

การศึกษาที่นําลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้โมเลกุลโปรตีนในน้ำเสียตกตะกอน

THE STUDY ON ELECTROMAGNETIC FLOAT TO SEDIMENT
THE PROTEIN MOLECULES IN WASTEWATER



ดูจฤดี นวมเสวตร

DUJREUDEE NUAMSAWADE

สง.
๑๖๖๒๗
๒๕๔๖

เลขหม.....
เลขทะเบียน.....45652
วัน, เดือน, ปี.....1 2 ก.พ. 2546

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-143-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง
4405022

**THE STUDY ON ELECTROMAGNETIC FLOAT TO SEDIMENT
THE PROTEIN MOLECULES IN WASTEWATER**



**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**

2002

ISBN 974-324-143-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้โมเลกุลโปรตีนในน้ำเสีย
ตกตะกอน
นักศึกษา นางสาวจุฑาดี นวมเสวตร
รหัสประจำตัว 42061140
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ. 2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ณรงค์ เหมกรณ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.มณฑล ถิลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอแนวคิดใหม่คือหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งปฏิกิริยาสนามไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดจะมีลักษณะทรงกลมตามโครงสร้างของหุ่นลอย โดยการอาศัยหลักการทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากวงจรสวิทชิงแรงดันสูงสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่อเนื่องทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในน้ำเสีย สามารถนำกลับโมเลกุลโปรตีนที่มีขนาดเล็กๆกลับมาใช้ใหม่แทนการใช้สารเคมี วิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วย วิธีการออกแบบระบบวงจรควบคุมและ โครงสร้างหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การนำไปทดลองนำกลับโมเลกุลโปรตีนชนิดต่างๆ ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองและหาความสัมพันธ์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับโมเลกุลโปรตีน การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียกับแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยคำนึงถึง ประสิทธิภาพ ต้นทุน ความปลอดภัย และแนวทางนำไปใช้งานจริงในอนาคต ประการสุดท้ายเพื่อเรียนรู้หาวิธีที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานและใช้ได้ในการปฏิบัติงานจริงสำหรับสถาบันฯและประเทศชาติในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title The study on electromagnetic float to sediment the protein molecules in wastewater

Student Miss Dujreudee Nuamsawade

Student ID. 42061140

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2002

Thesis Advisor Assoc.Prof. Narong Hemmakorn

Thesis Co-Advisor Assoc.Prof. Monton Leelajindakrairek

ABSTRACT

A purpose of this thesis is to propose a new conception, there is an electromagnetic float. By using the solenoid electrode can cause the distribution of the electric field reaction of electrode is spherical shape follow its structure. The high voltage switching circuit in the electronic control system created continuous reaction of electromagnetic field that can make the hydrolyzation reaction in wastewater. From this principle, the electromagnetic float can be recycled of small protein molecules, in addition to, it can replaced the chemical method. This thesis describe the design of control circuit system method and structure, the experiment of recycle of various protein molecules in the wastewater problem, analysis of the experiment to explain the phenomenal between electromagnetic float and protein, comparing this principle with the other based on efficiency, cost and safety. In addition to, this method is practical guidelines in the future. Finally, learning to mathematical simulation to keep the standard data and practical for Institute, community, and country.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำสั่งสอนและคำปรึกษาต่างๆจาก รศ.ณรงค์ เหมกรณ์ และ รศ.มณฑล ถิลาจินดาไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณสำหรับความอนุเคราะห์ทั้งหมดจาก ท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาถพิงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรม โทรคมนาคม และรองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สจล. ที่กรุณาชี้แนะแนวทางตลอดจนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นवलพรรณ ณ ระนอง หัวหน้าภาควิชาชีววิทยาและคุณสมบัติพิเศษ แพ้วบาง นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจน อุปกรณ์การทดสอบทางด้านวิเคราะห์น้ำรวมถึงเทคนิคด้านวิทยาศาสตร์ทั้งหมด

ขอขอบพระคุณ ดร.เพชรินทร์ ศรีวัฒนกุล รองผู้อำนวยการฝ่ายงานวิจัยสถาบันมะเร็งแห่งชาติ และคุณวัลภา วงษ์เสรี เจ้าหน้าที่ระดับ 7 กลุ่มงานพยาธิวิทยา สถาบันมะเร็งแห่งชาติ ที่ช่วยอนุเคราะห์ตรวจสอบเรื่องเชื้อโรคที่ปะปนมากับน้ำเสีย

ขอขอบพระคุณ มูลนิธิโทเร เพื่อการวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ที่กรุณาให้ทุนทำวิจัยเรื่อง “การพัฒนาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถยับยั้งเชื้อโรคชะลอการเน่าสลายและนำกลับโปรตีนชนิดสดที่ตกค้างในน้ำเสียได้”

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย สจล. ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณคมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ ที่ช่วยเป็นที่ปรึกษาและให้คำแนะนำและข้อมูล การวิจัยต่างๆ ตลอดจนกำลังใจที่มีให้ตลอดมา รวมถึงเพื่อนๆทุกคน

