบสมมุติฐาน ยกตัวอย่างเช่นที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ก็คือจะได้ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะได้ระดับนัยสำคัญ 0.05 และที่ระดับความเชื่อมั่น 90% จะได้ระดับนัยสำคัญ 0.1

4. การตั้งสมมุติฐานเพื่อการวิเคราะห์

สมมุติฐานทางสถิติ (Statistical Hypothesis) [23] คือข้อมูลที่เขียนในรูปของโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทดสอบทางสถิติ โดยใช้สัญลักษณ์แทนข้อความหรือ ตัวแปร เนื่องจากสมมุติฐานการวิจัย ไม่สามารถทำการทดสอบได้ จึงเปลี่ยนสมมุติฐานการวิจัยมาเขียนในรูปของสัญลักษณ์เพื่อให้สามารถทำการทดสอบทางสถิติได้ สมมุติฐานทางสถิติเป็นข้อตกลงเบื้องต้นที่อาจจะเป็นจริงหรือไม่ก็ได้ สมมุติฐานทางสถิติมี 2 ชนิดคือ

4.1 สมมุติฐานกลาง (Null-Hypothesis = H_0) เป็นสมมุติฐานที่เขียนในลักษณะกลาง กล่าวถึงลักษณะของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ยของประชากร (μ) ความแปรปรวนของประชากร (σ^2) สมมุติฐานกลาง แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

4.1.1 คาดคะเนค่าประชากรว่าเป็นค่าใดค่าหนึ่ง เช่น

ค่าเฉลี่ยความสูงของของต้นข้าวเท่ากับ 170 เซนติเมตร

(H_0 : μ = 170)

ความแปรปรวนของความสูงของต้นข้าวเท่ากับ 25

(H_0 : σ^2 = 25)

4.1.2 สมมุติฐานที่เขียนในลักษณะ ไม่มีความสัมพันธ์ หรือ ไม่มีความแตกต่างระหว่างตัวแปรที่ศึกษา เช่น

รายได้และระดับการศึกษาของประชากร ไม่มีความสัมพันธ์กัน

(H_0 : ρ = 0)

ประชากร a และ ประชากร b มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน

(H_0 : μ_a = μ_b)

4.2 สมมุติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis = H_1) เป็นสมมุติฐานที่ตรงข้ามกับสมมุติฐานกลาง เขียนแสดงถึงความแตกต่าง หรือ ความสัมพันธ์ของตัวแปร และถ้ามีผู้วิจัยมีเหตุผลหรือข้อมูลเพียงพอ อาจเขียนสมมุติฐานที่บอกทิศทางแน่นอนว่า เมื่อสมมุติฐานกลางไม่เป็นจริงตามที่ตั้งไว้แล้ว ควรจะเป็นจริงในลักษณะใด เช่น

สมมุติฐานกลาง ค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวเท่ากับ 170 เซนติเมตร

$H_0 : \mu = 170$

หรือ ค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวมากกว่า 170 เซนติเมตร

$H_1 : \mu > 170$

สมมุติฐานกลาง ค่าเฉลี่ยของประชากร a และประชากร b ไม่แตกต่างกัน

$H_0 : \mu_a = \mu_b$

หรือ ค่าเฉลี่ยของประชากร a มากกว่าค่าเฉลี่ยของประชากร b

$H_1 : \mu_a > \mu_b$

การตั้งสมมุติฐาน นิยมใช้สัญลักษณ์ของค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ซึ่งเป็นค่าความจริงของประชากร (Population) ในการทดสอบสิ่งที่นำมาศึกษาและตีความหมายเป็นค่าความจริงของกลุ่มตัวอย่าง (Sample) ที่เรียกว่า ค่าสถิติ (Statistics) มีสัญลักษณ์แตกต่างกันออกไป นักวิจัยจะต้องใช้ค่าความจริงจากกลุ่มตัวอย่างอ้างอิงขยายไปสู่ค่าความจริงของประชากร

จากข้อมูลงานวิจัยเราจะพิจารณาค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก จะเป็นตัวแปรที่นำมาเปรียบเทียบหาความแตกต่างที่เกิดขึ้นจาก 2 กลุ่ม คือจากกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้าจากนั้นจึงทำการตั้งสมมุติฐานเพื่อตรวจสอบความเชื่อมั่นของข้อมูล โดยจะจัดรูปสมมุติฐานตามหลักสถิติแบบสากล สมมุติฐานในการทำการวิจัยนี้จะพิจารณาการตั้งสมมุติฐานโดยพิจารณาค่าเฉลี่ย

5. การทดสอบสมมุติฐานทางสถิติและการตัดสินใจ

การทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ เป็นวิธีการควบคุมและรับรู้ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในสิ่งที่กำลังศึกษาอยู่

การทดสอบสมมุติฐาน มีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ 2 ประเภท คือ

1. ความคลาดเคลื่อนประเภท I (Type I error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0) เมื่อสมมุติฐานกลางเป็นจริง

2. ความคลาดเคลื่อนประเภท II (Type II error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการยอมรับสมมุติฐานกลาง (H_0) เมื่อสมมุติฐานกลางไม่เป็นจริง

ลักษณะของความคลาดเคลื่อนทั้งสองชนิดนี้ แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.3 แสดงประเภทของความคลาดเคลื่อนของการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ

	H_0 เป็นจริง	H_0 ไม่เป็นจริง
ปฏิเสธ H_0	ความคลาดเคลื่อนประเภท 1 (α)	การตัดสินในที่ถูกต้อง
ยอมรับ H_0	การตัดสินในที่ต้องถูกต้อง	ความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2 (β)

โอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 โดยทั่วไปมักจะใช้สัญลักษณ์แทนว่า α และโอกาสสำหรับความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2 จะใช้สัญลักษณ์ β

5.1 ระดับความมีนัยสำคัญ (Level of significant)

ระดับความมีนัยสำคัญ หมายถึง การกำหนดขอบเขตของความคลาดเคลื่อนประเภท I (α) ที่จะยอมให้เกิดขึ้นได้ในการทำวิจัย การกำหนดความคลาดเคลื่อนนี้นิยมกำหนดเป็นความน่าจะเป็น (Probability) เช่น .05 , .01 หรือ .001 ซึ่งแสดงว่าในการทดสอบสมมุติฐานทางสถิตินั้นถ้าเกิดความคลาดเคลื่อนประเภท I (α) น้อยกว่าที่กำหนดไว้ ก็จะยอมรับสมมุติฐานกลาง (H_0) ที่ตั้งไว้ระดับความมีนัยสำคัญนี้อาจจะพิจารณาในเรื่องระดับความเชื่อมั่นก็ได้ โดยเอาระดับความมีนัยสำคัญไปลบออกจาก 1.00 เช่น ระดับความมีนัยสำคัญ .05 ก็จะได้ระดับความเชื่อมั่น .95 หรือ 95 % นั่นเอง แปลความหมายได้ว่าในการทดลอง หรือทดสอบ 100 ครั้ง จะให้ผลดังที่ปรากฏไม่น้อยกว่า 95 ครั้ง ผิดพลาดคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 5 ครั้ง

5.2 วิธีการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ

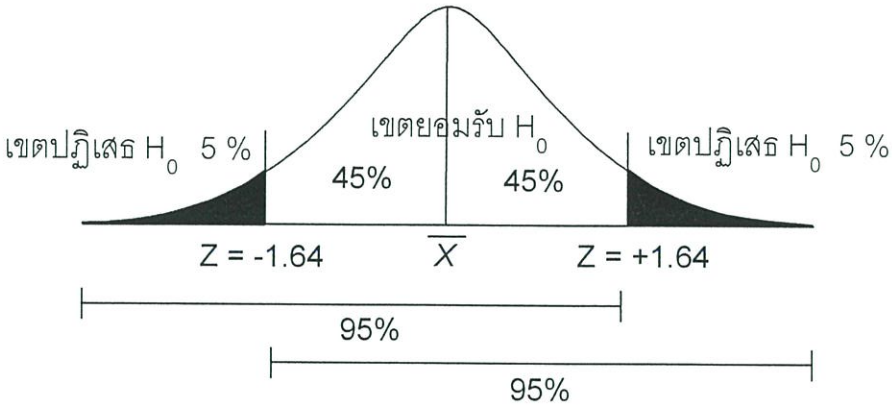
การทดสอบสมมุติฐาน เป็นการพิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้จากกลุ่มตัวอย่างนั้นจะมีค่าอยู่ในพื้นที่การยอมรับ (Acceptance area) หรือพื้นที่การปฏิเสธ (Rejection area) หรือ (Critical area) สมมุติฐานทางสถิติ ตามระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้ เช่น α = .05, .01 หรือ .001 การทดสอบสมมุติฐานทางสถิติมี 2 วิธีคือ

1. การทดสอบแบบมีทิศทาง (Directional Test) เป็นการทดสอบด้านเดียว นิยมใช้เทคนิคการทดสอบแบบทิศทางเดียว (One tailed test) ในกรณีที่ผู้วิจัยคาดคะเนอย่างแน่ใจว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มหนึ่งมากกว่า หรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของอีกกลุ่มหนึ่งดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

หรือ

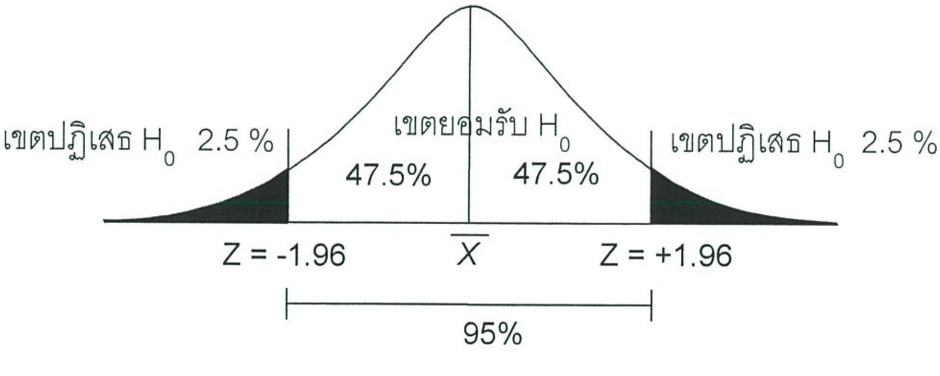
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 < \mu_2$$



รูปที่ 6.1 แสดงการทดสอบแบบมีทิศทางไปทางบวก หรือทางลบ สมมุติว่า กำหนดระดับความมีนัยสำคัญที่ .05 (α = .05)

2. การทดสอบโดยไม่มีทิศทาง (Nondirectional test) เป็นการทดสอบความแตกต่าง โดยไม่คำนึงถึงทิศทาง ใช้เทคนิคการทดสอบแบบสองทิศทาง (Two tailed test) ในกรณีที่ผู้วิจัยคาดคะเนว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างของทั้งสองกลุ่มแตกต่างกัน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$



รูปที่ 6.2 ภาพแสดงการทดสอบแบบไม่มีทิศทาง สมมุติว่ากำหนดระดับความมีนัยสำคัญที่ .05 (α = .05) พื้นที่ปลายโค้งของการแจกแจงความถี่จะเป็นข้างละ $\frac{\alpha}{2} = \frac{.05}{2} = .025$

ขั้นของการทดสอบสมมุติฐาน มี 5 ขั้นตอน ดังนี้ [24]

1. การตั้งสมมุติฐาน ซึ่งประกอบด้วยสมมุติฐานศูนย์ (H_0) และสมมุติฐานอื่นๆ (H_1) เช่น

$$H_0 : \mu = 50$$

$H_1 : \mu = 50$

2. การกำหนดระดับความมีนัยสำคัญ (α)

3. การหาเขตวิกฤติ (Critical region)

4. การคำนวณหาค่าสถิติ ที่ใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน อันได้แก่ Z, t, F

5. สรุปผลการทดสอบ โดยปฏิเสธค่า H_0 เมื่อค่าสถิติตกอยู่ในเขตวิกฤต และยอมรับ H_0 ถ้าค่าสถิติตกอยู่นอกเขตวิกฤต

6.3.1. การทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับผลต่างของค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม

ถ้าต้องการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม เรามักจะดูว่าค่าเฉลี่ยทั้งสองมีความแตกต่างกันหรือไม่ หรือค่าเฉลี่ยของประชากรหนึ่งจะมากกว่าค่าเฉลี่ยของประชากรหนึ่งหรือไม่ ในการทดสอบจะใช้การแจกแจงของค่าสถิติ $\overline{X_1} - \overline{X_2}$ ซึ่งวิธีการทดสอบมีดังนี้ [25]

1. การทดสอบเมื่อทราบค่าความแปรปรวนของประชากรทั้งสองกลุ่ม

ถ้า $\overline{X_1}$ และ $\overline{X_2}$ เป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระจากกัน ซึ่งมีขนาด n_1 และ n_2 ที่สุ่มจากประชากรสองกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ย μ_1 และ μ_2 และมีความแปรปรวนเป็น σ_1^2 และ σ_2^2 ตามลำดับ แล้วค่าสถิติ $\overline{X_1} - \overline{X_2}$ จะมีการแจกแจงปกติ และค่า Z จะมีการแจกแจงปกติมาตรฐาน เราจึงทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับผลต่างของค่าเฉลี่ย โดยการใช้การแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน (Z-distribution) ในการหาช่วงที่จะใช้ในการทดสอบ ที่จะกล่าวได้ว่าทดสอบสมมุติฐานโดยการใช้การทดสอบแบบ Z (Z-test) ลำดับขั้นในการทดสอบ มี 5 ขั้น เช่นเดียวกับการทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มเดียว แต่ในบางขั้นตอนอาจจะมีความแตกต่างกันบ้างดังนี้

1. ตั้งสมมุติฐาน

$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq d_0$ หรือ

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < d_0$ หรือ

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 > d_0$

ในกรณี $d_0 = 0$ เราอาจจะตั้งสมมุติฐานแบบใดแบบหนึ่งดังนี้

	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$
	$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หรือ
หรือ	$H_1 : \mu_1 - \mu_2 > 0$	$H_1 : \mu_1 > \mu_2$ หรือ
หรือ	$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < 0$	$H_1 : \mu_1 < \mu_2$

2. กำหนดระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติ (α)

3. หาเขตวิกฤต โดยเปิดตาราง หาค่าวิกฤต และการทดสอบ จะเป็นแบบทดสอบสองทางหรือทางเดียว ให้พิจารณาจาก H_1 เช่นเดียวกับการทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มเดียว

4. คำนวณหาค่าสถิติที่จะใช้ในการทดสอบจากสูตรที่ 6.7

$$Z = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \qquad \text{หรือ} \qquad (6.7)$$

กรณีที่เราตั้งสมมุติฐาน H_0 : $\mu_1 - \mu_2 = 0$ หรือ H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ จะได้สมการที่ 6.8

$$Z = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \qquad (6.8)$$

ในกรณีที่เราไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ_1^2 และ σ_2^2) และ n_1, n_2 มีขนาดใหญ่พอสมควร (n_1, n_2 ≥ 30) เราจะใช้ S_1 และ S_2 แทน σ_1 และ σ_2 และใช้ค่าสถิติ Z ในการทดสอบตามลำดับขั้นดังที่กล่าวมาแล้ว แต่สูตรที่ใช้ในการทดสอบจะเป็น

$$Z = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \qquad (6.9)$$

5. สรุปผล โดยการปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ในเขตวิกฤต และยอมรับ H_0 ถ้าค่าสถิติตกอยู่นอกเขตวิกฤต

การสรุปผลจากสถิติทดสอบ ในการสรุปผลการทดสอบความมีนัยสำคัญเมื่อคำนวณค่า t, Z หรือ F ได้แล้ว (ซึ่งเรียกว่า ค่าสถิติที่ทดสอบที่คำนวณได้) ให้นำไปเปรียบเทียบกับค่าสถิติทดสอบตามที่ตั้งไว้ (ซึ่งเรียกว่าค่าสถิติทดสอบจากตาราง) ถ้าสถิติทดสอบที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าสถิติทดสอบจากตาราง แสดงว่าค่าสถิติทดสอบนั้นตกอยู่ในช่วงที่ต้องปฏิเสธสมมุติฐานกลางด้วยระดับความมีนัยสำคัญ α ถ้าสถิติทดสอบที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าสถิติทดสอบจากตารางแสดงว่าค่าสถิติทดสอบตกอยู่ในช่วงที่ต้องคงสมมุติฐานกลาง

6.4 การนำการวิเคราะห์ทางสถิตินำไปใช้งานวิจัย

การนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยคือ ความสูงของลำต้นและความยาวราก นำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่ออธิบายแนวโน้มของข้อมูลคือ

1. การทดสอบความแตกต่างระหว่างข้อมูล 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า จะเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูล 2 กลุ่ม โดยจะใช้ค่ากลางในการเปรียบเทียบคือค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้น และความยาวราก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ข้อมูล 2 กลุ่มมีอิสระต่อกัน และกลุ่มตัวอย่างมีมากกว่า 30 ตัวอย่าง จึงเลือกใช้สถิติทดสอบแบบ Z-test

2. ข้อมูลจากงานวิจัยนี้มีจำนวนมาก มีการแจกแจงแบบปกติ จึงสามารถใช้การทดสอบแบบมีพารามิเตอร์ได้ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยเลือกใช้ตัวสถิติทดสอบคือ Z-test ในการทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยสองประชากร เนื่องจากข้อมูลกลุ่มตัวอย่างต้นข้าวมีจำนวนมากใกล้เคียงกับประชากรของต้นข้าว ซึ่งจะเป็นการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ยของข้อมูลความสูงของต้นข้าวและความยาวราก โดยกำหนดระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติ α = .05 จะได้ระดับความเชื่อมั่น 95% แปลความหมายได้ว่าในการทดลองหรือทดสอบ 100 ครั้ง จะให้ผลดังที่ปรากฏไม่น้อยกว่า 95 ครั้ง ผิดพลาดคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 5 ครั้ง โดยตั้งสมมุติฐานกลางคือค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า และสมมุติฐานทางเลือกคือค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า และนำข้อมูลมาทดสอบสมมุติฐานแบบมีทิศทาง (Directional Test) โดยใช้เทคนิคการทดสอบแบบทิศทางเดียว (One tailed test) เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูลของความแตกต่างของการเจริญเติบโตของต้นข้าว 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้คือ

ในงานวิจัยข้อมูลมีจำนวนมาก ทดสอบแบบมีพารามิเตอร์ได้ ใช้สถิติทดสอบ Z

1. การเปรียบเทียบจากการทดสอบสมมุติฐาน โดยพิจารณาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเราจะกำหนดการตั้งสมมุติฐานดังนี้