คุณฤดี นวมเสวตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 โครงสร้างพื้นฐานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโมเลกุลโปรตีน.....	2
1.4.1 การเกิดไอออนไนเซชันและโพลาริเซชัน.....	4
1.4.1.1 การเกิดไอออนไนเซชัน.....	4
1.4.1.2 การเกิดโพลาริเซชัน.....	10
1.5 การทำให้โปรตีนในน้ำเสียดกตะกอนโดยวิธีทั่วไป.....	17
1.5.1 ลักษณะของน้ำเสีย.....	17
1.5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย.....	17
1.5.1.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสีย.....	17
1.5.1.3 ลักษณะทางชีววิทยาของน้ำเสีย.....	17
1.5.2 การวัดปริมาณของสารอินทรีย์.....	17
1.5.3 การบำบัดน้ำเสีย.....	18
1.5.3.1 การบำบัดทางกายภาพ.....	18
1.5.3.2 การบำบัดทางเคมี.....	18
1.5.3.3 การบำบัดทางชีววิทยา.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.5.4 การบำบัดและการกำจัดสลัดจ์	19
1.5.5 มาตรฐานน้ำทิ้ง	19
บทที่ 2 การออกแบบระบบควบคุมการปล่อยอนุภาคสนามไฟฟ้าของ	
ทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	20
2.1 วงจรสมมูลและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบเป็นวงจร	20
2.2 หลักการออกแบบวงจรสวิตซ์ซึ่งจ่ายพลังงานดับ	21
2.2.1 หลักการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง	21
2.2.2 วงจรควบคุมการทำงานแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน	29
2.2.3 รีกติฟายเออร์และฟิลเตอร์	30
2.2.4 หลักการออกแบบแอกทีฟเอลิเมนต์ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และเฟด	32
2.2.4.1 มอสเฟดกำลัง	32
2.2.4.2 ทรานซิสเตอร์	36
2.2.4.3 หลักการออกแบบแอกทีฟเอลิเมนต์ไดโอด	44
2.2.5 หลักการออกแบบวงจรมัลติพลายเออร์ 4 ระดับ	46
2.2.5.1 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า	46
บทที่ 3 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์และระยะในการวางอาโนดและคาโทด	49
3.1 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์รูปทรงต่างๆและการเลือกรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์	49
3.1.1 อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ	49
3.1.1.1 อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	49
3.1.1.2 อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	50
3.1.2 อิเล็กทรอนิกส์รูปทรงต่างๆ	52
3.1.2.1 แผ่นระนาบ	52
3.1.2.2 ทรงกระบอกแกนร่วมและทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วม	55
3.1.2.3 ทรงกลม	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม	62
3.2.1 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการออกแบบ	62
3.2.2 วิธีการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม	71
3.3 ระยะเวลาปลอดภัยในการวางอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม	74
บทที่ 4 การออกแบบโครงสร้างหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	76
4.1 การออกแบบโครงสร้างหลักและรูปทรงของหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	76
4.2 การออกแบบถุงลมเบรนท์ที่รองรับตะกอน	77
4.3 ป้อทคลอง	78
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	80
5.1 การทดลองทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความเข้มของสนามไฟฟ้า	80
5.1.1 คอลลอยด์โปรตีนจากสารชนิดต่างๆที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากัน	80
5.1.2 คอลลอยด์โปรตีนจากสารชนิดต่างๆที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างกัน	81
5.1.3 การทดสอบคอลลอยด์โปรตีนที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่า 1000 โวลต์...82	
5.2 การทดลองและวิเคราะห์ทางด้านเคมี	83
5.2.1 การทดลองขณะไม่มีอนุภาคโปรตีนและเลือดในน้ำ	83
5.2.2 วิธีการสร้างคอลลอยด์โปรตีนและการทดลองขณะละลายในน้ำ	84
5.2.3 การใช้หุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านำกลับโมเลกุลโปรตีนจากสารชนิด ต่างๆ	84
5.2.3.1 โปรตีนจากเลือดของสัตว์	84
5.2.3.2 โปรตีนจากไข่ขาว	87
5.2.3.3 โปรตีนอัลบูมิน	87
5.2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยการทดสอบด้วยเครื่อง Spectrophotometer	88
5.2.5 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยการวัดค่าบีโอดีและซีโอดี	89
5.3 การประยุกต์ใช้หุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับน้ำทิ้งภายในสถาบัน ฯ.....	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 สรุป.....	98
เอกสารอ้างอิง	99
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก	101
ภาคผนวก ข	102
ภาคผนวก ค	104
ประวัติผู้เขียน	105



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 คอลลอยด์โปรตีนชนิดต่างๆ ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 1000 โวลต์	80
5.2 คอลลอยด์โปรตีนชนิดต่างๆ ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างกัน	81
5.3 การทดสอบหุ้่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงเคลื่อนมากกว่า 1000 โวลต์.....	82
5.4 ระดับพีเอช อุณหภูมิ ผลการตกตะกอนโดยเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา	86
5.5 การทดสอบหุ้่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับ โปรตีนชนิดอัลบูมิน.....	88
5.6 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	97



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แบบจำลองแรงแวนเดอร์วาลส์3
1.2	การแตกตัวของ โปรีตินเป็นประจุไฟฟ้า4
1.3	การเพิ่มจำนวนแบบทวีคูณของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ7
1.4	กำแพงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก9
1.5	ลักษณะของโมเลกุลแบบมีขั้ว.....11
1.6	การโพลาริซ์ของประจุ Q กับอะตอมที่อยู่รอบๆ12
1.7	สนามของไดโพลไฟฟ้า12
1.8	ลักษณะการโพลาริซ์ที่ผิวของ ไดอิเล็กตริก14
1.9	การแสดงให้เห็นการโพลาริซ์ของโมเลกุลโพรตีน16
1.10	ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน19
2.1	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุมท่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า20
2.2	ฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์แบบมีการแยกกันทางไฟฟ้า21
2.3	กราฟ B-H ของหม้อแปลงในคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค24
2.4	รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสของการส่งผ่านพลังงาน25
2.5	วงจรรวมของการควบคุมโดย PWM30
2.6	การทำงานของวงจรถูกตัด31
2.7	โมเดลสวิตชิงของมอสเฟต32
2.8	รูปสัญญาณในการสวิตชิงของมอสเฟต33
2.9	การใช้งานมอสเฟตเป็นสวิตช์แบบคอมมอนซอร์ส34
2.10	การขับมอสเฟตด้วย CMOS35
2.11	วงจรถูกตัดทรานซิสเตอร์อิมิตัวโดยใช้ไดโอด36
2.12	วงจรถับเบสแบบสัดส่วน38
2.13	SOA ของทรานซิสเตอร์40
2.14	กราฟความสัมพันธ์ของ I_C และ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์41
2.15	พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ RBSOA42
2.16	วงจรถับเบสต่อคร่อมทรานซิสเตอร์สวิตชิง43
2.17	วงจรถับเบสแรงดันไฟฟ้า 2 เท่าแบบครึ่งคลื่น46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18	วงจรทวิแรงดันไฟฟ้า 2 เท่าแบบเต็มคลื่น47
2.19	วงจรทวิแรงดันไฟฟ้า 3 เท่าและ 4 เท่า48
3.1	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน50
3.2	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า51
3.3	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ52
3.4	รูปแสดงการแปลงรูปสี่เหลี่ยมจากระนาบ -w ไปยังระนาบ -z54
3.5	รูปทรงของอิเล็กโทรด56
3.6	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลม59
3.7	กราฟแสดงการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรด61
3.8	การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่างๆ62
3.9	เอลิเมนต์แบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อที่มีตัวไม่รู้ค่า63
3.10	แบบจำลองการกระจายของประจุที่มาปิดล้อมอนุภาคคอลลอยด์65
3.11	แบบจำลองการเริ่มต้นการประมาณค่าพารามิเตอร์66
3.12	อิเล็กโทรดรูปร่างแหวน72
3.13	ระยะห่างในการวางอิเล็กโทรดในน้ำ75
4.1	โครงสร้างของหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า76
4.2	การประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า77
4.3	การใช้ถุงเมมเบรนเพื่อรองรับตะกอนในตู้ทดลอง78
4.4	ขนาดของตู้ทดลองสำหรับบรรจุน้ำที่ปนเปื้อนโปรตีน78
4.5	ตู้ทดลองจริงที่บรรจุการจำลองน้ำทิ้งโดยใช้น้ำผสมเลือดวัว79
5.1	ความเข้มข้นของโปรตีน โดยเฉลี่ยที่ระดับแรงดัน 1000 โวลต์80
5.2	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของโปรตีนชนิดต่างๆ ที่ระดับแรงเคลื่อนต่างกัน81
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันและความเข้มข้น โปรตีนที่ระดับแรงเคลื่อนมากกว่า 1000 โวลต์82
5.4	การทดลองหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับน้ำ83
5.5	การจำลองน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์โดยใช้เลือดวัวผสมน้ำ84
5.6	หลังจากผ่านหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 10 นาที85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.7	หลังจากผ่านฟุ้งลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	85
5.8	อนุภาคคอลลอยด์โปรตีนรวมตัวตกตะกอนที่ก้นตู้ทดลอง	86
5.9	คอลลอยด์โปรตีนจากไข่ขาว	87
5.10	การทดสอบกับคอลลอยด์โปรตีนที่ได้จากอัลบูมินผง	88
5.11	วิธีการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีในห้องปฏิบัติการ	90
5.12	ผลของซีโอดี บีโอดีในแต่ละช่วงเวลา	90
5.13	โครงสร้างหลักของแบคทีเรีย <i>E.coli</i>	92
5.14	โครงสร้าง 3 มิติของเซลล์โปรตีนเมื่ออยู่ในน้ำ	93
5.15	โครงสร้างคอลลอยด์โปรตีนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ	93
5.16	สัดส่วนการใช้พลังงานในอาคารตัวอย่างสำรวจใน สจล.	94
5.17	การหมุนเวียนน้ำทิ้งจากคอยล์เย็นของเครื่องปรับอากาศมาใช้ใหม่	95
5.18	ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั่วไป	96
5.19	ผลการยับยั้งเชื้อ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาของโปรตีนที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัยจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดน้ำเน่าเสียอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อชุมชนนั้นๆเป็นอย่างมาก ซึ่งโปรตีนส่วนหนึ่งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะตกตะกอนเองตามธรรมชาติโดยใช้เวลานานนัก แต่อีกส่วนหนึ่งคืออนุภาคโปรตีนขนาดเล็กอยู่ในรูปสารละลายที่เรียกว่า “คอลลอยด์โปรตีน (Colloid protein)” ขนาดอยู่ระหว่าง $10^{-6} - 10^{-9}$ มิลลิเมตร จะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นานหลายปี ซึ่งถ้าใช้เวลากตกตะกอนตามธรรมชาติต้องใช้เวลาถึง 10-20 ปี และเป็นสิ่งที่แก้ไขได้ยากเนื่องจากคุณสมบัติความเป็นประจุไฟฟ้ารอบๆผิวอนุภาคของคอลลอยด์โปรตีนจะดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำเปรียบเสมือนตัวกั้นไม่ให้อนุภาคของโปรตีนเกิดการรวมตัวตกตะกอนได้ทำให้เกิดความสมดุลแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นาน

วิทยานิพนธ์นี้จึงใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสถิตย์เพื่อทำให้โมเลกุลโปรตีนในน้ำเสียตกตะกอนและนำกลับตะกอนของโปรตีนนี้ไปศึกษาเพื่อแปรรูปใหม่ได้ ซึ่งหลักการนี้จะไม่มีการเคมีมาเกี่ยวข้อง ช่วยลดเวลาในการบำบัดและค่าใช้จ่ายต่ำ ประหยัดพลังงาน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลในเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบน้ำทิ้งตาม โรงงานฆ่าสัตว์ในกรุงเทพฯและเขตปริมณฑลพบว่ามีปริมาณมากในแต่ละวัน ซึ่งการบำบัดน้ำเสียต้องใช้ต้นทุนสูงและใช้เวลานานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำดิบ ทำให้ผู้ประกอบการบางรายละเลยในการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าว ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ประยุกต์หลักการสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามานำกลับโมเลกุลของกลุ่มเลือดและโปรตีนในน้ำทิ้งจาก โรงงานฆ่าสัตว์เพื่อศึกษานำกลับมาแปรรูปเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ เช่น เพื่อเพาะพันธุ์จุลินทรีย์บางชนิดขึ้นมาใช้ในการเกษตรกรรมหรืออื่นๆ ตัวอย่างเช่นนำไปย่อยสลายเศษอาหารกุ้งเพื่อลดปริมาณก๊าซมีเทนก้นบ่อได้ และนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ได้โดยตรงเช่นนำไปแปรรูปเป็นอาหารกุ้งกุลาดำซึ่งปัจจุบันราคาค่อนข้างแพง วิทยานิพนธ์นี้จะชี้ให้เห็นการหมุนเวียนสิ่งที่ไม่มียุคค่ากลับให้มีค่าและเพิ่มผลิตผลต่ออุตสาหกรรมและเกษตรกรรมได้อย่างสูงสุด

เนื่องจากกระบวนการนำกลับ โปรตีนและบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพและทางเคมีจะมีความยุ่งยากซับซ้อนมีหลายขั้นตอน ต้นทุนมีราคาแพง ใช้เวลานาน ที่สำคัญหลังจากโปรตีนและเลือดถูกบำบัดแล้วไม่อาจนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกออกมาแล้วจะเอาไปฝังกลบหรือทำปุ๋ย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นที่จะนำกลับแบบปฏิกิริยาสนามไฟฟ้าเพราะมีความรวดเร็ว ขนาดเล็ก เพราะระบบทั้งหมดจะถูกออกแบบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โปรตีนและเลือดที่ได้จะมีความบริสุทธิ์เหมาะที่จะนำไปศึกษาแปรรูปใช้ประโยชน์ได้ใหม่ ปรากฏการณ์คอลลอยด์ของโปรตีนทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมถือว่าแก้ปัญหาได้ยาก ด้วยเหตุผลที่ว่า โมเลกุลคอลลอยด์จะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวขัดขวางการรวมตัวและคุณสมบัติสนามไฟฟ้ารอบผิวนี้จะทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจึงทำให้แก้ปัญหาได้ยาก วิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆผิว อธิบายปรากฏการณ์การรวมตัวและเรียนรู้วิธีบำบัดแบบหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนำมาถึงการแก้ปัญหาอย่างถูกต้องต่อการประยุกต์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมของน้ำในประเทศที่กำลังทวีความรุนแรงอยู่ในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เริ่มจากการศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอนุภาคคอลลอยด์โปรตีน การแขวนลอยอยู่ในน้ำ ได้รวมถึงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของคอลลอยด์โปรตีน การศึกษาปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการที่จะเอาชนะสนามไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเสีย เมื่อได้ข้อมูลเพียงพอแล้วจึงทำการออกแบบระบบวงจร รูปทรงของอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการสร้างปฏิกิริยาได้ดีที่สุดและเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน จากนั้นจึงออกแบบรูปทรงภายนอกของหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สุดท้ายจึงออกแบบตะแกรงรองรับเศษโปรตีนที่ผ่านกระบวนการนำกลับแล้ว เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆต่อไป ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการประกอบและติดตั้งวงจรเพื่อใช้งานจริงในบ่อทดลองแล้วจึงพัฒนาวงจรให้สามารถใช้งานได้จริงตามแหล่งที่มีปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของเศษโปรตีน เช่น อุตสาหกรรมนากุ้ง โรงงานฆ่าสัตว์ โรงหมักแป้งหัวเหลือง เป็นต้น