สมมุติฐานกลาง (H_0) คือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าเท่ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เขียนเป็นสัญลักษณ์คือ $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

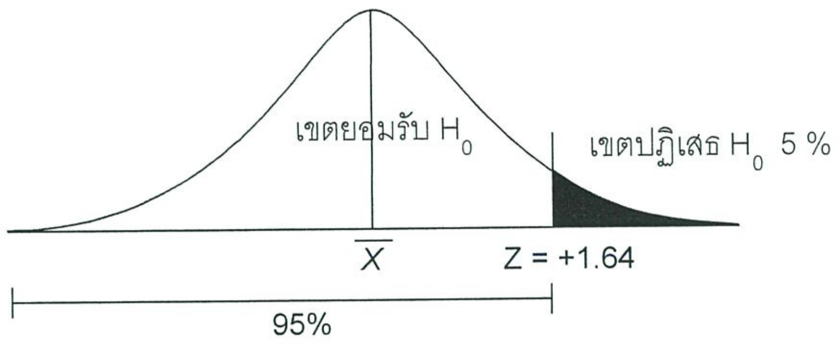
สมมุติฐานทางเลือก (H_1) คือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เขียนเป็นสัญลักษณ์คือ $H_1 : \mu_1 > \mu_2$

โดยที่ μ_1 คือค่าค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าว(ประชากร)ที่ได้รับสนามไฟฟ้า

โดยที่ μ_2 คือค่าค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าว(ประชากร)ที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

2. กำหนดระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = .05$

3. เขตวิกฤต จากตาราง $Z_{.05} = 1.64$



รูปที่ 6.3 แสดงช่วงของการยอมรับและช่วงของการปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0)

4. คำนวณค่าสถิติจากสูตร

กรณีที่เราตั้งสมมุติฐาน H_0 : $\mu_1 - \mu_2 = 0$ หรือ H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ จะหาค่า Z ได้คือ

$$Z = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \qquad (6.10)$$

สมมุติค่า Z ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 2.27

5. สรุปผล เนื่องจากค่า Z คำนวณมากกว่าค่า Z จากตาราง ค่าสถิติตกอยู่ในเขตวิกฤต จึงต้องปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ที่ระดับความมีนัยสำคัญ .05

บทที่ 7
ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

7.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าของข้าว มีการทดลองการปลูกต้นข้าวมีการปลูกเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง 7 วัน ค่าของสนามไฟฟ้าคือ 28.5 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี 2 แบบคือสนามแนวตั้งและสนามแนวระดับ กับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า และทดลองผลของค่าสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของข้าวเพิ่มเติมคือ 97 kV/m และ 4 kV/m โดยทดลองแนวของสนามไฟฟ้าคือแนวตั้ง ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง การเก็บรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และผลการทดลอง ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2 ขั้นตอนในการวิจัย

การวางแผนการทดลอง จะทำการศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าของข้าวโดยมีวิธีการดังนี้

7.2.1 เงื่อนไขการทดลอง

1. สนามไฟฟ้าใช้ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 28.5 kV/m แบบต่อเนื่อง ซึ่งวิเคราะห์มาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบดีซี พิกัดขนาด 300 kV ที่มีระยะสายส่งห่างจากพื้นดินแนวดิ่ง 8.5 เมตร และทดลองค่าสนามไฟฟ้าเพิ่มเติมคือ 97 kV/m และ 4 kV/m

2. แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี 2 แบบคือสนามไฟฟ้าแนวตั้งและสนามไฟฟ้าแนวระดับ โดยนิยามเทียบกับแนวแรงโน้มถ่วงของโลก

3. เมล็ดข้าวจะมีการวางเมล็ด 2 แบบคือ การวางเมล็ดแนวขนานโดยนิยามคือความยาวเมล็ดขนานสนามไฟฟ้าและการวางเมล็ดแนวขวางคือความยาวเมล็ดขวางกับเส้นแรงสนามไฟฟ้า ในกรณีสนามไฟฟ้าแนวระดับ การวางเมล็ดจะมี 2 แบบคือ วางเมล็ดแนวขนานและวางเมล็ดแนวขวาง และในกรณีสนามไฟฟ้าแนวตั้ง มีการวางเมล็ด 2 แบบคือ วางเมล็ดขวาง A และวางเมล็ดขวาง B

4. การปลูกต้นข้าวมีการปลูกเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

5. มีการวัดข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นข้าวคือ ความสูงของลำต้น ความยาวราก ทุกวันเป็นเวลา 7 วัน

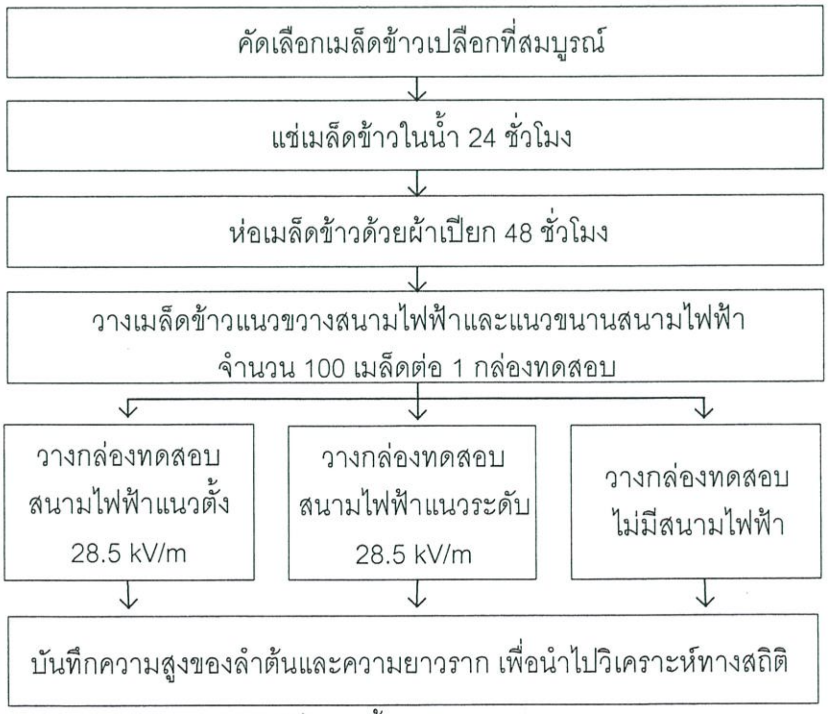
6. ขนาดของกลุ่มตัวอย่างคือมีการทดลองครั้งละ 100 เมล็ด โดยมีการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง

7. สถานที่ทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 25 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ที่ 70 %

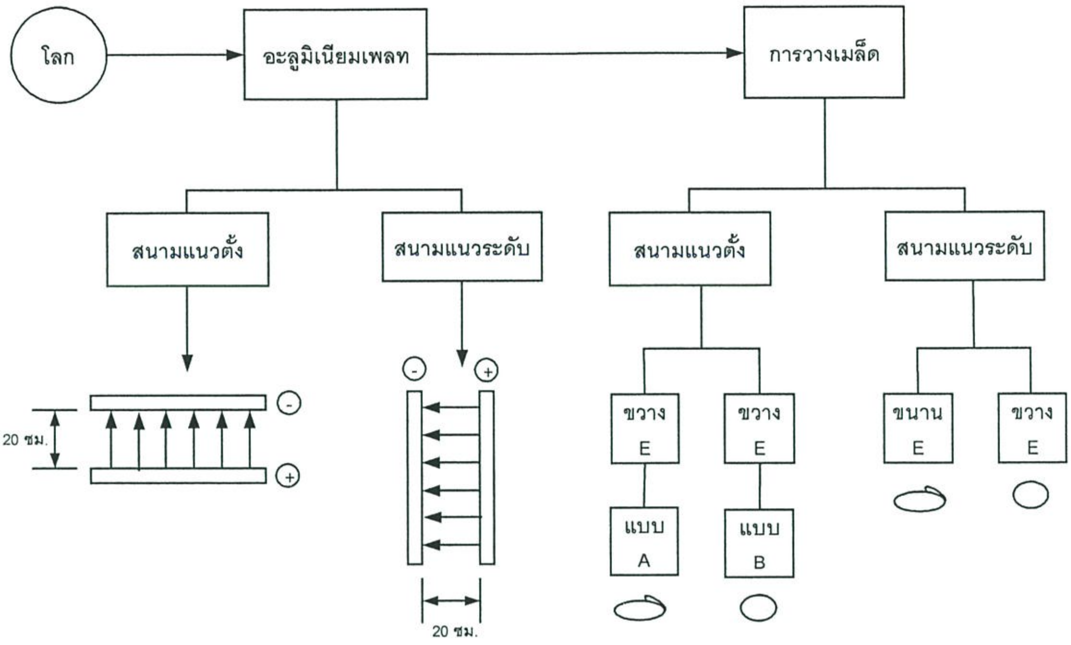
7.3 ผลกระทบของแนวของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตต้นข้าว

7.3.1 วิธีการทดลอง

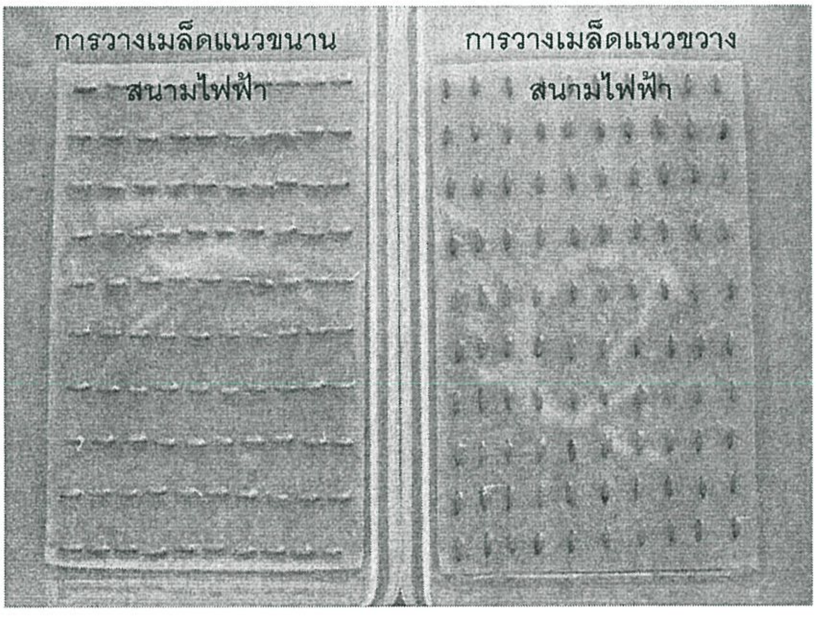
คัดเลือกเมล็ดข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่สมบูรณ์แล้วเพาะ ตรวจนับการงอกของต้นข้าวทุกวันหลังจากทำการเพาะ โดยนับจำนวนเมล็ดที่งอก เมื่อมีส่วนของรากโผล่ออกมาจากเปลือกเมล็ดในแต่ละกล่องที่เพาะ บันทึกผลเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ด เมื่อเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดเริ่มคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะทำการปลูกเมล็ดข้าวหลังจากการเพาะ 3 วัน ในกล่องที่รองด้วยกระดาษเพาะเมล็ดจำนวน 2 ชั้น ใส่น้ำปริมาณ 20 มิลลิลิตรต่อกล่อง โดยใช้เมล็ดข้าววางขวางสนามไฟฟ้าและขนานกับสนามไฟฟ้า จำนวน 100 เมล็ดต่อกล่อง นำไปปลูกเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า และจะบันทึกข้อมูลดิบคือวัดการเจริญเติบโตของต้นกล้าโดยวัดความยาวราก และความสูงของยอดของต้นกล้าโดยกำหนดจุดวัดโดยวัดความสูงจากโคนของลำต้นถึงยอดลำต้น มีการบันทึกการเจริญเติบโตของต้นกล้า 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้าทุกวัน เป็นเวลา 7 วัน โดยบันทึกในเวลาเดียวกันทุกวัน และนำผลที่วัดได้ไปวิเคราะห์หาค่าทางสถิติ วิธีการทดลองแสดงในรูปที่ 7.1



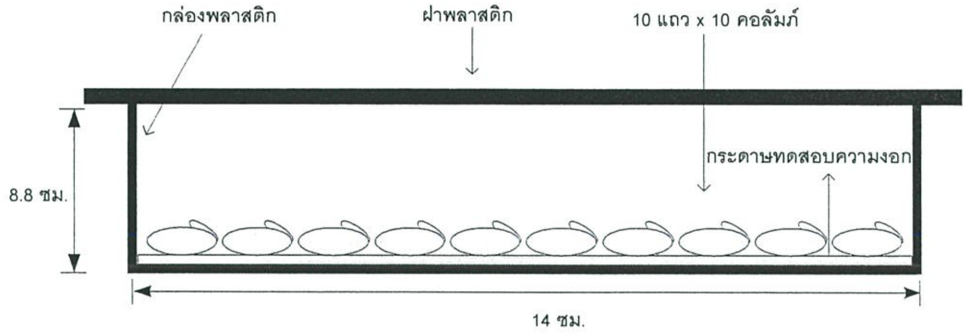
รูปที่ 7.1 ขั้นตอนการทดลอง



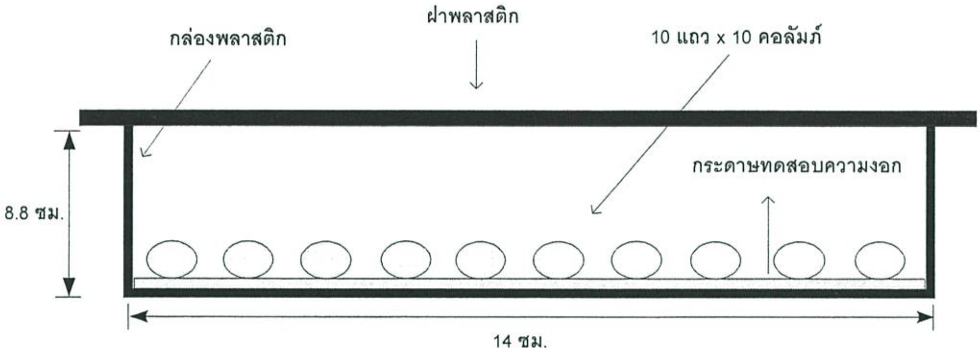
รูปที่ 7.2 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบ



(ก) การวางเมล็ดข้าว (รูปถ่าย)



(ข) การวางเมล็ดขนานสนามไฟฟ้า



(ค) การวางเมล็ดขวางกับสนามไฟฟ้า

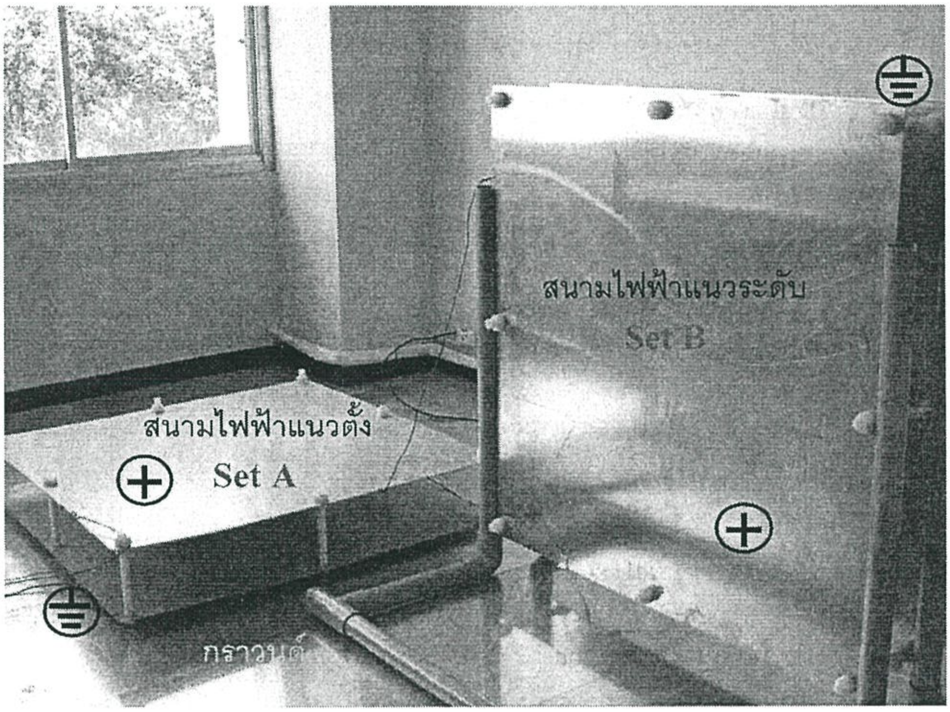
รูปที่ 7.3 รูปแบบการวางเมล็ดข้าว

7.3.2 **อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง**

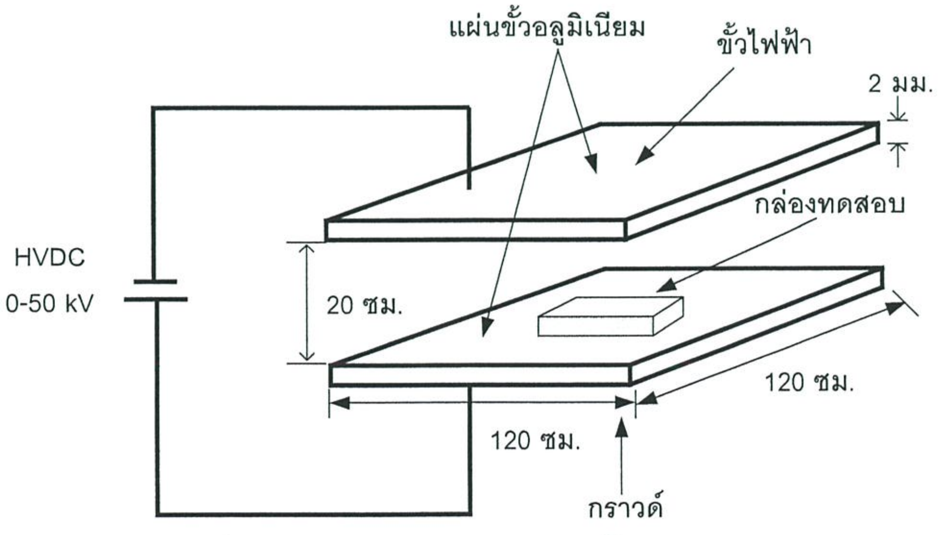
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแรงสูง มีวงจรการสร้างแบบ Voltage- double circuit โดยแรงดันอินพุตควบคุมด้วยวงจรโซลิดเสตท ส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ไดโอดสำหรับเรียงกระแส ตัวคาปาซิเตอร์สำหรับยกระดับแรงดัน และลดริปเปิลแฟคเตอร์ (Ripple factor) ฉนวนที่กั้นระหว่างอุปกรณ์เป็นแบบเรซินฉนวนแข็ง สามารถสร้างแรงดันกระแสตรงได้ 50 kV กระแส 3 mA และมีค่าริปเปิลแฟคเตอร์น้อยกว่า 3 % สามารถเลือกขั้วแรงดันใช้งานได้ทั้งแบบขั้วบวกกับกราวนด์ และขั้วแรงดันแบบลบกับกราวนด์ได้