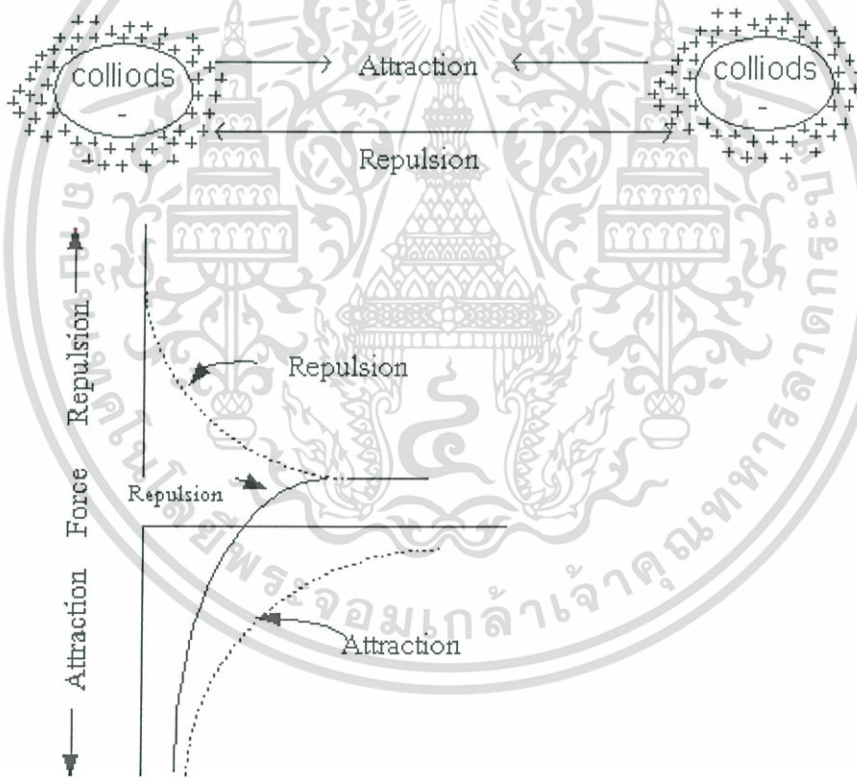
1.4 โครงสร้างพื้นฐานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโมเลกุลโปรตีน

โปรตีนเป็นมหโมเลกุล (Macromolecule) ที่พบมากที่สุด สิ่งมีชีวิต มากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำหนักแห้ง (Dry weight) ของเซลล์ทั่วไปเป็นโปรตีน และพบว่าในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโปรตีนเกี่ยวข้องนั้น โปรตีนเหล่านี้จะทำให้หน้านั้นเกิดการเน่าเสียอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นจึงต้องทำการบำบัดน้ำเหล่านี้โดยใช้เวลาที่รวดเร็วและน้ำนั้นยังไม่ทันเน่าเสียเพราะจะก่อมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้นมาอีกด้วย

ประการแรกจึงต้องศึกษาถึงโครงสร้างพื้นฐานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโปรตีนก่อน ซึ่งพบว่าโปรตีนเมื่ออยู่ในสภาพสารละลายจะมีสมบัติเป็นคอลลอยด์ (Colloid) สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะคือ อิมัลซอยด์ (Emulsoid) และ ซัสเพนซอยด์ (Suspendoid) โปรตีนที่พบในธรรมชาติ

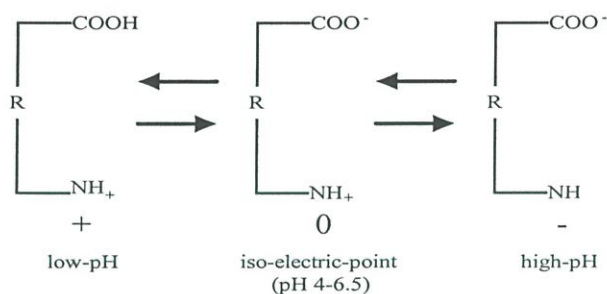
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นอิมัลชันคือเป็นคอลลอยด์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic colloids) ส่วนซัสเพนชันคือเป็นคอลลอยด์ชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic colloids) สารละลายชนิดคอลลอยด์ทั้งสองชนิดนี้จะแสดงประจุไฟฟ้าที่ผิวของโมเลกุล เนื่องจากการที่แขนงข้างของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนมีลักษณะความเป็นโพลาร์และมีคุณสมบัติการแตกตัวสามารถแสดงประจุได้และมักพบอยู่ที่ผิวนอกของโปรตีนเพราะชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งประจุเหล่านี้จะทำให้อนุภาคของโปรตีนสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ เพราะประจุชนิดเดียวกันจึงเกิดการผลักกันตามทฤษฎีของแรงแวนเดอร์วาล (Vander Waals Force) ดังรูปที่ 1.1 ฉะนั้นถ้าหากต้องการให้โปรตีนสามารถรวมตัวตกตะกอนก็ต้องทำให้อนุภาคเหล่านี้เกิดการรวมตัวกันหรือทำให้เสียเสถียรภาพโดยทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์นั่นเอง ซึ่งประจุสุทธิของโปรตีนจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ขึ้นอยู่กับ pH ดังรูปที่ 1.2 โดยจะมีค่า pH หนึ่งเรียกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ซึ่งโปรตีนจะมีประจุสุทธิเท่ากับศูนย์ เนื่องจากปริมาณประจุบวกเท่ากับปริมาณประจุลบ