2. ชุดอัดประจุไฟฟ้า ส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง และแผ่นระนาบอิเล็กโทรดอัดประจุ ชนิดแผ่นอลูมิเนียมแบบระนาบหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 120 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร ยึดติดด้วยแท่งพลาสติกแบบมีเกลียว สามารถปรับระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบอิเล็กโทรดได้ ในการทดสอบใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบอิ

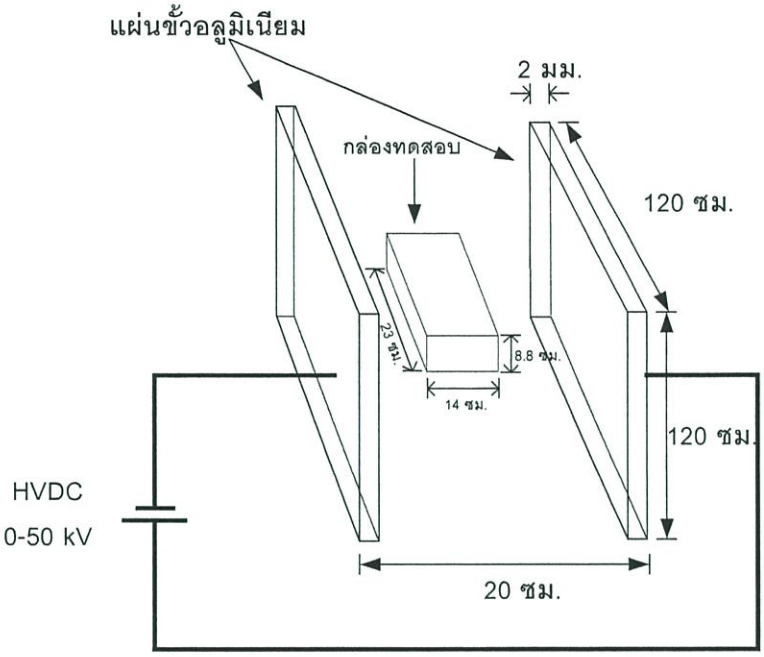
เล็กโทรด 20 เซนติเมตร โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุคือ 28.5 kV/m ซึ่งวิเคราะห์มาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบดีซี พิกัดขนาด 300 kV และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทดลองเปรียบเทียบคือ 97 kV/m และ 4 kV/m แรงดันที่ใช้ประมาณ 0-50 kV ในการทดสอบแสดงดังรูปคือ



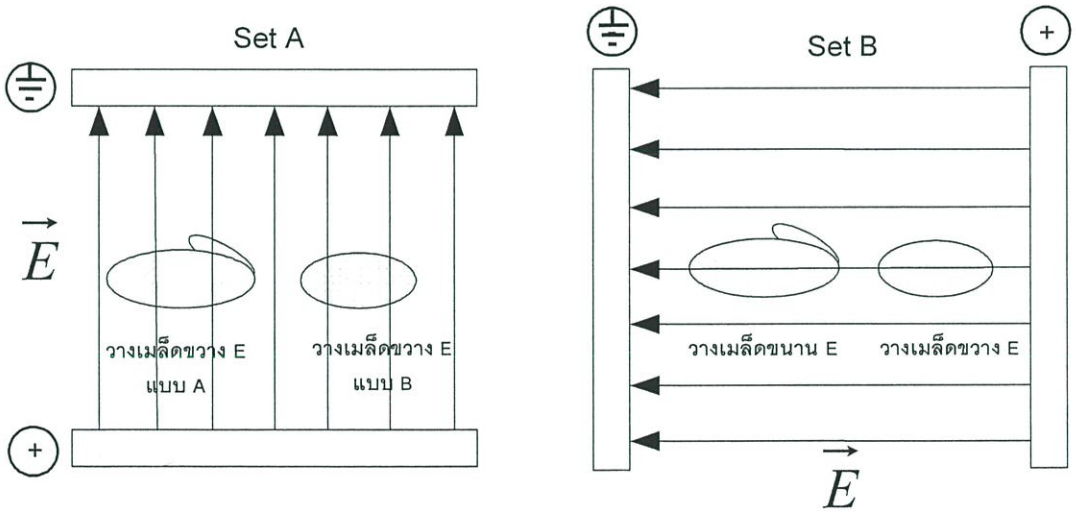
รูปที่ 7.4 ชุดอัดประจุไฟฟ้าและแหล่งจ่ายแรงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง



รูปที่ 7.5 ชุดอัดประจุสนามไฟฟ้าแนวตั้ง (Set A)



รูปที่ 7.6 ชุดอัดประจุสนามไฟฟ้าแนวระดับ (Set B)



รูปที่ 7.7 รูปภาพแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า

การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว แบ่งการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขคือ

1. ปลูกต้นข้าวโดยให้สนามไฟฟ้า ใช้ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 28.5 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี 2 แบบคือสนามแนวตั้ง (Set A) และสนามแนวระดับ (Set B) เป็นเวลา 7 วัน

1.1 สนามแนวตั้ง (Set A) จะต่อขั้วบวกกับกราวนด์ ขั้วลบต่อกับแผ่นระนาบอิเล็กโทรดด้านบน

1.2 สนามแนวระดับ (Set B) จะต่อขั้วบวกกับกราวนด์ ขั้วลบต่อกับแผ่นระนาบอิเล็กโทรดด้านซ้าย

2. ปลูกต้นข้าวโดยให้สนามไฟฟ้า ใช้ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 97 kV/m และ 4 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี คือสนามแนวตั้ง (Set A)

3. ปลูกต้นข้าวโดยไม่มีสนามไฟฟ้า

เมล็ดข้าวจะมีการวางเมล็ด 2 แบบคือ วางเมล็ดขนานสนามไฟฟ้าและขวางกับสนามไฟฟ้า ในการทดลองจะมีการทำซ้ำ 4 ครั้ง

7.4 ผลการทดลอง

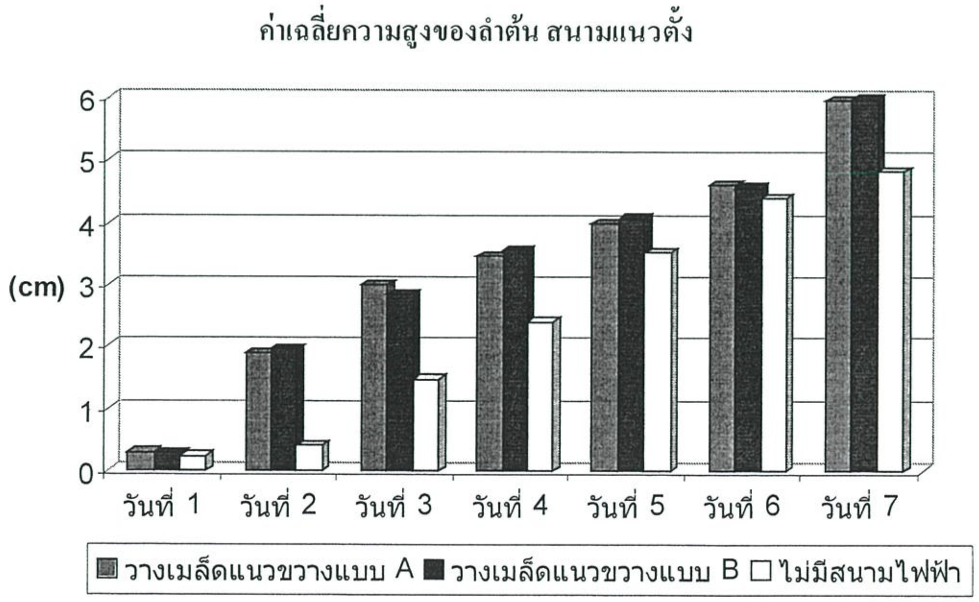
ผลการทดลองที่ได้จะมีการวัดข้อมูลดิบคือ ความสูงของลำต้น ความยาวราก แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบข้อมูล 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เพื่ออธิบายแนวโน้มของข้อมูลซึ่งประกอบด้วยตารางค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แผนภูมิ การวิเคราะห์ข้อมูลและตรวจสอบข้อมูลเชิงทดสอบสมมุติฐาน เพื่อหาค่าความเชื่อมั่นของความแตกต่างค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน

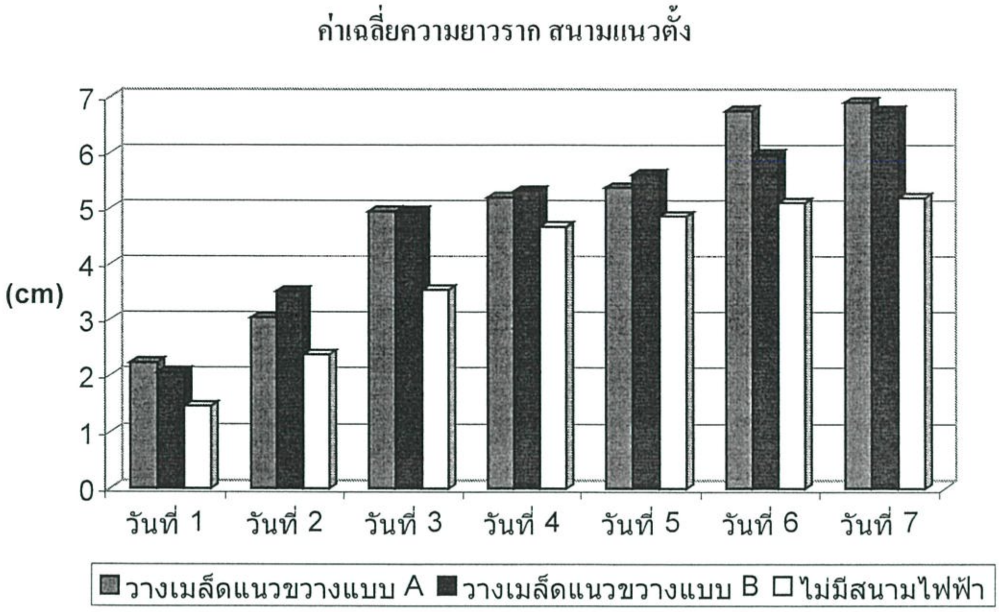
วันที่	ค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้น (ซม.)					ค่าเฉลี่ยความยาวราก (ซม.)				
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		ไม่มีสนาม	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		ไม่มีสนาม
	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง		วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง	
1	0.30	0.28	0.27	0.28	0.24	2.23	2.06	0.90	0.85	1.45
2	1.88	1.96	0.42	0.47	0.41	3.04	3.51	1.17	1.33	2.37
3	3.01	2.85	1.48	1.52	1.47	4.95	4.95	2.65	2.71	3.54
4	3.47	3.56	3.55	3.28	2.39	5.21	5.32	4.90	4.75	4.67
5	3.98	4.07	4.47	4.30	3.52	5.38	5.62	4.94	4.93	4.86
6	4.60	4.56	4.76	4.59	4.39	6.76	5.98	5.49	5.15	5.11
7	5.96	5.98	5.69	5.70	4.82	6.91	6.76	6.89	6.81	5.19

ตารางที่ 7.2 การเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงของลำต้น และความยาวราก ของต้นข้าวทั้ง 7 วัน

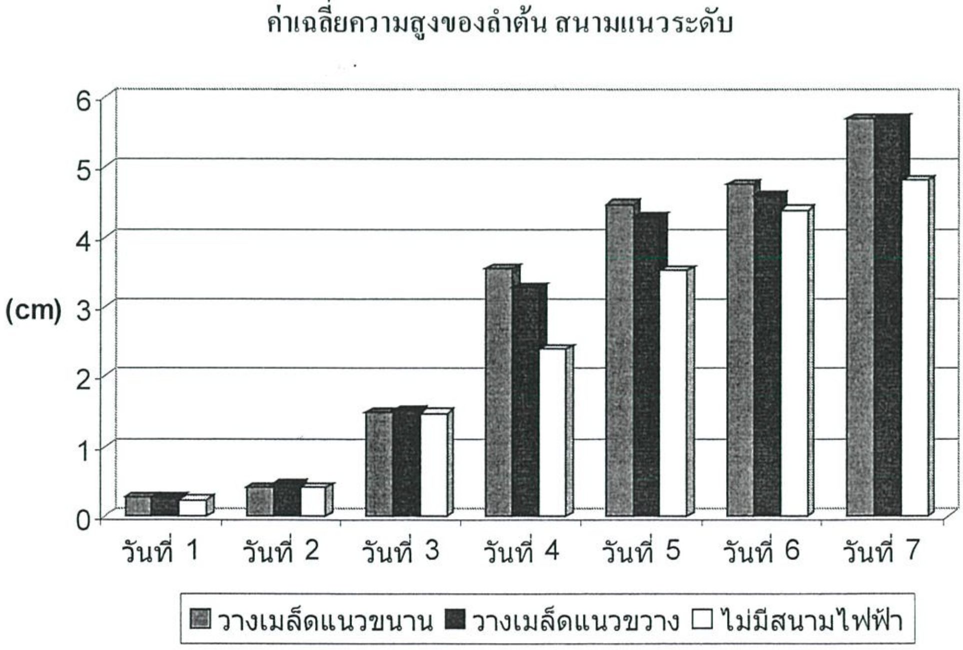
วันที่	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความสูงของลำต้น (ซม.)					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความยาวราก (ซม.)				
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		ไม่มีสนาม	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		ไม่มีสนาม
	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง		วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง	
1	0.28	0.19	0.07	0.07	0.13	0.93	0.53	0.47	0.37	0.45
2	0.71	0.54	0.10	0.23	0.41	1.29	1.59	0.40	0.44	0.66
3	1.03	0.79	0.30	0.32	0.76	1.91	1.59	0.61	0.71	1.30
4	1.09	1.14	0.75	0.77	0.94	2.26	2.04	0.98	1.24	1.07
5	1.06	1.17	1.11	1.15	1.49	2.18	2.35	1.71	1.51	1.47
6	1.32	1.28	1.08	1.07	1.05	2.66	2.29	1.22	1.32	1.65
7	1.66	1.52	0.78	0.79	1.16	2.20	2.16	1.04	0.90	1.46



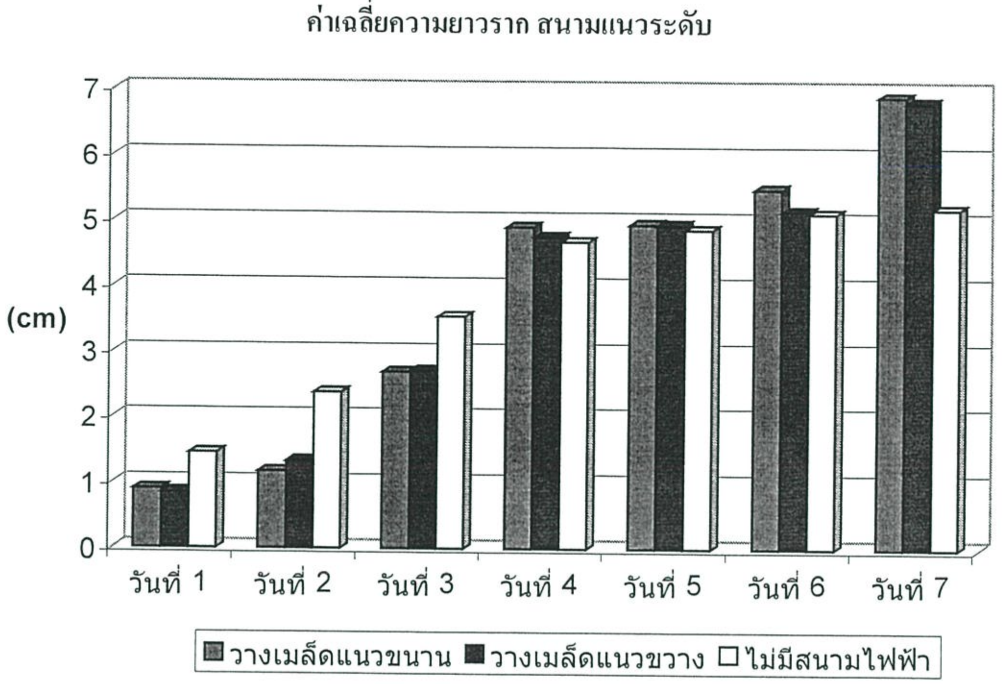
รูปที่ 7.8 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



รูปที่ 7.9 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



รูปที่ 7.10 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



รูปที่ 7.11 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 7.3 การทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า

วันที่	ค่า Z ความสูงของลำต้น				ค่า Z ความยาวราก			
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ	
	วาง เมล็ด ขวาง A	วาง เมล็ด ขวาง B	วาง เมล็ด ขนาน	วาง เมล็ด ขวาง	วาง เมล็ด ขวาง A	วาง เมล็ด ขวาง B	วาง เมล็ด ขนาน	วาง เมล็ด ขวาง
1	4.08	3.16	4.22	5.57	15.15	17.54	-16.99	-20.65
2	35.80	45.23	0.32	2.40	9.23	13.20	-31.23	-26.22
3	24.06	25.15	0.15	1.12	12.28	13.72	-11.86	-11.22
4	14.99	15.76	19.27	14.61	4.29	5.60	3.16	0.97
5	5.05	5.82	10.24	8.31	4.00	5.47	0.71	0.66
6	2.49	2.04	4.92	2.68	10.57	6.19	3.71	0.38
7	11.21	12.09	12.37	12.45	13.02	12.00	18.95	18.88

7.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 7.4 การพิจารณาค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

วันที่	ค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้น (ซม.)					ค่าเฉลี่ยความยาวราก (ซม.)				
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		ไม่มีสนาม	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		ไม่มีสนาม
	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง		วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง	
1	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
2	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
3	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
4	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
5	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
6	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
7	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#

หมายเหตุ : เครื่องหมาย # หมายถึงกลุ่มที่ได้รับการเปรียบเทียบ

1. กรณีพิจารณาค่าเฉลี่ยสนามแนวตั้ง

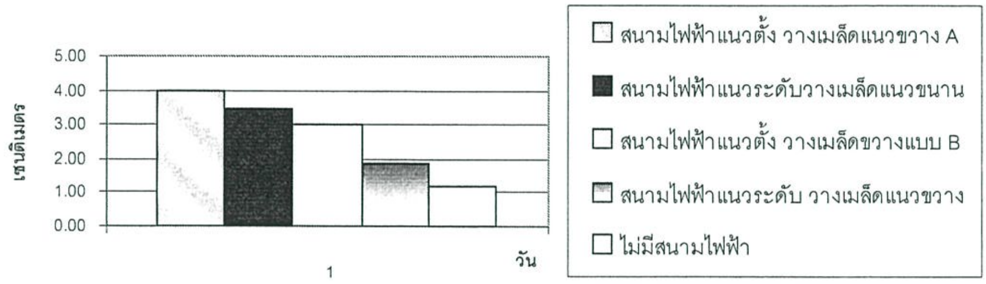
ตารางที่ 7.1 และรูปที่ 7.8 และ 7.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ในกรณีสนามแนวตั้ง พบว่าค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวรากของกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้าตลอดทั้ง 7 วัน การวางเมล็ดขวางสนามไฟฟ้าและขนานกับสนามไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวรากมีค่าใกล้เคียงกัน

2. กรณีพิจารณาค่าเฉลี่ยสนามแนวระดับ

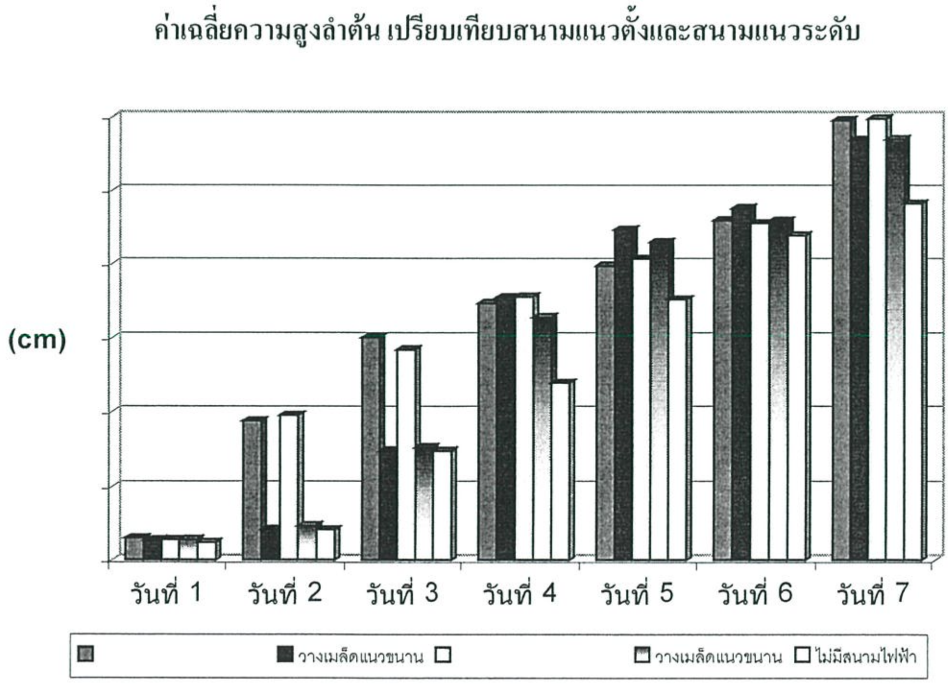
ตารางที่ 7.1 และรูปที่ 7.10 และ 7.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้าในกรณีสนามแนวระดับ พบว่าค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า ในช่วง 3 วันแรกมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ส่วนวันที่ 4-7 มีค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ค่าเฉลี่ยความยาวรากในช่วงวันที่ 1-3 กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าจะมีค่าเฉลี่ยความยาวรากต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ส่วนวันที่ 4-7 กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ามี

ค่าเฉลี่ยความยาวรากสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า การวางเมล็ดขวางสนามไฟฟ้าและขนานกับสนามไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวรากมีค่าใกล้เคียงกัน

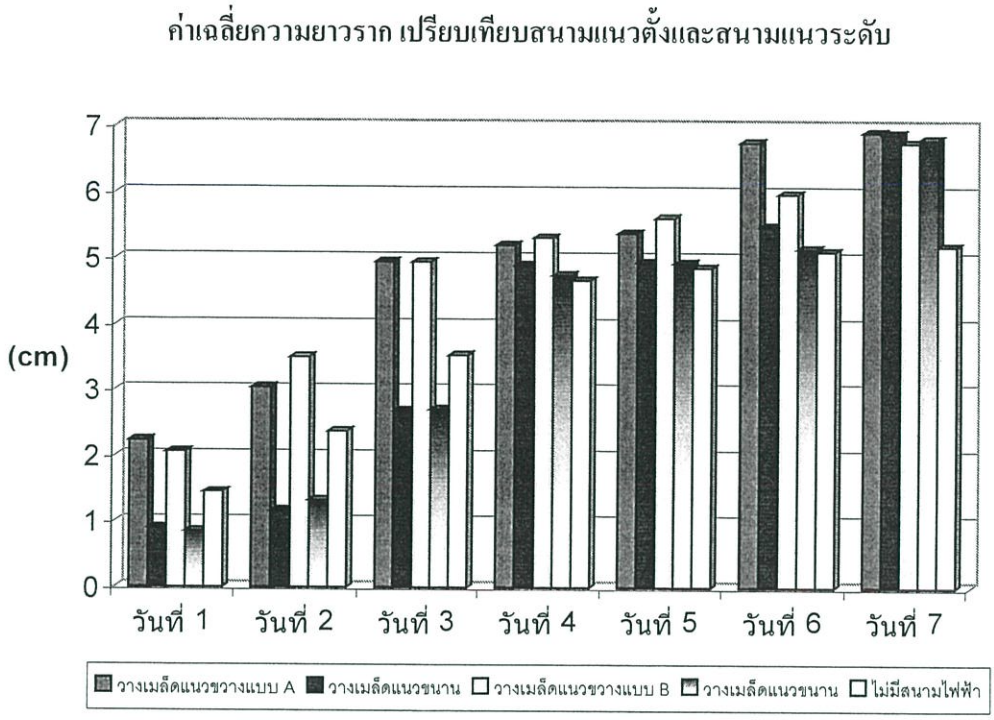
3. กรณีพิจารณาค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบกรณีได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งและสนามไฟฟ้าแนวระดับ รูปที่ 7.12 จะอธิบายถึงค่าของแท่งกราฟในวันแรก หรือข้อมูลชุดแรก



รูปที่ 7.12 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 1 วัน โดยแสดงความหมายของข้อมูลแท่งกราฟของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง สนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



รูปที่ 7.13 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง สนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



รูปที่ 7.14 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง สนามไฟฟ้าแนวระดับ และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 7.1 รูปที่ 7.13 และรูปที่ 7.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบในกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า คือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งกับกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ พบว่าค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวรากของกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าทั้งแนวตั้งและแนวระดับ มีค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นใกล้เคียงกันทั้ง 7 วัน แต่ค่าเฉลี่ยความความยาวรากกลุ่มที่ได้รับสนามแนวตั้งจะมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับสนามแนวระดับ หรือสนามแนวตั้งมีผลกระทบทางบวก คือทำให้ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า สนามแนวระดับมีผลกระทบทางลบ คือทำให้ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า โดยเฉพาะความยาวรากจะเห็นได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 7.5 การพิจารณาค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับ 28.5 kV/m สนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

วันที่	ค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้น (ซม.)				ค่าเฉลี่ยความยาวราก (ซม.)			
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ	
	วาง เมล็ด ขวาง A	วาง เมล็ด ขวาง B	วาง เมล็ด ขนาน	วาง เมล็ด ขวาง	วาง เมล็ด ขวาง A	วาง เมล็ด ขวาง B	วาง เมล็ด ขนาน	วาง เมล็ด ขวาง
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕	✕
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕	✕
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕	✕
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ : เครื่องหมาย ✓ หมายถึงกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า
เครื่องหมาย ✕ หมายถึงกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

4. การเปรียบเทียบจากการทดสอบสมมุติฐาน โดยพิจารณาความแตกต่างของค่าเฉลี่ย เราจะกำหนดการตั้งสมมุติฐานดังนี้

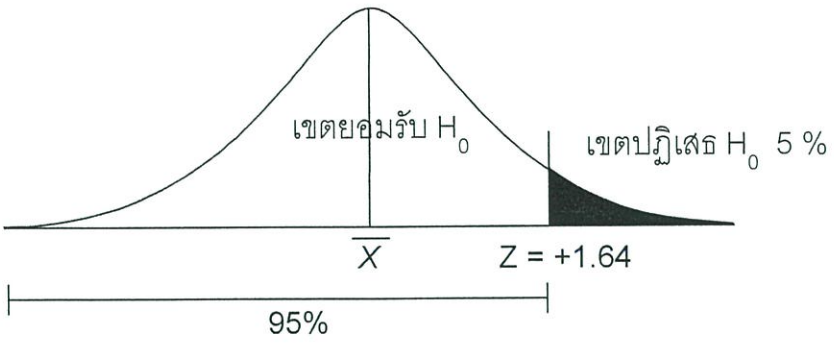
สมมุติฐานกลาง (H_0) คือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าเท่ากับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เขียนเป็นสัญลักษณ์คือ H_0 : $\mu_1 = \mu_2$

สมมุติฐานทางเลือก (H_1) คือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เขียนเป็นสัญลักษณ์คือ H_1 : $\mu_1 > \mu_2$

โดยที่ μ_1 คือค่าค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าว(ประชากร)ที่ได้รับสนามไฟฟ้า

โดยที่ μ_2 คือค่าค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าว(ประชากร)ที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

กำหนดระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติ α = .05 เขตวิกฤต จากตาราง $Z_{.05} = 1.64$



รูปที่ 7.15 ช่วงของการยอมรับและช่วงของการปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0)

การสรุปผลจากสถิติทดสอบ ในการสรุปผลการทดสอบความมีนัยสำคัญเมื่อคำนวณค่า Z ได้แล้ว (ซึ่งเรียกว่า ค่าสถิติที่ทดสอบที่คำนวณได้) ให้นำไปเปรียบเทียบกับค่าสถิติทดสอบตามที่ตั้งไว้ (ซึ่งเรียกว่าค่าสถิติทดสอบจากตาราง) ถ้าสถิติทดสอบที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าสถิติทดสอบจากตาราง แสดงว่าค่าสถิติทดสอบนั้นตกอยู่ในช่วงที่ต้องปฏิเสธสมมุติฐานกลางด้วยระดับความมีนัยสำคัญ α ถ้าสถิติทดสอบที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าสถิติทดสอบจากตารางแสดงว่าค่าสถิติทดสอบตกอยู่ในช่วงที่ต้องคงสมมุติฐานกลาง

ตารางที่ 7.6 การพิจารณาการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบกลุ่มที่มีสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า

วันที่	ค่า Z ความสูงของลำต้น				ค่า Z ความยาวราก			
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ	
	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง
1	#	#	#	#	#	#	#	#
2	#	#	#	#	#	#	#	#
3	#	#	#	#	#	#	#	#
4	#	#	#	#	#	#	#	#
5	#	#	#	#	#	#	#	#
6	#	#	#	#	#	#	#	#
7	#	#	#	#	#	#	#	#

หมายเหตุ : เครื่องหมาย # หมายถึงกลุ่มที่ได้รับการเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 7.7 การพิจารณาการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบกลุ่มที่มีสนามไฟฟ้ากับกลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า

วันที่	ค่า Z ความสูงของลำต้น				ค่า Z ความยาวราก			
	สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ		สนามแนวตั้ง		สนามแนวระดับ	
	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง	วางเมล็ดขวาง A	วางเมล็ดขวาง B	วางเมล็ดขนาน	วางเมล็ดขวาง
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕	✕
2	✓	✓	✕	✓	✓	✓	✕	✕
3	✓	✓	✕	✕	✓	✓	✕	✕
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕	✕
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ : เครื่องหมาย ✓ หมายถึงกลุ่มที่มีค่า Z สูงกว่าค่าสมมติฐานกลาง
เครื่องหมาย ✕ หมายถึงกลุ่มที่มีค่า Z ต่ำกว่าค่าสมมติฐานกลาง

จากตารางที่ 7.3 และ 7.7 แสดงค่าการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย (ค่า Z) ความสูงของลำต้น และความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วันโดยเปรียบเทียบ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่มีสนามไฟฟ้า

กรณีสนามแนวตั้ง ค่าการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย หรือค่า Z มีค่าสูงกว่าสมมุติฐานกลาง (H_0) ทั้งค่าความสูงของลำต้นและความยาวราก ทั้ง 7 วัน แสดงว่าต้องปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0) ยอมรับสมมุติฐานทางเลือก (H_1)หรือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามฟ้า มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ที่ระดับความมีนัยสำคัญ .05

กรณีสนามแนวระดับ ค่าการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย หรือค่า Z มีค่าสูงกว่าสมมุติฐานกลาง (H_0) คือค่าความสูงของลำต้น ในวันที่ 1, 4, 5, 6, 7 และวันที่ 2 กรณีวางเมล็ดขนานกับสนามไฟฟ้า ความยาวราก ในวันที่ 7 วันที่ 4 กรณีวางเมล็ดขวางสนามไฟฟ้า และวันที่ 6 กรณีวางเมล็ดขวางสนามไฟฟ้า แสดงว่าต้องปฏิเสธสมมุติฐานกลาง (H_0) ยอมรับสมมุติฐานทางเลือก (H_1) หรือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามฟ้า มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนาม

ไฟฟ้า ที่ระดับความมีนัยสำคัญ .05 ค่าการทดสอบสมมุติฐานค่าเฉลี่ย หรือค่า Z มีค่าต่ำกว่าสมมุติฐานกลาง (H_0) คือค่าความสูงของลำต้น ในวันที่ 2, 3 และวันที่ 2 กรณีวางเมล็ดขวางสนามไฟฟ้า ความยาวราก ในวันที่ 1, 2, 3, 5, 6 วันที่ 4 กรณีวางเมล็ดขนานกับสนามไฟฟ้า และวันที่ 6 กรณีวางเมล็ดขนานกับสนามไฟฟ้า แสดงว่าต้องยอมรับสมมุติฐานกลาง (H_0) ปฏิเสธสมมุติฐานทางเลือก (H_1)หรือค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามฟ้า มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ที่ระดับความมีนัยสำคัญ .05

บทที่ 8
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว มีการทดลองเปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าโดยขนาดของสนามไฟฟ้าคือ 28.5 kV/m จำลองมาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง พิกัด 300 kV ที่ระยะต่ำที่สุดของสายเทียบกับพื้นดินคือ 8.5 เมตร และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบลักษณะของสนามไฟฟ้า 2 แบบ คือสนามไฟฟ้าแนวตั้งและสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการเปรียบเทียบการวางเมล็ดข้าว 2 แบบคือ วางเมล็ดแนวขนานและวางเมล็ดแนวขวางกับสนามไฟฟ้า การทดลองใช้แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดอิเล็กโทรด โดยใช้อลูมิเนียมระนาบหนา 2 มิลลิเมตร ขนาด 1.2 x 1.2 เมตร มีการนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์มาช่วยวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด และการกระจายของแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรด โดยใช้โปรแกรม ANSYS สามารถสรุปผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนได้ ดังนี้

8.1.1 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

ในส่วนของการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม ANSYS นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าและแรงดันที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดที่ใช้แผ่นระนาบอิเล็กโทรด และการกระจายสนามไฟฟ้าในเมล็ดข้าวแบบ 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด และการกระจายของแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรด ซึ่งวางกล่องทดสอบไว้บริเวณกลางแผ่นระนาบอิเล็กโทรด พบว่าสนามไฟฟ้าในบริเวณแผ่นระนาบอิเล็กโทรดมีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่บริเวณด้านขอบของอิเล็กโทรดหรือแผ่นระนาบอิเล็กโทรด มีการโค้งของสนามไฟฟ้า การกระจายสนามไฟฟ้าที่เมล็ดข้าว ผลการจำลองที่ได้คือ สนามไฟฟ้าในบริเวณเมล็ดข้าวจะมีค่าระหว่าง 12,063 ถึง 12,314 V/m ซึ่งน้อยกว่าสนามไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางอากาศหรือบริเวณระหว่างเพลสอลูมิเนียมซึ่งมีค่าระหว่าง 26,771 ถึง 29,562 V/m ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงบริเวณปลายด้านนอกทั้งสองข้าง และค่อยๆลดลงไปจนถึงบริเวณกลางเมล็ด ซึ่งการงอกของเมล็ดข้าวจะงอกจากด้านปลายเมล็ด การที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณปลายเมล็ดทั้งสองด้านอาจไปกระตุ้นให้ต้นข้าวเจริญเติบโตได้ดี จากการดูการกระจายของแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดนั้นพบว่า เมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า สนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ตามระดับแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรด

8.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเจริญเติบโตเปรียบเทียบทางสถิติ

การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว แบ่งการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขคือ

1. ปลูกต้นข้าวโดยให้สนามไฟฟ้า ใช้ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 28.5 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี 2 แบบคือสนามแนวตั้ง (Set A) และสนามแนวระดับ (Set B) เป็นเวลาต่อเนื่อง 7 วัน

   1.1 สนามแนวตั้ง (Set A) จะต่อขั้วบวกกับกราวนด์ ขั้วลบต่อกับแผ่นระนาบอิเล็กโทรดด้านบน

   1.2 สนามแนวระดับ (Set B) จะต่อขั้วบวกกับกราวนด์ ขั้วลบต่อกับแผ่นระนาบอิเล็กโทรดด้านซ้าย

2. ปลูกต้นข้าวโดยให้สนามไฟฟ้า ใช้ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 97 kV/m และ 4 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี คือสนามแนวตั้ง (Set A)

3. ปลูกต้นข้าวโดยไม่มีสนามไฟฟ้า

เมล็ดข้าวจะมีการวางเมล็ด 2 แบบคือ วางเมล็ดขนานสนามไฟฟ้าและขวางกับสนามไฟฟ้า ในการทดลองจะมีการทำซ้ำ 4 ครั้ง