รูปที่ 1.1 แบบจำลองแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 การแตกตัวของโปรตีนเป็นประจุไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับ pH ของน้ำ

1.4.1 การเกิดไอออนไนเซชันและโพลาริเซชัน

1.4.1.1 ปรากฏการณ์ไอออนไนเซชัน (Ionization)

โดยทั่วไปแล้วจะพบว่าในน้ำนั้นจะมีอิเล็กตรอนหรือไอออนอิสระปะปนอยู่ รวมทั้งเมื่ออนุภาคของน้ำมีพลังงานสูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลหรืออนุภาคนั้นสามารถหลุดออกมาได้ ถ้าได้รับพลังงานสูงพอ เรียกว่า "การเกิดไอออนไนเซชัน" และพลังงานจากสนามไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอก (จ่ายแรงดันคร่อม) จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นได้ และเมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงนี้เคลื่อนที่ไปชนกับอนุภาคของโปรตีนหรืออนุภาคอื่นๆ อาจทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน (ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา) อีกได้ หรือเรียกว่า "การเกิดไอออนไนเซชันจากการชนของอิเล็กตรอน" นอกจากนี้เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวอิเล็กโทรดด้วย โดยกระบวนการเกิดอิเล็กตรอนหลุดจากของแข็ง (ขั้วอิเล็กโทรด) จะเรียกว่าการแผ่กระจายอิเล็กตรอน (Electron emission)

การไอออนไนเซชันโดยการชน (Collision ionization) นั้น จากกฎของโมเมนตัมและทฤษฎีอนุรักษพลังงานจะสามารถอธิบายการชนกันระหว่างอนุภาคได้ ถ้าทราบเงื่อนไขก่อนการชน สมมติให้อนุภาคมีมวล m และ M เคลื่อนที่ชนกันในแนวมุมใดๆ และเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคก่อนชนเป็น \vec{v} และ \vec{V} ตามลำดับ เมื่ออนุภาคมวล M อยู่นิ่งในตอนแรก ($V = 0$) จะได้ว่าความเร็วของอนุภาคในแกน y (\vec{v}_y, \vec{V}_y) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังการชนและเมื่อให้ \vec{v}_1 เป็นความเร็วในแนวแกน x หลังการชนของอนุภาคมวล m จะได้ว่า

$$v_1 = \frac{m - M}{m + M} \cdot V \quad (1.1)$$

ซึ่งการไอออนไนเซชันเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชนกับอนุภาคของน้ำและอนุภาคอื่นๆที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ (อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจากสนามไฟฟ้า) ถ้าพลังงานจลน์ที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้ามากกว่าพลังงานไอออนไนเซชันของน้ำและโปรตีน (W_i) จะทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้นเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง ($v = 0$) ในทิศทางทวนสนามไฟฟ้า $\bar{E}(x)$ เป็นระยะทางเฉลี่ยอิสระ (Mean free part) λ จะได้ว่าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็น

$$W = \int_0^{\lambda} \bar{E}(x) dx = eV \quad (1.2)$$

โดยการไอออนไนเซชันจะเกิดเมื่อ $W \geq W_i$
หรือเมื่อ $\lambda \geq \lambda_i$ ถ้า $E(x)$ คงที่

หรือจะได้ว่า $eE\lambda_i \geq W_i = eV_i$
เมื่อ V_i เป็นแรงดันที่ทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน
 eV_i เป็นพลังงานที่ทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน

ในกรณีที่การชนเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น ก็จะมีการเปลี่ยนพลังงานจากพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานศักย์จะสามารถหาพลังงานที่อนุภาคของโมเลกุลโปรตีนจะได้รับเมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอนได้จาก

$$mv + MV = mv_1 + MV_1$$

แต่มวล M ใหญ่กว่าอนุภาค ดังนั้น

$$mv = mv_1 + MV_1 \quad (1.3)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}MV_1^2 + W_p \quad (1.4)$$

เมื่อ W_p เป็นพลังงานศักย์ที่อนุภาคมวล M ได้รับ
จากสมการ (1.3) แทนค่า V_1 ลงในสมการ (1.4) จะได้

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}\frac{m^2}{M}(v - v_1)^2 + W_p \quad (1.5)$$

$$W_p = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}\frac{m^2}{M}(v - v_1)^2 \quad (1.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าพลังงานศักย์สูงสุดที่อนุภาคมวล M จะได้รับ เมื่อพลังงานจลน์ของอนุภาคมวล m ที่วิ่งมาชนมีค่าคงที่ โดยการดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ v_1 และให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\frac{dW_p}{dv_1} = \frac{m}{M} [mv - (m+M)v_1] = 0$$

$$mv = (m+M)v_1$$

$$\frac{v_1}{v} = \frac{m}{m+M}$$

ถ้าให้ $m \ll M$ (มวลอิเล็กตรอนน้อยกว่ามวลโมเลกุลมาก) จะได้

$$v_1 = \frac{m}{M}v \quad (1.7)$$

จะเห็นว่า v_1 มีค่าน้อยมาก อาจกล่าวได้ว่าอนุภาคมวล m (หรืออิเล็กตรอน) จะเกือบหยุดนิ่งหลังการชน แสดงว่าอนุภาคที่วิ่งมาชนหรืออิเล็กตรอนจะให้พลังงานจลน์เกือบทั้งหมดกับโมเลกุล และถ้าพิจารณาด้วยทฤษฎีอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า ความเร็วหลังการชนกันของอนุภาคทั้งสองจะเท่าๆกัน คือ $v_1 = V_1$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าพลังงานศักย์สูงสุดที่โมเลกุลรับเข้าไปได้จากการแทนค่า v_1 ลงในสมการ (1.6) ได้เป็น

$$W_p(\max) = \frac{M}{m+M} \frac{mv^2}{2} \quad (1.8)$$

อาจกล่าวได้ว่าการเกิดไอออนไนเซชันโดยการชนของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานไอออนไนเซชันของโมเลกุล นั่นคือ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (1.9)$$

ในระหว่างที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปอาจเกิดการชนได้มากกว่าหนึ่งครั้งก่อนที่จะไปถึงขั้วอิเล็กโทรด ทาวน์เซนด์ได้เสนอว่าจำนวนการชนและเกิดไอออนไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้นจะกำหนดด้วยแฟกเตอร์อย่างหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า "สัมประสิทธิ์การเกิดไอออนไนเซชันของทาวน์เซนด์" (Townsend ionization coefficient) [22] แบ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α เป็นค่าเฉลี่ยของการชนแล้วเกิดไอออนไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไป (ระหว่างอิเล็กโทโรด) เป็นระยะ 1 เซนติเมตร (หน่วยเป็น cm^{-1}) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนด์ (Townsend first ionization coefficient)