ผลการทดลองที่ได้จะมีการวัดข้อมูลดิบคือ ความสูงของลำต้น ความยาวราก แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบข้อมูล 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้า และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เพื่ออธิบายแนวโน้มของข้อมูลซึ่งประกอบด้วยตารางค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แผนภูมิ การวิเคราะห์ข้อมูลและตรวจสอบข้อมูลเชิงทดสอบสมมุติฐาน เพื่อหาค่าความเชื่อมั่นของความแตกต่างค่าเฉลี่ย จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสามารถสรุปได้ในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 การพิจารณาค่าเฉลี่ยทั้ง 7 วัน ความสูงของลำต้นและความยาวราก เปรียบเทียบกัน 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าและกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

เงื่อนไข	ค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้น	ค่าเฉลี่ยความยาวราก	ตารางที่
สนามไฟฟ้าแนวตั้ง	สูงกว่ากลุ่มไม่มีสนามไฟฟ้า 24.5%	สูงกว่ากลุ่มไม่มีสนามไฟฟ้า 27.4%	7.1
สนามไฟฟ้าแนวระดับ	สูงกว่ากลุ่มไม่มีสนามไฟฟ้า 15.5%	สูงกว่ากลุ่มไม่มีสนามไฟฟ้า 0.26%	7.1
ไม่มีสนามไฟฟ้า	ต่ำกว่ากลุ่มมีสนามไฟฟ้า 21.5%	ต่ำกว่ากลุ่มมีสนามไฟฟ้า 13.5%	7.1

หมายเหตุ: การคำนวณค่าเปอร์เซนต์ตารางที่ 8.1 ใช้สูตรคือ % = $\frac{\overline{X}_{E-field} - \overline{X}_{withoutE-field}}{\overline{X}_{withoutE-field}} \times 100$

8.1.3 ผลกระทบจากแนวของสนามไฟฟ้า

การปลูกต้นข้าวโดยให้สนามไฟฟ้า ใช้ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 28.5 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับต้นข้าวมี 2 แบบคือสนามแนวตั้ง (Set A) และสนามแนวระดับ (Set B) เป็นเวลาต่อเนื่อง 7 วัน พบว่าสนามแนวตั้งมีผลกระทบทางบวก คือช่วยทำให้ต้นข้าวมีการเจริญเติบโตสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ส่วนสนามไฟฟ้าแนวระดับมีผลทางลบคืออาจทำให้ต้นข้าวมีการเจริญเติบโตต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ในช่วงเวลา 3 วันแรก โดยเฉพาะความยาวรากจะเห็นได้อย่างชัดเจน เพราะบริเวณนี้เป็นเนื้อเยื่ออ่อน แต่โดยสรุปแล้วสนามไฟฟ้ามีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะ 7 วันที่ทำการทดลอง

8.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นเพียงการการศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของเมืองไทย โดยใช้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งวิเคราะห์ได้จากสนามไฟฟ้าที่มีแหล่งเกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV คือ 28.5 kV/m จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากลุ่มต้นข้าวทดลองที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้งจะมีค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า ซึ่งจากผลกระทบเชิงบวกดังนี้อาจสามารถนำไปพัฒนาต่อไป คือนำไปประยุกต์ใช้กับงานเกษตรกรรมเพื่อลดระยะเวลาในการปลูก และเพิ่มปริมาณผลผลิตข้าว ส่วนสนามไฟฟ้าแนวระดับนั้นมีผลทางลบคือค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้าในช่วง 3 วันแรก ซึ่งอาจนำไปใช้ในการดัดหรือเปลี่ยนทิศทางต้นพืช ที่มีมูลค่าสูงในเชิงพาณิชย์ต่อไป แต่อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มว่าต้นข้าวกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าสูงมากยิ่งขึ้นจะมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า จึงมีแนวโน้มว่าน่าจะมีผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตอื่นด้วย จึงควรระมัดระวังในการใช้หรือได้รับสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] สืบพงศ์ สุวรรณกูฏ. 2544. “การวิเคราะห์การโฟลว์ของโหลดและฮาร์มอนิกในสถานะอยู่ตัวของ ระบบเอซี-ดีซี” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 155-169

[2] LaMacchina, D. April 1992. **Study of biological effect of electromagnetic radiation inconclusive.**

[3] Verkasako, P., Pukkala, E. 1993. **Risk of cancer in finish children living close to powers line.** British Madical Jounal.

[4] Scherer, W. March 1994. **Biological effects of radio wave transmission.**

[5] Dayal, S., Singh, R. P. 1986. **Effect of seed exposure to magnetic filed on the height of tomato plants.** Indian Journal of Agricultural Sciences.

[6] Muraji, M., Nishimura, M., Tatebe, W., and Fujit, T. “Effect of alternating magnetic field on the growth of the primary root of corn.” **IEEE Transactions on Magnetics.**, Volume: 28 , Issue: 4 , July 1992. pp. 1996-2000

[7] ร่มฉัตร ยูรประถม. 2540. “ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีต่อการเจริญเติบโตของเมล็ด ถั่วเขียว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[8] P.Kerdonfag, C.Klinsa-ard, W.Khan-ngern and S.Kethaew. 24-27 July, 2002. “Effect of Electric Field Rice Grain Separation Unit on Growth States of the Rice Plant.” pp. 250-253. **International Conference on Electromagnetic Compatibility 2002 1st ICEMC 2002**, Bangkok : Thailand.

[9] Donald W. Zipse. “Health effects of extremely low-frequency (50- and 60- Hz) electric and magnetic fields.” **IEEE Transactions on Industry Applications.**, Volume: 29 , Issue: 2 , March-April 1993. pp. 447-458

[10] พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. 2545. “การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดิน และกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 5-6.

[11] สุรัตน์ นันตะสุคนธ์. **ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม 1**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). หน้า 148-149.

[12] นุชิต ทิพย์เจริญ, พิทักษ์ ปิ่นอนงค์, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล 2546, "การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าระหว่างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับบริเวณใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง.", หน้า 180-185. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26**. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[13] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2538. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า119-190

[14] ผศ.ประภากร สุวรรณะ. Electronics engineering 1. เอกสารการสอนวิชาเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[15] ยุทธนา ใหม่ทา, ทนงศักดิ บัวงาม, ชวลิต แก้วบุญเรือง. 2544. "แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันสูงขนาด 50 kV 3 mA แบบฉนวนแข็ง." ปริญญานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

[16] Matehew N.O. Sadiku. "A sample introduction to finite element analysis of electromagnetic problems." IEEE Trans. Educ., vol.32, 1989. pp. 85-93

[17] จักรพงษ์ กลิ่นสะอาด. 2546. "เครื่องคัดเมล็ดหญ้าจากปลายข้าวโดยใช้เทคนิคสนามไฟฟ้า." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 18-28

[18] จำรัส โปร่งศิริวัฒนา. 2534. **ความรู้เรื่องข้าว.** สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวง เกษตรและสหกรณ์. หน้า 1-160

[19] สุชาฎา ประพันธ์วงศ์. 2546, 8 กันยายน. "ปริศนาข้าวไทยสายพันธุ์หายไปไหน." **มติชนรายวัน**. หน้า 17

[20] http://www.riceweb.org/Index.htm

[21] อุทุมพร (ทองอุไทย) จามรมาน. 2535. **ไคสแควร์** = Chi-Square : **การทดสอบทางสถิติ**. กรุงเทพฯ : ฟันนี่พับบลิชชิ่ง. หน้า 1-12

[22] S.S. Stevens. 1970. Measurement statistics and the schemapiric view. Readings in statistics edited by Heermann E. and Braskamp. L. p. 71

[23] ผศ.นิภา เมธธาวีชัย. 2542. **สถิติเพื่อการวิจัย.** กรุงเทพฯ : สถาบันราชภัฏธนบุรี. หน้า 87-92

[24] ผศ.วิสาข์ เกษประทุม. 2538. **ความน่าจะเป็นและสถิติเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : พัฒนาศึกษา. หน้า 219-235

[25] อัจฉรีย์ จันทลักขณา. 2541. **หลักสถิติเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 131-132

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มเติม

ภาคผนวก ข. รูปภาพการทดลอง

ภาคผนวก ค. ข้อมูลระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงพิกัด 300 kV

ภาคผนวก ง. แสดงค่าสนามไฟฟ้าในเมล็ดข้าวในแต่ละ Node

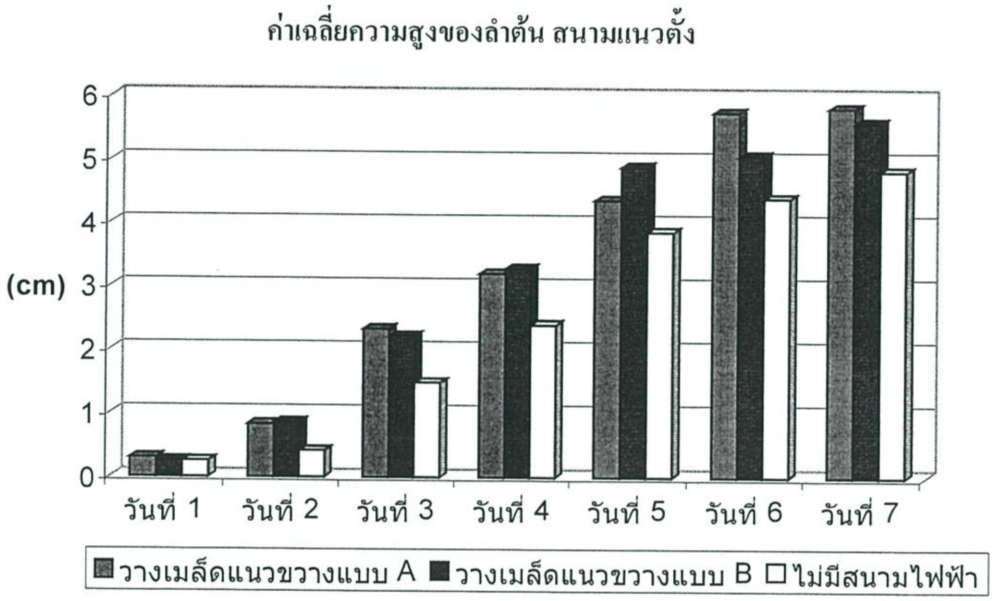
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับตีพิมพ์

ภาคผนวก ก.
การทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มเติม

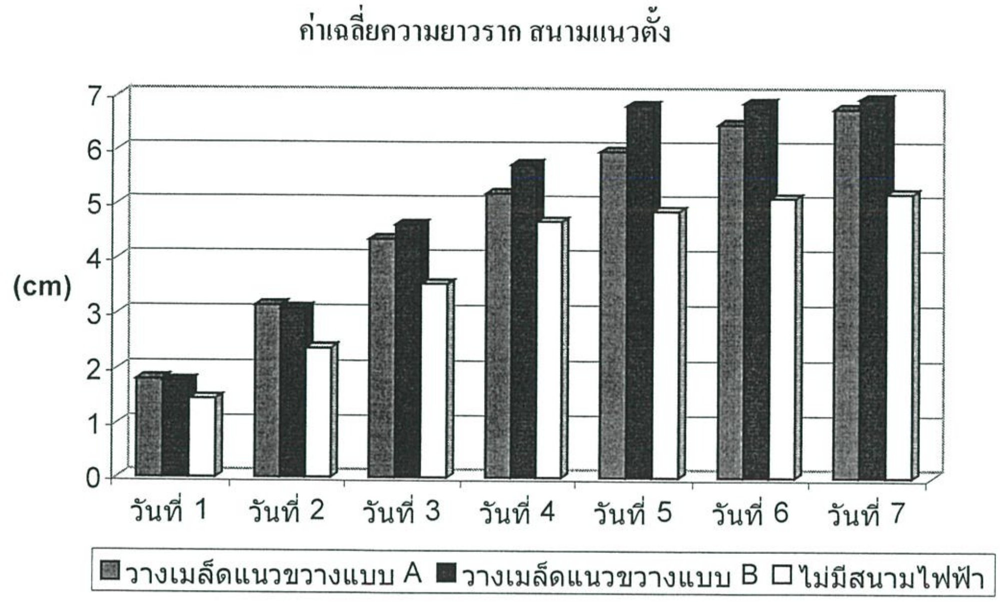
การทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มเติม

ค่าทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มเติมคือ

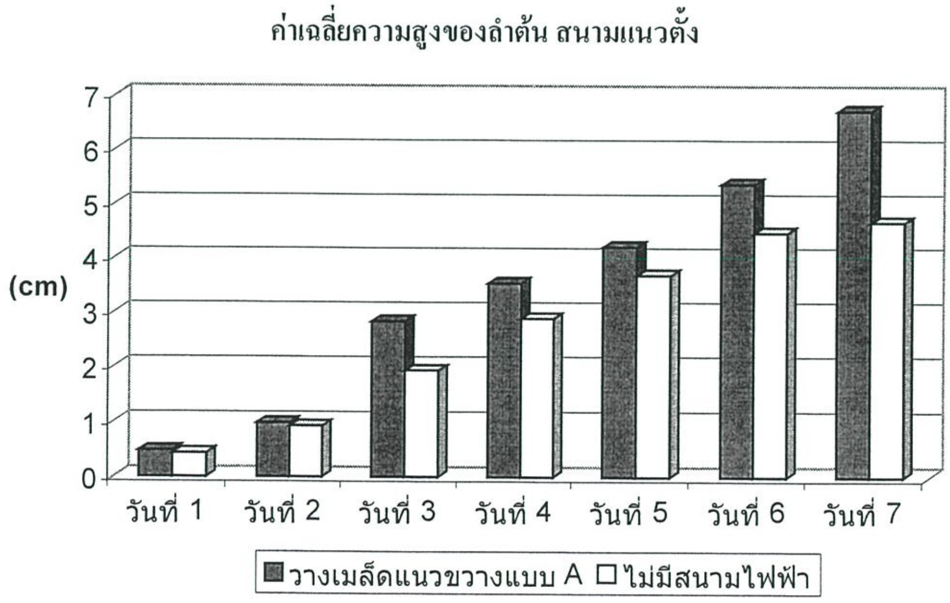
1. ปลูกต้นข้าวโดยมีค่าสนามไฟฟ้าคือ 97 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าคือสนามแนวตั้ง และมีการวางเมล็ดแนวขวางแบบ A และแนวขวางแบบ B
2. การปลูกต้นข้าวโดยมีค่าสนามไฟฟ้าคือ 4 kV/m แนวของสนามไฟฟ้าคือสนามแนวตั้ง และมีการวางเมล็ดแนวขวางแบบ A
3. ปลูกต้นข้าวโดยไม่มีสนามไฟฟ้า



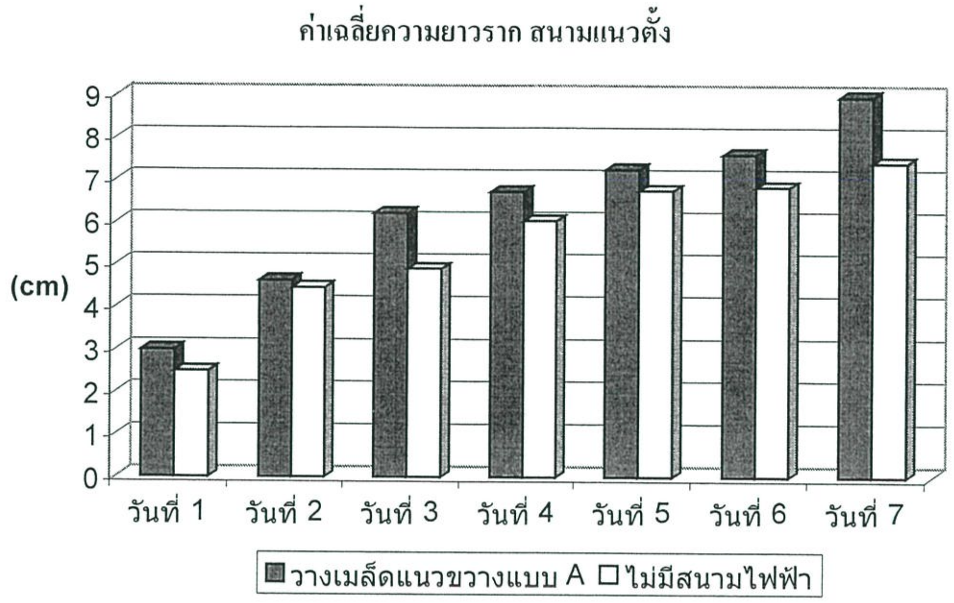
รูปที่ ก 1 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 97 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



รูปที่ ก 2 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 97 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



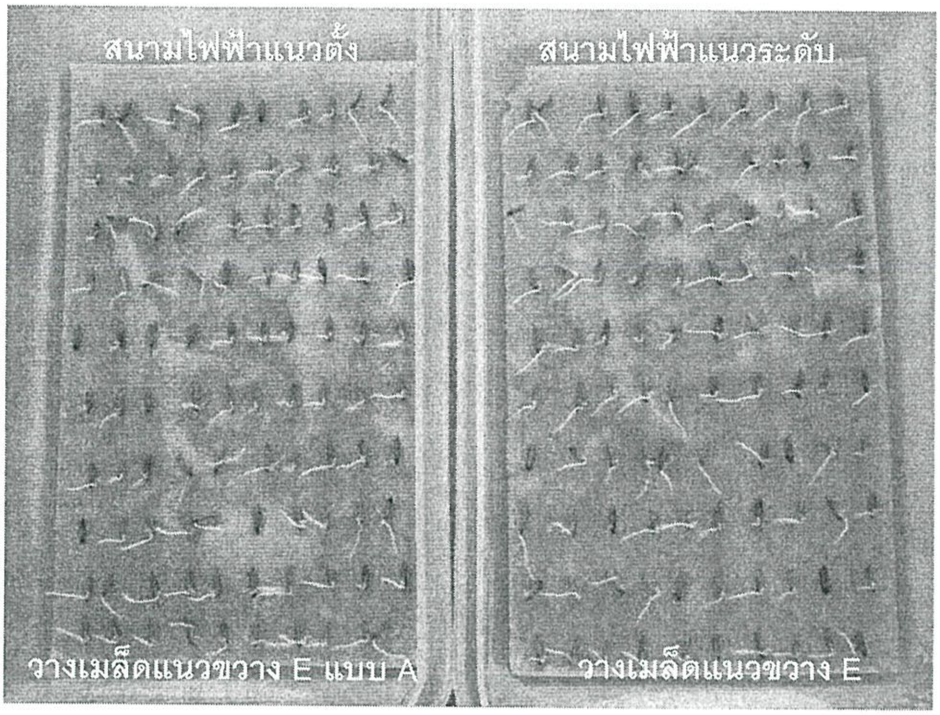
รูปที่ ก 3 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความสูงของลำต้นของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 4 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า



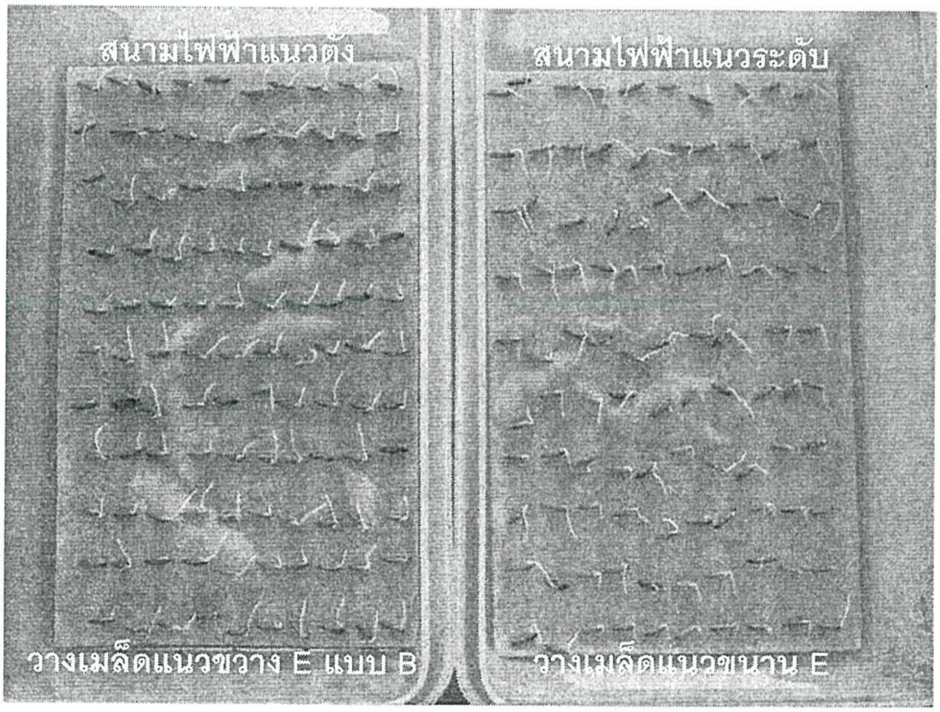
รูปที่ ก 4 แผนภูมิค่าเฉลี่ยความยาวรากของต้นข้าวทั้ง 7 วัน ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง 4 kV/m และกลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าจะมีการเจริญเติบโตดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า

ภาคผนวก ข.
รูปภาพการทดลอง



รูปที่ ก 5 แสดงการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 2 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขวาง



รูปที่ ก 6 แสดงการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 2 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขนาน

รูปที่ ก 7 แสดงการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 7 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขวาง

รูปที่ ก 8 แสดงการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นข้าววันที่ 2 ของกลุ่มทดลอง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวตั้ง และกลุ่มที่ได้รับสนามไฟฟ้าแนวระดับ มีการวางเมล็ดแนวขนาน

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงพิกัด 300 kV

EGAT-TNB 300/600 MW
HVDC INTERCONNECTION PROJECT

GENERAL DATA

1. SYSTEM VOLTAGE ± 300 kV.

2. CONDUCTOR DATA

2.1. POLE CONDUCTOR(TWO CONDUCTORS PER POLE)

DESCRIPTION	DATA	
TYPE CONDUCTOR	546 mm² ; 954 kcmil ACSR	
CODE NAME	" CARDINAL "	
NO. OF STRANDING AND DIAMETER	54X3.38 / 7X3.38	
NORMINAL DIAMETER	30.38	mm.
NORMINAL AREA OF COMPONENT		
STEEL CORE	62.81	mm²
ALUMINIUM	483.40	mm²
COMPLETE	546.20	mm²
APPROXIMATE WEIGHT	1.826	kg/m
ULTIMATE STRENGTH	15345	kg
DC. RESISTANCE AT 20° C	0.0597	ohm/km
FINAL MODULUS OF ELASTICITY	6800	kg/ mm²
COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION	$19.3X10^{-6}$	/°C

2.2. NEUTRAL CONDUCTOR

(TWO CONDUCTORS CARRIED IN SHIELDWIRE PROTECTION WITH 0° SHIELD ANGLE)

DESCRIPTION	DATA	
TYPE CONDUCTOR	298 mm² ; 477 kcmil ACSR	
CODE NAME	" HEN "	
NO. OF STRANDING AND DIAMETER	30X3.20 / 7X3.20	
NORMINAL DIAMETER	22.42	mm.
NORMINAL AREA OF COMPONENT		
STEEL CORE	56.30	mm²
ALUMINIUM	241.70	mm²

COMPLETE	298.00	mm^2
APPROXIMATE WEIGHT	1.108	kg/m
ULTIMATE STRENGTH	10442	kg
DC. RESISTANCE AT 20° C	0.1194	ohm/km
FINAL MODULUS OF ELASTICITY	7800	kg/ mm^2
COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION	$17.8X10^{-6}$	/°C

2.3. FIBER OPTIC GROUND WIRE

DESCRIPTION	DATA	
TYPE	SINGLE MODE 12 CORES	
NORMINAL DIAMETER	13.20	mm.
NORMINAL AREA OF COMPONENT		
STEEL CORE	24.10	mm^2
ALUMINIUM	66.20	mm^2
COMPLETE	90.30	mm^2
APPROXIMATE WEIGHT	0.415	kg/m
ULTIMATE STRENGTH	5900	kg
DC. RESISTANCE AT 20° C	0.44	ohm/km
FINAL MODULUS OF ELASTICITY	9000	kg/ mm^2
COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION	$16.7X10^{-6}$	/°C

3. OPTIMUM SPAN LENGTH 450 m.

4. GROUND CLEARANCE

(ÀÐÃÐµÒË´¢Í§ÊÒÃ)

8.5 METERS UNDER MAXIMUM ELECTRICAL LOAD AND AMBIENT OF 40 C CONDUCTOR MAXMUM TEMPERATURE 75 C

5. POLE SPACING

DC POLE SPACING OF 10.0 METERS MINIMUM

6. GROUNDING

INDIVIDUAL TOWER GROUNDING AND COUNTERPOISE AS NECESSARY TO LIMIT MAXIMUM FOOTING RESISTANCE TO 10 OHMS.

7. RIGHT OF WAY WIDTH 40 M.

8. ELECTRICAL EFFETS

8.1. MAXIMUM ELECTRICAL FIELD

- MAXIMUM CONDUCTOR GRADIENT 23.2 kV/m
- BENEATH CONDUCTOR 28.5 kV/m

- AT EDGE OF RIGHT OF WAY 10 kV/m

8.2. RADIO NOISE

- BENEATH CONDUCTOR 57 dB
- AT EDGE OF RIGHT OF WAY 44.6 dB

8.3. AUDIBLE NOISE

- BENEATE CONDUCTOR 34 dBA
- AT EDGE OF RIGHT OF WAY 30.6 dBA

ภาคผนวก ง.

แสดงค่าสนามไฟฟ้าในเมล็ดข้าวในแต่ละ Node

PRINT EF ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 1 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
352	-281.08	10337.	0.0000	10341.
353	-405.51	10457.	0.0000	10465.
329	-280.87	10612.	0.0000	10615.
330	-228.75	10491.	0.0000	10493.

ELEMENT= 2 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
352	-284.66	10339.	0.0000	10343.
330	-227.78	10499.	0.0000	10501.
331	-167.58	10434.	0.0000	10435.
332	-170.76	10373.	0.0000	10374.

ELEMENT= 3 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
325	-300.01	10822.	0.0000	10826.
418	-294.97	11069.	0.0000	11073.
405	38.401	11236.	0.0000	11237.
356	97.923	10868.	0.0000	10868.

ELEMENT= 4 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
418	-298.91	11062.	0.0000	11066.
409	-350.20	11355.	0.0000	11360.
389	82.057	11550.	0.0000	11550.
405	13.864	11241.	0.0000	11241.

ELEMENT= 5 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
332	-168.71	10366.	0.0000	10367.
333	-128.30	10311.	0.0000	10312.
351	-184.35	10239.	0.0000	10240.
352	-281.05	10341.	0.0000	10345.

***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 6 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
333	-126.47	10312.	0.0000	10313.
334	-66.568	10276.	0.0000	10277.
350	-91.092	10198.	0.0000	10199.
351	-184.56	10238.	0.0000	10240.

ELEMENT= 7 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
334	-66.024	10277.	0.0000	10277.

335	-0.30814	10267.	0.0000	10267.
349	-1.3484	10186.	0.0000	10186.
350	-90.806	10198.	0.0000	10199.

ELEMENT= 8 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
335	-0.25231E-01	10267.	0.0000	10267.
336	64.789	10277.	0.0000	10277.
348	86.942	10198.	0.0000	10198.
349	-0.81485	10186.	0.0000	10186.

ELEMENT= 9 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
336	65.089	10277.	0.0000	10277.
337	126.70	10309.	0.0000	10310.
347	174.24	10232.	0.0000	10234.
348	87.573	10197.	0.0000	10198.

ELEMENT= 10 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
337	127.11	10309.	0.0000	10310.
338	182.78	10369.	0.0000	10371.
346	262.64	10295.	0.0000	10298.
347	174.86	10232.	0.0000	10233.

***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 11 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
338	183.28	10369.	0.0000	10370.
339	228.09	10466.	0.0000	10468.
345	354.47	10394.	0.0000	10400.
346	263.00	10294.	0.0000	10297.

ELEMENT= 12 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
339	229.24	10465.	0.0000	10467.
340	261.75	10617.	0.0000	10620.
344	450.56	10546.	0.0000	10556.
345	353.70	10393.	0.0000	10399.

ELEMENT= 13 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
340	264.56	10617.	0.0000	10620.
341	293.10	10876.	0.0000	10880.
343	568.21	10723.	0.0000	10738.
344	447.36	10544.	0.0000	10553.

ELEMENT= 14 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
341	283.61	10874.	0.0000	10878.
421	557.81	11095.	0.0000	11109.
327	729.16	10925.	0.0000	10949.
343	567.72	10729.	0.0000	10744.

ELEMENT= 15 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
414	849.10	11183.	0.0000	11215.

327	727.31	10923.	0.0000	10947.
421	559.36	11098.	0.0000	11113.
421	559.36	11098.	0.0000	11113.

***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 16 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
341	290.55	10865.	0.0000	10869.
342	166.68	11155.	0.0000	11156.
420	462.27	11343.	0.0000	11352.
421	560.48	11087.	0.0000	11101.

ELEMENT= 17 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
420	463.22	11339.	0.0000	11348.
324	827.29	11436.	0.0000	11465.
414	830.38	11193.	0.0000	11223.
421	566.92	11094.	0.0000	11109.

ELEMENT= 18 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
413	722.42	11672.	0.0000	11694.
324	807.64	11443.	0.0000	11472.
420	466.39	11337.	0.0000	11347.
420	466.39	11337.	0.0000	11347.

ELEMENT= 19 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
342	156.57	11159.	0.0000	11160.
326	94.271	11465.	0.0000	11466.
419	348.19	11602.	0.0000	11607.
420	466.31	11340.	0.0000	11350.

ELEMENT= 20 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
419	349.80	11599.	0.0000	11605.
391	555.54	11815.	0.0000	11828.
413	715.17	11684.	0.0000	11705.
420	465.46	11336.	0.0000	11345.

***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 21 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
419	351.16	11598.	0.0000	11603.
411	237.51	11848.	0.0000	11850.
412	402.25	11961.	0.0000	11968.
391	550.20	11819.	0.0000	11832.

ELEMENT= 22 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
326	86.465	11472.	0.0000	11472.
410	65.011	11718.	0.0000	11718.

411	223.74	11829.	0.0000	11831.
419	352.24	11599.	0.0000	11604.

ELEMENT= 23 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
353	-409.36	10456.	0.0000	10464.
354	-517.36	10643.	0.0000	10656.
325	-287.24	10813.	0.0000	10817.
329	-283.91	10612.	0.0000	10616.

ELEMENT= 24 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
354	-517.95	10642.	0.0000	10655.
355	-618.02	10882.	0.0000	10900.
418	-291.98	11072.	0.0000	11076.
325	-298.30	10817.	0.0000	10821.

ELEMENT= 25 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
328	-700.76	11172.	0.0000	11194.
409	-345.52	11365.	0.0000	11370.
418	-293.67	11076.	0.0000	11080.
355	-617.91	10885.	0.0000	10903.

***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 26 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
328	-693.56	11169.	0.0000	11191.
415	-766.71	11476.	0.0000	11502.
408	-405.05	11632.	0.0000	11640.
409	-331.42	11360.	0.0000	11364.

ELEMENT= 27 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
415	-752.69	11472.	0.0000	11497.
416	-767.32	11734.	0.0000	11759.
323	-498.21	11845.	0.0000	11855.
408	-409.63	11637.	0.0000	11644.

ELEMENT= 28 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
416	-787.92	11746.	0.0000	11772.
417	-734.02	11914.	0.0000	11937.
394	-601.82	12014.	0.0000	12029.
323	-494.25	11845.	0.0000	11855.

ELEMENT= 29 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
417	-773.43	11934.	0.0000	11959.
403	-868.45	12092.	0.0000	12124.
396	-681.29	12131.	0.0000	12150.
394	-600.62	12006.	0.0000	12021.

ELEMENT= 30 PLANE121

NODE	EFX	EFY	EFZ	EFSUM
416	-788.60	11717.	0.0000	11743.

393	-946.35	11854.	0.0000	11891.
403	-1005.0	12017.	0.0000	12059.
417	-740.18	11938.	0.0000	11961.

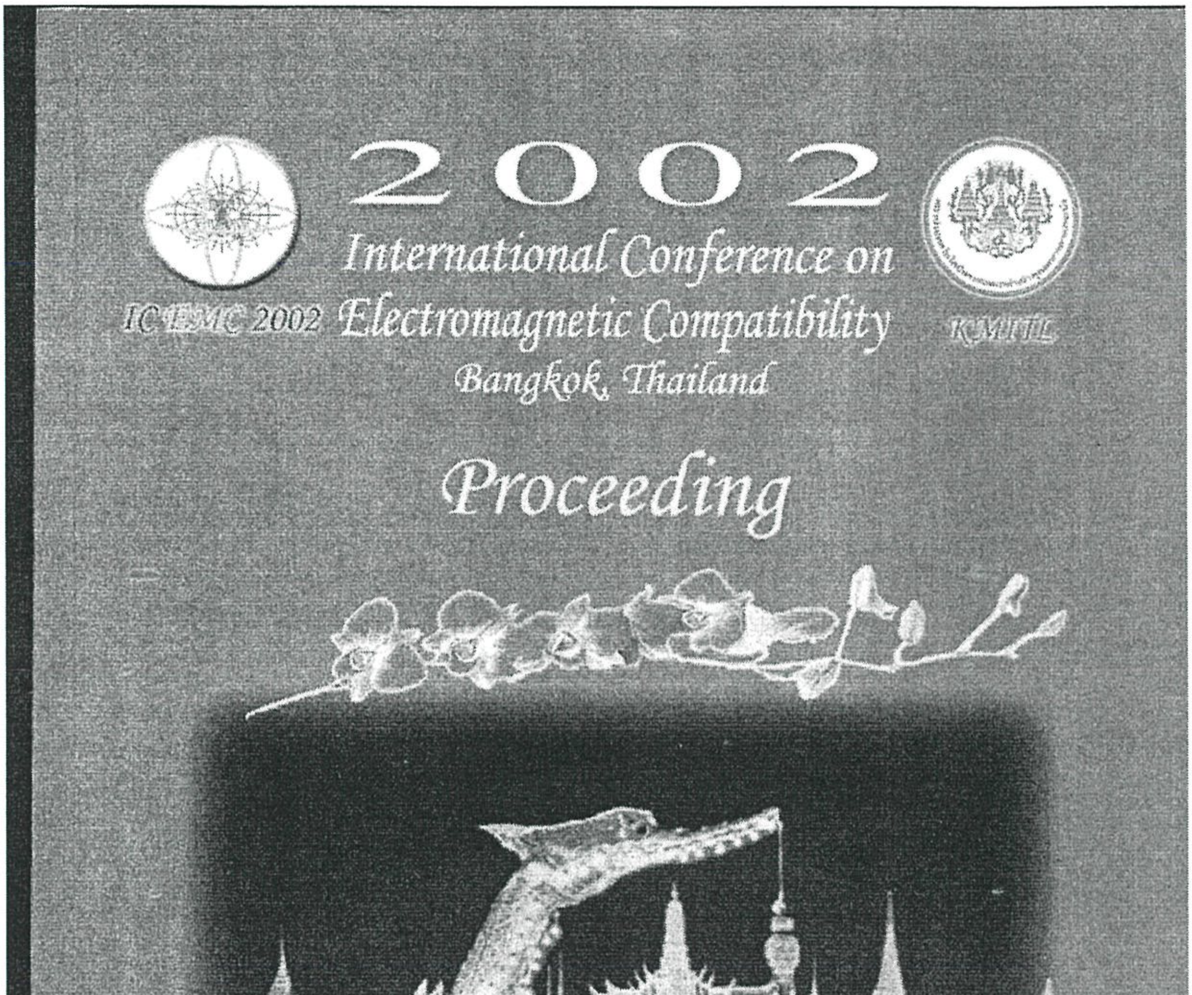
***** POST1 ELEMENT NODAL ELECTRIC FIELD LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ภาคผนวก จ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์


2002
International Conference on
Electromagnetic Compatibility
Bangkok, Thailand
Proceeding
July 24-27, 2002, The Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand
IEEE
Thailand Section
JICA
Japan International Cooperation Agency

ICEMC 2002 / Bangkok

The Effect of Electric Field to Rice Plant Growing

T. Rotcharoen* **W. Khan-ngern**** **S. Nitta*****
Research Center for Communications and Information Technology, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.
Phone +66-2737-3000 Ext. 3322, Fax +66-2737-3000 Ext. 3322
E-mail: **s3061162@kmitl.ac.th*, ***kkveerac@kmitl.ac.th*
Salesian Polytechnic, 2-35-11 Igusa Suginami, Tokyo, 167-0021, Japan
***E-mail: *nitta@cc.tuat.ac.jp*

Abstract

This paper presents the study of effect of electric field to rice plant growing. The research is focused on electric field. The comparison is done under the condition of electric field and non electric field. The rice plant is experiment under condition electric field at 193 kV/m, 4 kV/m and without electric field respectively. It is found that the rice plant growth with both electric field had growth rate and elongated radical higher than without electric field especially on the day 1-6.