β คือ จำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลของโปรตีน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่เคลื่อนที่

เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อย และการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนก็จะน้อยด้วย นั่นคือ $\alpha \gg \beta$ ฉะนั้นการไอออนไนเซชันจึงมักจะเกิดจากกระบวนการที่ชนด้วยอิเล็กตรอน (กระบวนการ α)

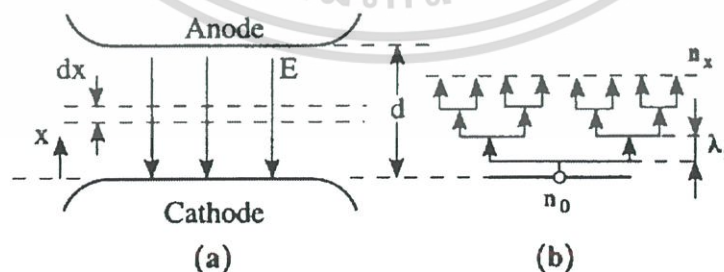
ค่าสัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชัน α จะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของโมเลกุลโปรตีนในน้ำ ตามความสัมพันธ์

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.10)$$

หรือ
$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left[\frac{B}{E/p}\right] \quad (1.11)$$

โดย $B = AV_i$ และ $A = A(T)$

เมื่อมีอิเล็กตรอนมากพอที่จะเคลื่อนที่ชนกับโมเลกุลของโปรตีนจะทำให้เกิดการไอออนไนเซชันขึ้นได้ นั่นคือ จะเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นใหม่และเมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดออกมาใหม่นี้ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ ก็จะเกิดการเคลื่อนที่ไปชนกันต่อไปอีก ดังนั้นจะทำให้ได้อิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยจะเพิ่มจำนวนไปตามเส้นทางแบบทวีคูณ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทโรดที่เป็นคาโทดไปยังแอโนด ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การเพิ่มจำนวนแบบทวีคูณของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 1.3 พิจารณาระยะทางสั้นๆ dx ที่ห่างจากขั้วคาโทดเป็นระยะทาง x ให้มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dN_x = \alpha N_x dx \quad (1.12)$$

โดยที่ $x = 0$ (ขั้วคาโอด) มีจำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็น N_0 และที่ระยะ x จากคาโอดมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น N_x ค่า α ของการเกิดไอออนไนเซชันดังกล่าวจะมีค่าคงที่ เนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอเท่ากันตลอด โดยสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (1.13)$$

ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางแบบเอกซ์โปเนนเชียล และที่แอโนดจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha x} \quad (1.14)$$

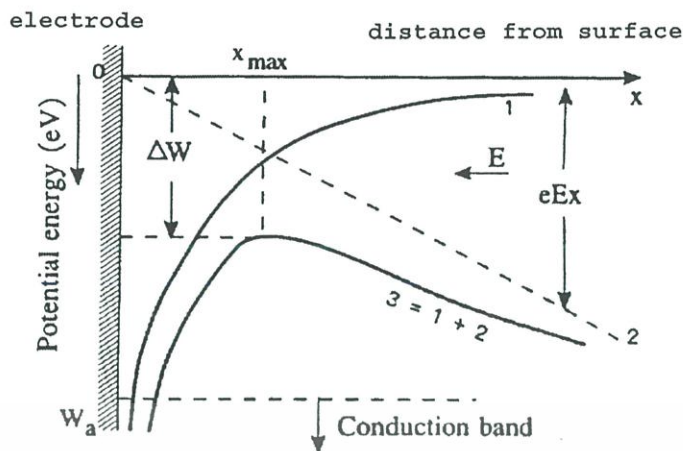
การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผลของสนามไฟฟ้า (Field emission) เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากๆ คร่อมขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหนาแน่นขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วคาโอด และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะได้รับพลังงานเข้าไปจนสามารถหลุดออกมาจากผิวของคาโอดได้

พิจารณาจากรูปที่ 1.4 เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะหรืออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ไปในทิศ x สมมติให้มีประจุสมมติมีค่าเป็น $+e$ อยู่ลึกลงไปในเนื้อของอิเล็กโทรดเป็นระยะทาง $-x$ และเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างประจุนี้กับอิเล็กตรอนที่หลุดออกไป (ประจุ $-e$) จะได้ว่าพื้นผิวอิเล็กโทรดจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอด และจากกฎของ Coulomb จะสามารถหาแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน เป็น

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} \\ &= \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} \end{aligned} \quad (1.15)$$

พลังงานศักย์ที่ระยะ x ใดๆ จะหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (1.15) จากจุด $x = x$ ถึง $x = \alpha$ ได้เป็น

$$W_{el} = \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (1.16)$$



รูปที่ 1.4 ค่าพลังงานศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก (1) ค่าพลังงานขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้า (2) พลังงานที่เกิดจากสนามไฟฟ้า (3) พลังงานเมื่อถูกสนามไฟฟ้ากระทำของอิเล็กตรอน

จากสมการ (1.16) จะสามารถพล็อตเป็นกราฟพาราโบลาได้ ดังรูปที่ 1.4 กราฟ (1) แต่เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งขึ้นไปตามเส้นทาง (ไปทางขวาของแผ่นขั้วคาโทด) และทำให้มีพลังงานศักย์เป็น

$$W_e = -eE_x \tag{1.17}$$

สมการ (1.17) จะสามารถพล็อตได้เป็นเส้นตรง (2) ในรูปที่ 1.4 ดังนั้นพลังงานโดยรวมทั้งหมดจะเป็นดังกราฟ (3) นั่นคือ

$$\begin{aligned} W &= W_a + W_e \\ &= -\left[\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x} \right] - eE_x \end{aligned} \tag{1.18}$$

หาค่า x ที่ทำให้ค่า W สูงสุด หรือ x_m ได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (1.18) และให้เท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dx} &= \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x_m^2} - eE = 0 \\ x_m &= \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_0 E}} \end{aligned} \tag{1.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

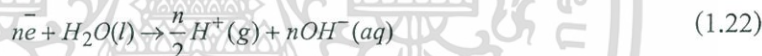
แทนค่า x_m ลงในสมการ (1.18) จะได้

$$W_m = -e \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (1.20)$$

ดังนั้นค่า Work function ; W_{wf} (คือ พลังงานจำนวนหนึ่งในการที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากคาโทด) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้า จะเป็น

$$\begin{aligned} W_{wf} &= W_a + W_m \\ &= W_a - e \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \end{aligned} \quad (1.21)$$