Keywords: Biological effect, and electric field effect.

1. Introduction

Nowadays, the Electricity Generating Authority of Thailand has a responsibility to produce and distribute the energy via high-voltage transmission line to substation. The voltage level of high-voltage transmission line is 500 kV, 230 kV, 115 kV and so on. In this study, High Voltage Direct Current (HVDC) generator electric field is applied to 100 3 rice seeds. This is the first step to investigate the effectiveness of (High Voltage) HV in terms of AC V/m on the rice growth [1].

2. Applied E-field

Electric field strength [2] can be calculated by general equation. Equations (1)-(3) are obtained from the following equations.

$$E_{max} = \frac{U}{d\,\eta^*} \qquad (1)$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \quad 1 \qquad (2)$$

$$E_{av} = \frac{U}{d} \qquad (3)$$

U = voltage between electrodes (V)
d = distance between electrodes (m)
E_{max} = the maximum of electric field stress (V/m)
E_{av} = average value of electric field (V/m)
η^* = field utilization factor

From Eqs.(1), (2) and (3), the HVDC 30-50 kV is obtained. In this experiment, $\eta^* = 0.8$ is applied.

3. Experiments and Measurements

3.1 Experimental Apparatus

This research uses DC power supply that can vary voltage level 0-50 kV with current 10 mA at 10% ripple factor. Two aluminum plates are used as the electrodes which the distance from the bottom plate to the top plate is equal to 20 cm. Figures 1-3 show the HVDC power supply, HVDC electrodes and test diagram respectively.

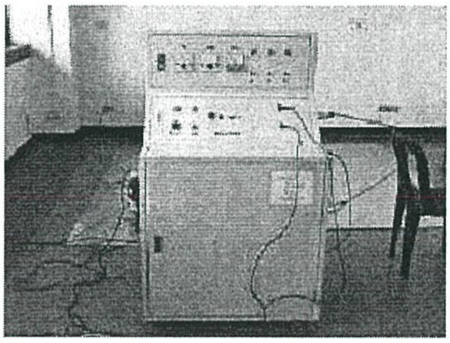


Figure 1 HVDC power supply

Figure 2 HVDC electrodes

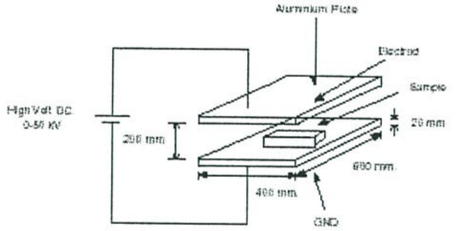


Figure 3 Test diagram

The effect of Electric field to the growing [3], [4] of rice plants is studied by comparing among 3 conditions. These conditions are as follows.

1. Reference box, rice is growing without E field.
2. HVDC box, rice is growing under E = 193 kV/m
3. HVDC box, rice is growing under E = 4 kV/m

3.2 Measurements

The test procedure is done as shown in Figure 4.

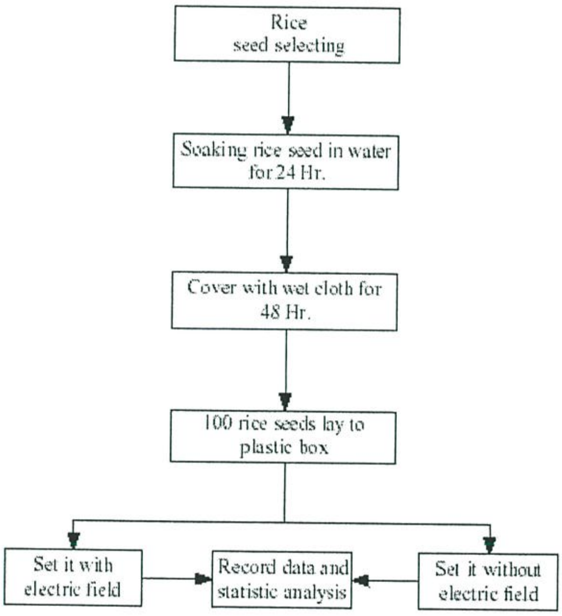


Figure 4 Block diagram of Experimental

The select seeds of rice soak in the water for 24 hours. Then, the seeds are covered with wet cloth for 48 hours. Each 100 seeds are grown in the plastic box, which these boxes have their cover as shown in figure 5. In the experiment, two special paper sheets are used to the base boxes and the 5 ml of water is filled into plastic boxes are arranged. Rice under test in plastic box is placed between the two aluminum plates which the distance from the bottom plate to the top plate are equal to 20 cm, the room temperature and relative humidity are equal to 28 °C and 70 % respectively.

Figure 5 A sample of rice seeds to be investigate

7 plastic boxes are used for each condition, the growing of these plants are recorded by the measurement of their height and the straight of their roots. The data is collected every day for 7 days as shown in figures 6-11. The experiment are carried out following the diagram in Figure 4.

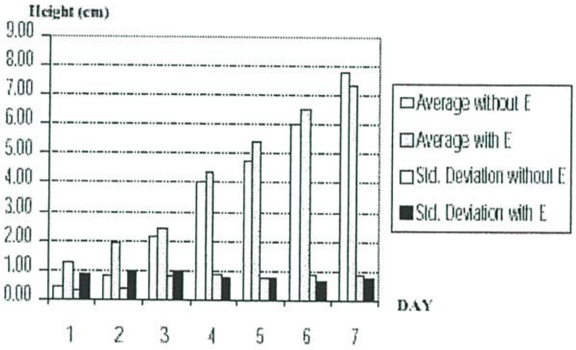


Figure 6 The average of height by electric field 193 kV/m

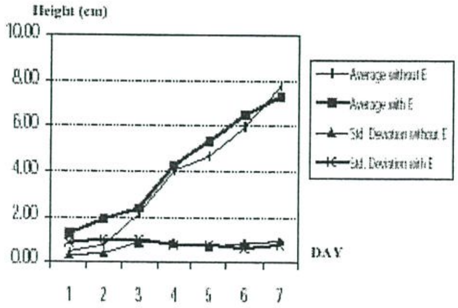


Figure 7 Effect of electric field 193 kV/m

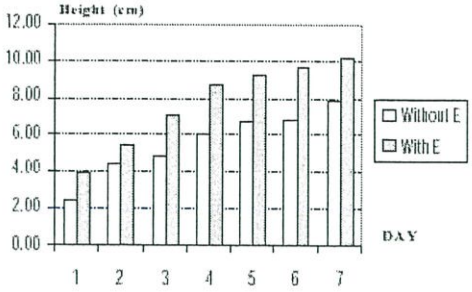


Figure 8 The average of elongated radical by electric field 193 kV/m

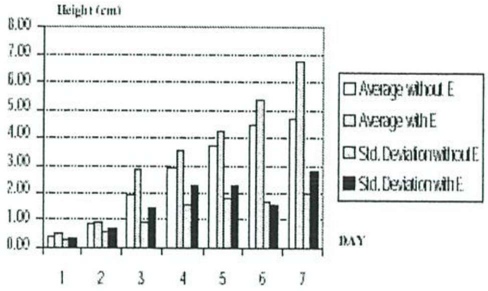


Figure 9 The average of height by electric field 4 kV/m

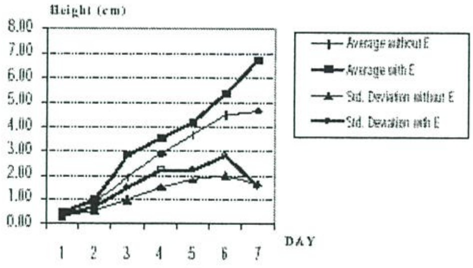


Figure 10 Effect of electric field 4 kV/m

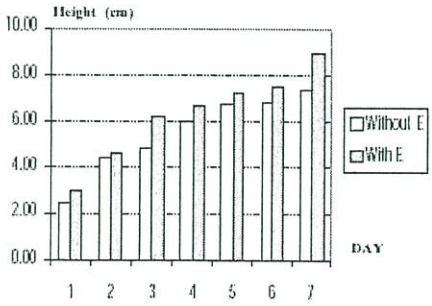


Figure 11 The average of elongated radical by electric field 4 kV/m

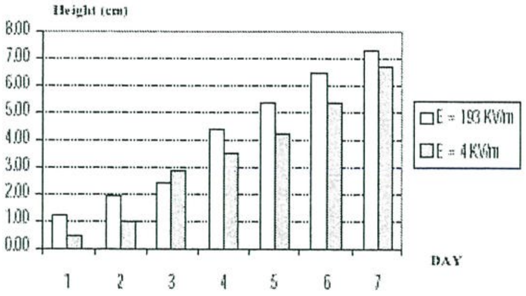


Figure 12 The average of height by electric field between 193 kV/m and 4 kV/m

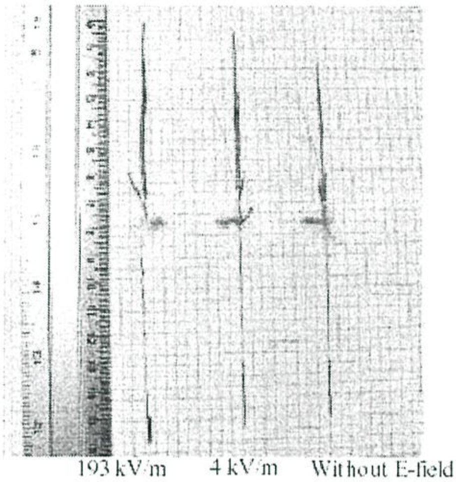


Figure 13 The germination characteristics of rice plant are compared among without electric field, with electric field 193kV/m and 4kV/m after 7 days respectively

4. Results and Discussion

4.1. The rice plants which are tested with electric field at 193 kV/m. The average height is equal to 4.2 cm, the standard deviation is equal to 0.2 cm but without electric field are equal to 3.7 cm and 0.3 cm respectively. The data are shown in figure 6 and figure 7. From figure 6 for the first 6 days, the rice plants with electric field have growing rate of leaves high is higher than without electric field but the seventh day, both group have nearly the same rate of height. However, the average of elongated radical is longer than without electric field for all 7 days is shown in figure 8.

4.2. The rice plants are placed with the electric field at 4 kV/m. The results of the average height is equal to 3.5 cm, the standard deviation is equal to 0.9 cm but without electric field are equal to 2.7 cm and 0.7 cm respectively, as illustrated in figure 9 and figure 10. From these data, the rice plants under this condition have growing rate of leaves high and elongated radical is higher than without electric field as shown in figure 11.

4.3. For the first 6 days, the average of height compares between rice growth with electric field 193

kV/m and 4 kV/m. It is shown that with electric field 193 kV/m is highest, Nevertheless, the third day is lowest.

5. Conclusions

From the results, it can be concluded that:

5.1 For the case that rice plants with electric field at 193 kV/m, the average height of these rice plants are higher than that without electric field on the first 6 days. At seventh day both group have nearly the same rate of height.

5.2 In the case of the rice with electric field at 4 kV/m. The average height of leave is higher than without electric field and elongated radical is longer than without electric field for all 7 days.

5.3 The comparison of growth rate between rice growth with electric field 193 kV/m and 4 kV/m. The results are shown that 193 kV/m is highest.

5.4 The growth rate of rice plants are depended on intensity of electric field.

6. References

[1] Charles Polk and Elliot Postow, "Handbook of biological effects of electromagnetic fields", CRC Press, London, 1996, pp. 139-142.

[2] L.L. Alston, "High Voltage Technology", Oxford University Press, London, 1968.

[3] Jaffe,L.F., Nuccitelli,R., "Electrical controls of development", Annual Review of Biophysics and Bioengineering, Academic Press, New York, 1977, pp. 445-476.

[4] Muraji, M.; Tatebe, W.; and Fujii, T., "Effect of alternating magnetic field on the growth of the primary root of corn", IEEE transactions on magnetics, 1992, 28(4 part.1) 1996-2000.

Miss Thyanuich Rotcharoen, was born in 1974, in Phitsanuloke, Thailand. She received the B.S (Physics Computer and Electronics) degree from Naresuan University Phitsanuloke. She is working forward to M.Eng. at KMITL. Her research focuses on Bio effects of electromagnetic fields.

Dr. Werachet Khan-ngern was born in 1960, in Ubonratchathani, Thailand. He received the degree of B.Eng. and M.Eng. from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in 1982 and 1988, respectively. He received his Ph.D. and DIC from Imperial Collage of Science, Technology and Medicine, the University of London in 1997 in the area of power electronics. He is also a technical committee no. 890: in EMC for the Ministry of Industry. Dr. Khan-ngern continues his research in the area of EMI & EMC and Power Electronics System.

Prof. Dr. Shuichi Nitta earned BSEE and Ph.D. from Kyoto University and the University of Tokyo in 1960 and 1978, respectively. After working for the electric industry as a system engineer and quality assurance manager, he had been a professor of Tokyo University of Agriculture and Technology from 1985 to 2001. He retired the above university at the end of March 2001. Since April 2001, he is currently a professor of Salesian Polytechnic. His research interests are EMC maintainability and safety. Dr. Nitta is a member of IEEE, IEICE, IEEJ, SICEJ, REAJ and AFSMJ.

PROCEEDINGS

Asia-Pacific Conference on
Environmental Electromagnetics
CEEM' 2003

Edited by
Gao Yougang
Yang Qianli

EMC
SOCIETY

Nov.4-7,2003 Hangzhou,China

Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics
CEEM' 2003 Nov. 4-7, 2003 Hangzhou, China

The Study of Rice Growing with the Electromagnetic Field Effect Simulated from 300 kV Switching Substation

T. Rotcharoen[*] W. Khan-ngern[*] S. Nitta[**]

Research Center for Communications and Information Technology, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand
Phone +66-2737-3000 Ext. 3322, Fax +66-2737-3000 Ext. 3322
E-mail : *kkveerac@kmitl.ac.th*
[**] Salesian Polytechnic, 2-35-11 Igusa Suginami, Tokyo, 167-0021, Japan
E-mail : *nitta@cc.tuat.ac.jp*

Abstract

In this paper, the effect of electric field on the growth of rice plants is studied. The research is focused on electric field. The comparison is done under the condition with electric field at 28.5 kV/m and without electric field. The rice plants are experimented under the condition of the electric field. Rice is laid transversely and horizontally, respectively. The results with electric field are compared with without electric field. It is found that the rice plants growth with electric field have the high growth rate of the height of stems and the length of roots more than the case of without electric field.

Keywords: Biological effect, electric field effect, plants development, rice growing, EMC

Introduction

Nowadays, the Electricity Generating Authority of Thailand has a responsibility to produce and distribute the energy via high-voltage transmission line to substation. The voltage levels of high-voltage transmission line are 500 kV (AC), 300 kV (DC), 230 kV (AC), 115 kV (AC) and etc. In this study, High Voltage Direct Current (HVDC) generator with electric field (300 kV) is applied to 100×7 rice seeds. This is the first step to investigate the effectiveness of high voltage (HV) in terms of DC V/m on the rice growth [1], [6].

Applied E-field

The breakdown field strength E_b for aluminum plates is based on electrode configurations, dielectric properties, atmospheric pressure, temperature and etc. The employed electrode used in this germination makes dissimilar electric field strength in each point. The uniformity of electric field strength depends on a figure of electrode. Electric field strength [2] can be calculated by Eqns. (1-3).

$$E_{\max} = \frac{U}{d\,\eta^*} \qquad (1)$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \le 1 \qquad (2)$$

$$E_{av} = \frac{U}{d} \qquad (3)$$

U	*the voltage between electrodes (V)*
d	*the distance between electrodes (m)*
$E_{\max}$	*the maximum of electric field stress (V/m)*
E_{av}	*the average value of electric field (V/m)*
η^*	*the field utilization factor*

The electric field is 28.5 kV/m beneath the 300 kV DC transmission line [7]. In order to realize the experimental condition equal to the practical condition (28.5 kV/m), it to be given by HVDC shown in Figure 1 is calculated from Eqns. (1-3). $\eta^* = 0.8$ is used in this experiment.

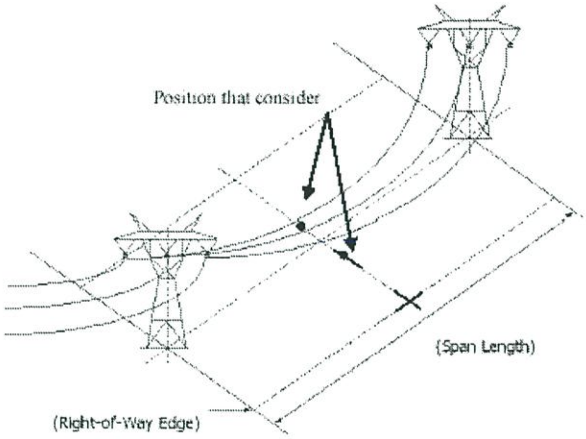


Figure 1 300 kV DC transmission line

In the 300 kV DC transmission line, the calculated voltage between electrodes is as follow :

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*}$$

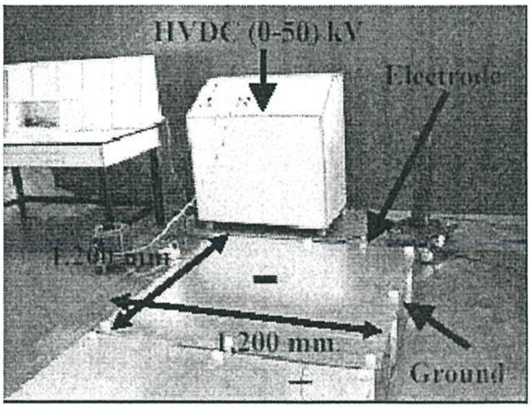
$$28.5\times10^3 = \frac{U}{20\times10^{-2}\times0.8}$$

$$U = 4.560 \quad \text{volt}$$

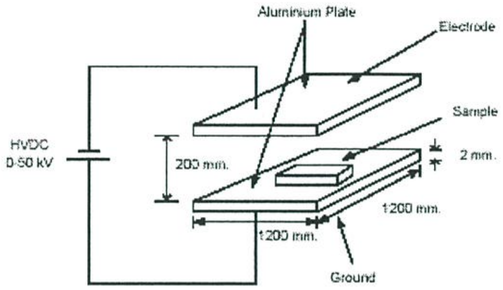
Experiments and Measurements

Experimental Apparatus

This research is carried out using HVDC power supply generating level 0-50 kV with current 10 mA at 10% ripple factor. Two aluminum plates are used as the ± electrodes. The distance from the bottom plate to the top plate is equal to 200 mm. Figures 2 and 3 show the HVDC power supply, the HVDC electrodes, the test system and the experiment procedure, respectively.