ระบบนี้เป็นระบบที่ลดเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยการลดชั้นความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) เพื่อให้โมเลกุลคอลลอยด์รวมตัวตกตะกอน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นจากวงจรควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ทำให้อิเล็กตรอนที่ออกจากอิเล็กโทดในน้ำจะสามารถแตกตัวในน้ำดังสมการที่ (1.20)[3]



จากสมการที่ (1.22) เมื่ออิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับของเหลวเช่น น้ำ ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ ชนิดที่เป็นประจุบวกจะแสดงเป็นก๊าซขึ้นที่ขั้วลบของทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ก๊าซไฮโดรเจน (H^+) ส่วนอีกปฏิกิริยาคือการแตกตัวที่เรียกว่าการไฮโดรไลซิส (OH^-) จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นหนึ่งตัวและอิเล็กตรอนจะแตกตัวต่อไปได้เรื่อยๆ ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาลูกโซ่ จะสามารถลดเสถียรภาพคอลลอยด์ที่มีกลุ่มประจุบวกและลบ ทำให้โมเลกุลคอลลอยด์ตกตะกอนได้

1.4.1.2 การเกิดโพลาริเซชัน

โมเลกุลของสารไดอิเล็กตริกสามารถแยกประเภทออกเป็นสองประเภท คือ โมเลกุลแบบมีขั้ว (Polar) และโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว (Non-polar) โมเลกุลแบบมีขั้วหมายถึงโมเลกุลของสารซึ่งศูนย์กลางของประจุบวกหรือนิวเคลียสไม่อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับศูนย์กลางของประจุลบหรืออิเล็กตริก ดังนั้นโมเลกุลประเภทมีขั้วจึงมีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้าที่โมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้า P ของสารมีความโน้มเอียงที่จะวางตัวให้อยู่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอก ส่วนโมเลกุลแบบไม่มีขั้วหมายถึงโมเลกุลของสารที่มีศูนย์กลางของประจุบวกและประจุลบอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน โมเลกุลของสารที่มีความ

สมมาตร เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่างเป็นโมเลกุลแบบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีขั้วส่วนโมเลกุลของไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และ น้ำ (H₂O) ต่างเป็น โมเลกุลแบบมีขั้ว เมื่อสาร ไดอิเล็กตริกที่โมเลกุลเป็นแบบไม่มีขั้ววางอยู่ในสนามไฟฟ้า อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้ศูนย์กลางของประจุบวกและศูนย์กลางของประจุลบ จะไม่เป็นตำแหน่งเดียวกันอีกต่อไปและทำให้เกิดขั้วคู่ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น

การเกิดขั้วคู่ไฟฟ้าลักษณะเช่นนี้ กล่าวได้ว่าโมเลกุลแบบไม่มีขั้วของสารไดอิเล็กตริกถูก โพลารไรซ์ขณะที่โมเลกุลถูกโพลารไรซ์จะมีแรงคืนตัว (Restoring force) ระหว่างประจุบวกและประจุลบที่แยกจากกัน การแยกจากกันของประจุเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อแรงบนประจุเนื่องจากสนามไฟฟ้าเท่ากับแรงคืนตัวระหว่างประจุโดยแรงทั้งสองนี้มีทิศตรงข้ามกัน

เมื่อสาร ไดอิเล็กตริกประเภทโมเลกุลเป็นแบบมีขั้วอยู่ในสนามไฟฟ้าย่อมเกิดทอร์ควงบนขั้วคู่ไฟฟ้าของโมเลกุลของสาร โดยทอร์ควงนี้พยายามที่จะหัน โมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าให้เบนไปอยู่ในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 1.5 (ข) ส่วนรูป (ก) แสดง โมเลกุลแบบมีขั้วของสารไดอิเล็กตริกเมื่อไม่อยู่ในสนามไฟฟ้า จะพบว่าทิศของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าของโมเลกุลแบบนี้ไม่เป็นระเบียบ



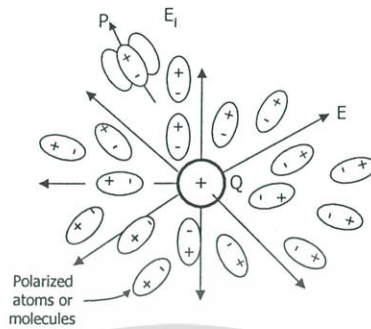
รูปที่ 1.5 ลักษณะของ โมเลกุลแบบมีขั้ว
 (ก) เมื่อไม่อยู่ในสนามไฟฟ้า
 (ข) เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามผลของสนามไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อสาร ไดอิเล็กตริกไม่ว่าจะเป็น โมเลกุลแบบมีขั้วหรือโมเลกุลแบบไม่มีขั้วก็ตาม ย่อมทำให้มีประจุบวกอยู่ที่ผิวหน้าของสารด้านที่สนามไฟฟ้าผ่านออกจากสารและมีประจุลบอยู่ที่ผิวหน้าของสารด้านที่สนามไฟฟ้าผ่านเข้าสู่สาร

ในลักษณะเดียวกันน้ำที่มีโปรตีนปนเปื้อนอยู่ก็จะเป็น ไดอิเล็กตริกที่มีโมเลกุลเป็นลักษณะเป็นโพลาร์ ซึ่งเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามาจึงมีการโพลารไรซ์ไปยังอะตอมที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งแรงของสนามไฟฟ้าที่พุ่งออกไปของ Q จะเคลื่อนกลุ่มของอิเล็กตรอนและประจุบวกของแต่ละอะตอมให้อยู่ในทิศตรงข้ามหรือการเหนี่ยวนำไดโพลผ่านไดอิเล็กตริก ซึ่งไดโพลก็คือคู่ของประจุ Q ที่ตรงกันข้ามที่ถูกแยกกันด้วยระยะทางสั้นๆ \bar{d} ซึ่งไดโพลโมเมนต์ \bar{p} กำหนดได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{p} = q\bar{d} \tag{1.23}$$