(a) General view



(b) Block diagram

Figure 2 Test system

The effect of Electric field to the growing of rice plants has been studied [3-6] by comparing among 2 conditions. These conditions are as follows.

1. Rice is growing under E = 28.5 kV/m at 7 days.
2. In reference box, rice is growing without E field.

Rice is laid transversely and horizontally.

E = 28.5 kV/m is set up by referring to the practical power line transmission 300 kV in Thailand, where the V_{dc} = 4.56 kV and the transmission line height = 8.5 m.

Measurements

The experiment is carried out as shown in Figure 3.

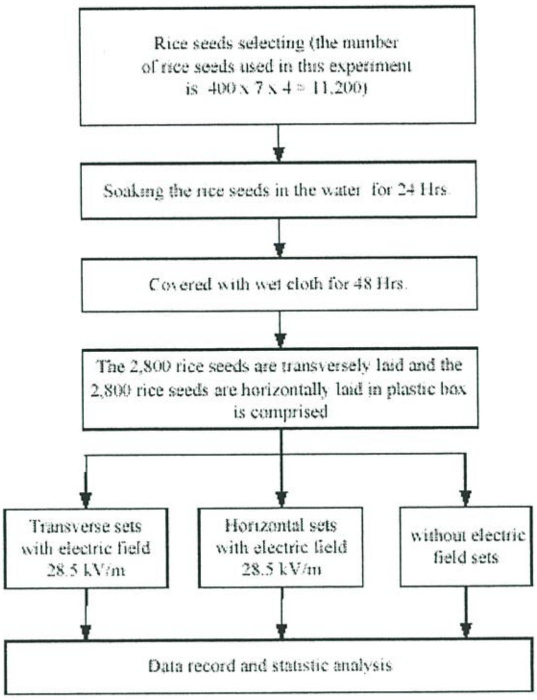


Figure 3 Experiment procedure

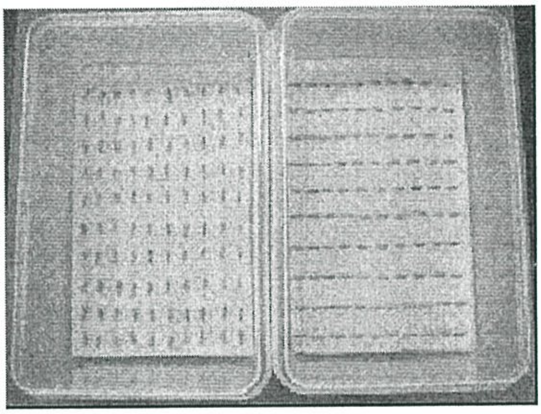
The rice seeds with the same size and weight are selected and soaked in the water for 24 hours. Then, the rice seeds are covered with wet cloth for 48 hours. 100 seeds are placed in each plastic box, which these boxes have their cover as shown in Figure 4. In the experiment, two special paper sheets are used on the base in boxes and the 20 ml of water filled into plastic boxes are arranged. The rice seeds under test in plastic box are placed between the two aluminum plates which the distance from the bottom plate to the top plate is equal to 200 mm. The room temperature and relative humidity are equal to 25 °C and 70 %, respectively.

The 700 rice seeds of 2,800 are laid under the condition of without electric field for 7 days. 2,800 rice seeds are separated to 7 groups of 400 rice seeds. Each group is exposed to the 28.5 kV/m electric field for 1 day, 2 days, 3 days, 4 days, 5 days, 6 days and 7 days, respectively. The test has been done for 4 time based on statistic data.

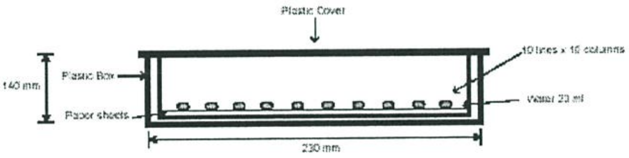
Rice seeds containing in 7 plastic boxes are used for each condition. The growing of these plants are recorded by the measurement of their height of stems and the length of their roots. The data are recorded every day for 7 days. The experiment is carried out following the diagram in Figure 3.

Figure 4 shows the layout of rice seeds.

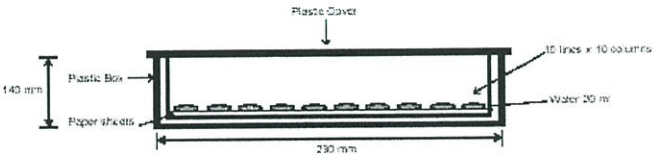
Figure 5 shows the definition evaluation items for growth of rice seeds.



(a) Layout of sample rice seeds (Photo)



(b) Transverse Set

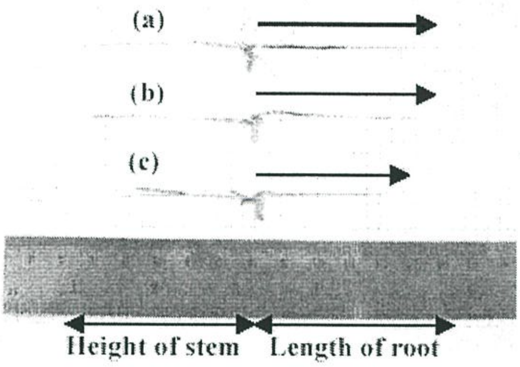


(c) Horizontal Set

Figure 4 Layout of rice seeds

Experimental Results

The experimental results are show in Figures 5-7 and table 1.



(a) E = 28.5 kV/m, transverse set
(b) E = 28.5 kV/m, horzontal set
(c) Without E-field

Figure 5 Evaluation items for growth of rice seeds after 7 days

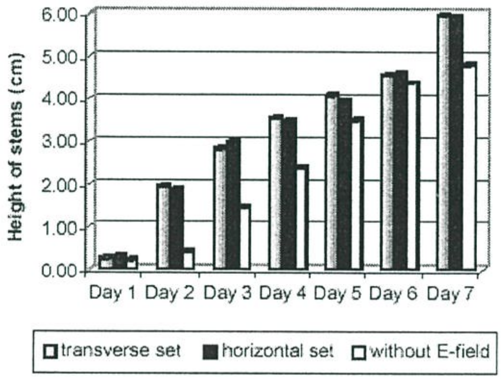


Figure 6 The average of height of stems by electric field 28.5 kV/m

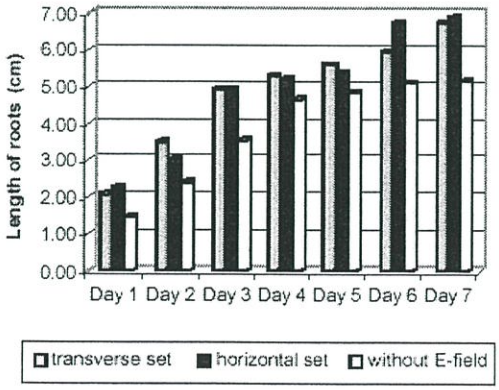


Figure 7 The average of length of roots by electric field 28.5 kV/m

Table 1 shows the experimental results applying the statistic operating on (see the below note) of the mean, the standard deviation and Z-value [8-9] of the height of stems and the length of roots.

Treatment	Height of stems (cm)			Length of roots (cm)		
	$\overline{X}$	Standard deviation	Z-value	$\overline{X}$	Standard deviation	Z-value
E = 28.5 kV/m Transverse set	2.94	0.95	6.76	4.88	1.79	9.90
E = 28.5 kV/m Horizontal set	3.31	1.02	1.20	4.88	1.93	9.35
without E-field	2.51	0.85	-	3.83	1.15	-

Note : The mean, standard deviation and Z-value are the average value after 7 days. For example, Z value equals to 5.96 the results comparing the results with E = 28.5 kV/m with without E-field.

$\overline{x_1}$ = *Mean of the test with E-field = 28.5 kV/m*

$\overline{x_2}$ = *Mean of test at without E-field*

μ_1 *The arithmetic mean of the test with E-field = 28.5 kV/m*

μ_2 = *The arithmetic mean of the test without E-field*

Results and Discussion

Figures 6 and 7 show the comparison of growing rate the height of stems and the length of roots with rice growing with electric field 28.5 kV/m and without electric field, respectively. The rice plants is laid transversely and horizontally with electric field 28.5 kV/m, the growing rate of the height of stems and the length of roots is higher than without electric field for 7 days.

The comparison of growth rate between rice is laid transversely and horizontally growth with electric field 28.5 kV/m. The results are shown that growing rate is nearly for 7 days.

The table 1 shows the average for 7 days of Mean, standard deviation and Z-value of the height of stems and the length of roots. The results indicate that rice is laid transversely and horizontally with electric field 28.5 kV/m , the height of stems and the length of roots is highest while without electric field is lowest.

Conclusions

According to the above results, it is expected that E-field is useful for enhancing the growth of rice seeds. The comparison is done under the condition with electric field at 28.5 kV/m and without electric field. The results with electric field are compared with the results without electric field. It is found that the rice plants growth with electric field have the high growth rate of the height of stems and the length of roots more than the case of without electric field.

References

[1] Charles Polk and Elliot Postow, "Handbook of biological effects of electromagnetic fields", CRC Press, London, 1996, pp. 139-142.

[2] L.L Alston, "High Voltage Technology", Oxford University Press, London, 1968.

[3] Jaffe, L.F., Nuccitelli, R., "Electrical controls of development", Annual Review of Biophysics and Bioengineering, Academic Press, New York, 1977, pp. 445-476.

[4] Muraji, M., Tatebe, W., and Fujit, T., "Effect of alternating magnetic field on the growth of the primary root of corn", IEEE Transactions on magnetics, 1992, 28(4 part.1) 1996-2000.

[5] P.Kerdonfag, C.Klinsa-ard, W.Khan-ngern and S.Kethaew, "Effect of Electric Field Rice Grain Separation Unit on Growth States of the Rice Plant", *International Conference on Electromagnetic Compatibility2002 1st ICEMC 2002*, Bangkok, Thailand, 24-27 July, 2002, pp. 250-253.

[6] T.Rotcharoen, W.Khan-ngern and S.Nitta, "The Effect of Electric Field to Rice Plant Growing", *International Conference on Electromagnetic Compatibility2002 1st ICEMC 2002*, Bangkok, Thailand, 24-27 July, 2002, pp. 254-257.

[7] Transmission Line Reference Book 345 and Above/Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.

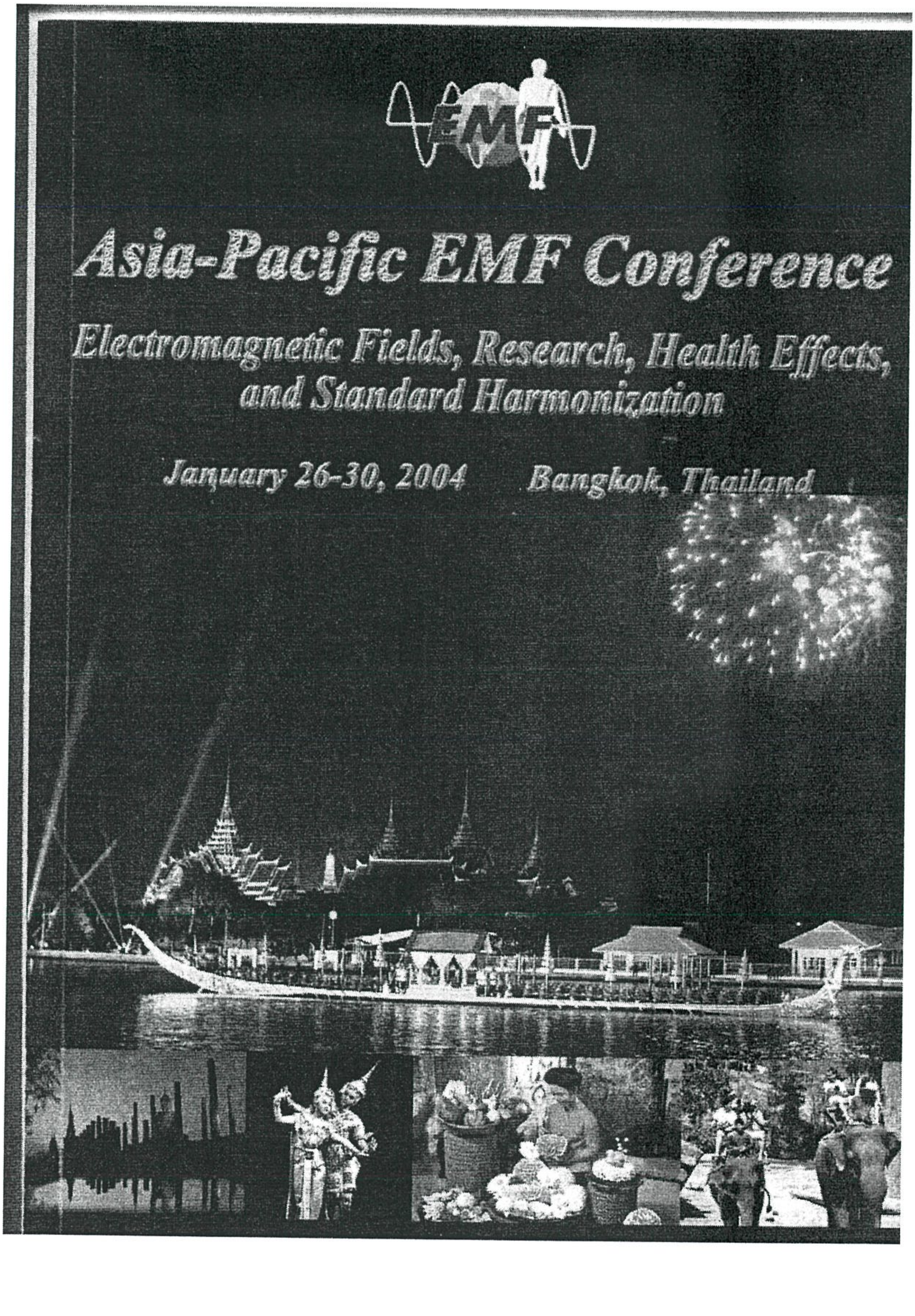
[8] Mario F. Triola, "Elementary statistics", Addison Wesley Longman, Inc. 1997, pp. 60-78.

[9] Albert E. Bartz, "Basic Statistical concepts", Prentice Hall, 1997, pp. 50-60.

Miss Thyanuich Rotcharoen, was born in 1974, in Phitsanuloke, Thailand. She received the B.S (Physics Computer and Electronics) degree from Naresuan University Phitsanuloke. She is working forward to M.Eng. at KMITL. Her research will be focus on Bio effects of electromagnetic fields.

Dr. Werachet Khan-ngern was born in 1960, in Ubonratchathani, Thailand. He received the degree of B.Eng. and M.Eng. from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in 1982 and 1988, respectively. He received his Ph.D. and DIC from Imperial Collage of Science, Technology and Medicine, the University of London in 1997 in the area of power electronics. He is also a chairman of technical committee no. 890: in EMC for the Ministry of Industry. Dr. Khan-ngern continues his research in the area of EMI & EMC and Power Electronics System.

Shuichi Nitta earned BSEE and Ph.D from Kyoto University in 1960 and the University of Tokyo in 1978, respectively. He had been a professor of Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT) from 1985 to 2001. After the retirement of TUAT at 2001, he became a professor emeritus at TUAT and is currently a professor of Salesian Polytechnic from 2001. His research interests are EMC and systems' maintainability and safety. Dr. Nitta is a member of IEEE, IEICE, IEEJ, SICEJ, REAJ and AFSMI.


EMF
Asia-Pacific EMF Conference
Electromagnetic Fields, Research, Health Effects, and Standard Harmonization
January 26-30, 2004
Bangkok, Thailand

The Comparison of Rice Growth due to Vertical and Horizontal Electric Field Treatment

***T.Rotcharoen** ****P.Kerdonfag** ***W.Khan-ngern** ***V.Tarateeraseth**

* Faculty of Engineering, Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand
Phone/Fax +66-2737-3000 Ext. 3322
E-mail : *s3061162@kmitl.ac.th*, *kkveerac@kmitl.ac.th*
** Faculty of Engineering, Mahanakron University of Technology, Bangkok, 10530, Thailand
E-mail : *pongtep@mut.ac.th*

Abstract : The effect of electric field varied in the vertical direction and horizontal direction to the growing of rice plants were studied. The comparison is controlled and done under the same treatment condition such as temperature, relative humidity and light with electric field at 28.5 kV/m and without electric field. The results are analyzed base on statistic methods. Some results shows the height of stem and the length of root with electric field treatment over without treatment condition by 24.57% and 27.29 % respectively.

Keywords : Biological effect, electric field effect, plants development, rice growing, EMC

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวธญาณุตม์ รอดเจริญ
สถานที่เกิด	จังหวัดพิษณุโลก
ประวัติการศึกษา	2535 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม จังหวัดพิษณุโลก
	2540 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์-คอมพิวเตอร์และ-อิเล็กทรอนิกส์มหาวิทยาลัยนเรศวร

ประสบการณ์ในการทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2545	ตำแหน่งวิทยากรที่ปรึกษา สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ
พ.ศ. 2545	อาจารย์พิเศษ โครงการอบรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลงานวิจัย

1. T. Rodcharoen, W. Khan-ngern and S. Nitta "The Effect of Electric Field to Rice Plant Growing", Proceeding of 2002 International Conference on Electromagnetic Compatibility, Bangkok, Thailand, July 24-27, 2002, pp. 254-257.

2. T. Rodcharoen, W.Khan-ngern and S. Nitta "The Study of Rice Growing with the Electromagnetic Field Effect Simulated from 300 kV Switching Substation", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic 2003 CEEM' 2003, Hangzhou, China, 4-7 November, 2003, pp. 138-141.

3. T. Rodcharoen, P. Kerdonfag, W. Khan-ngern and V.Tarateeraseth "The Comparison of Rice Growth due to Vertical and Horizontal Electric Field Treatment", The Asia-Pacific EMF Conference, Bangkok, Thailand, January 26-30, 2004.

4. T. Rodcharoen, P. Kerdonfag, W. Khan-ngern and S. Nitta, "The Study of Bending Effect on the Growth of the Primary Root of Rice Caused by Electric Field", 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sendai, Japan, June 1-4, 2004.