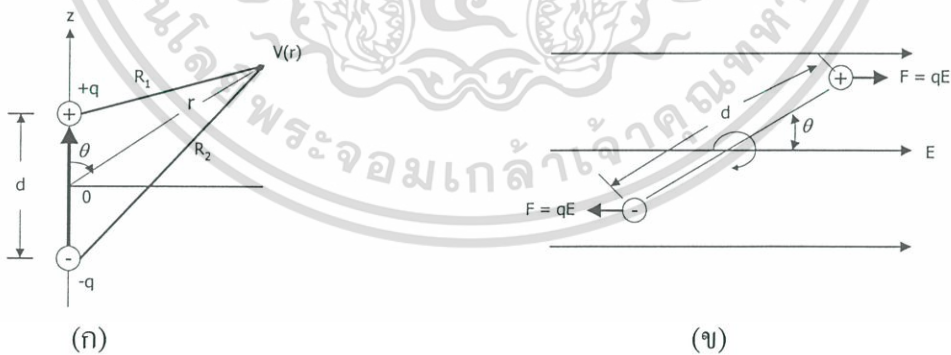


รูปที่ 1.6 การโพลารไรซ์ของประจุ Q กับอะตอมที่อยู่รอบๆ และไดโพลโมเมนต์ \bar{p} รวมทั้งสนาม \bar{E} , ที่เกิดขึ้นรอบอะตอม

จะเห็นว่าขณะที่ไม่มีสนามจากภายนอก โมเลกุลจะมีทิศทางที่เป็นลักษณะไม่มีทิศทางและไม่เป็นระเบียบ (Randomizes) แต่เมื่อมีสนาม (Applied field) เข้ามาก็จะมีทิศทางไปตามสนาม \bar{E}

รูปที่ 1.7 เมื่อมีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบจนกระทั่งสามารถเคลื่อนที่ไปตามทิศทางสนาม \bar{E} ฉะนั้นแต่ละไดโพลจึงมีทอร์ก (Torque) เกิดขึ้น

$$\bar{T} = \bar{p} \cdot \bar{E} \tag{1.24}$$



รูปที่ 1.7 สนามของไดโพลไฟฟ้า (ก) ไดโพลไฟฟ้าที่จุดเริ่มต้นและหมุนไปตามแกน z (ข) การหมุนของไดโพล $q\bar{d}$ ที่อยู่ในสนามไฟฟ้า \bar{E}

โดยใช้นิยามนี้หาทอร์กที่เกิดบนไดโพลได้เป็น

$$\bar{T} = \bar{F} \bar{d} \sin\theta = q\bar{d} \bar{E} \sin\theta \tag{1.24a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (1.24a) เป็นการแสดงเวกเตอร์ของผลลัพธ์ที่ได้เมื่อไดโพลหมุนไปตามทิศทางของสนาม ($\theta = 0^\circ$) ไม่เกิดขึ้น ขณะที่มุมขวาได้รับทอร์กสูงสุดไปยังด้านทิศของสนามเพื่อจะหมุนไดโพลไปตามทิศของสนามไฟฟ้าจึงเกิดงานขึ้น จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้า (Potential energy); W ที่มีไดโพลหมุนไปตามทิศของสนามจากภายนอก พลังงานที่ได้จะเป็น

$$W = \int T d\theta = \int_{\pi/2}^0 pE \sin \theta d\theta = -pE \cos \theta \quad (1.25)$$

เมื่อเลือกตำแหน่งของพลังงานศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ เพื่อให้เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยมุม $\theta = \pi/2$ โดยใช้เวกเตอร์สมการ (1.25) อาจแสดงด้วย dot product

$$W = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad (1.26)$$

จะได้พลังงานต่ำสุด $W = -pE$ เมื่อไดโพลไปตามทิศทางของสนาม ($\theta = 0$) และพลังงานสูงสุด $W = +pE$ เมื่อ $\theta = \pi$ งานจะเกิดขึ้นเมื่อไดโพลหมุนไป 180°

$$W = 2pE \quad (1.27)$$

จะต้องใช้งาน $2pE$ จุต เพื่อหมุนไดโพลจากโครงสร้างพลังงานต่ำสุดไปยังตำแหน่งพลังงานสูงสุด จะเห็นว่าแรงสุทธิ (Net force) บนไดโพลที่อยู่ในสนามสม่ำเสมอ (uniform field) เป็นศูนย์ เพราะว่าแรง 2 แรงที่ได้กระทำบนประจุทั้งสองของไดโพลล้วนเป็นประจุตรงข้ามกัน ดังนั้นในสนามสม่ำเสมอ นั้นไดโพลจะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปมาได้มันจะหมุนได้เท่านั้นจนกว่าจะอยู่ในแนวของสนามเพราะงานและแรงสัมพันธ์กันโดย $F = -\nabla W$ ซึ่งแรงบนไดโพลกำหนดโดยใช้สมการ (1.26) เป็น

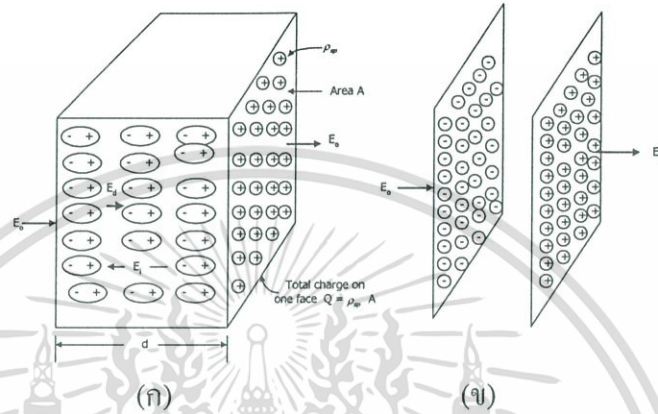
$$\vec{F} = \nabla(\vec{p} \cdot \vec{E}) \quad (1.28)$$

ถ้าให้ p คงที่ เราสามารถย้าย ∇ ได้ ฉะนั้นจะเห็นว่ามันกระทำกับ \vec{E} ได้โดยตรง โดยการใส่คุณสมบัติของเวกเตอร์ แรงสามารถเขียนได้เป็น $\vec{F} = (\vec{p} \cdot \nabla)\vec{E}$ ซึ่งแสดงว่าแรงในสนามสม่ำเสมอเป็นศูนย์ เพราะอนุพันธ์ของค่าคงที่ \vec{E} เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามในสนามไม่สม่ำเสมอ ไดโพลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นเส้นตรง เพราะว่าประจุด้านหนึ่งของไดโพลอยู่ในที่มีความเข้มของสนามมากกว่าอีกด้านหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อก้าวถึงโพลาริเซชันก็จะต้องเกี่ยวข้องกับ Dielectric constant หรือค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก ซึ่งกำหนดเป็น $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ เมื่อ ϵ เป็นเปอร์มิตติวิตีของโลหะและ $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ และเป็นเปอร์มิตติวิตีของอากาศ จากรูปที่ 1.8 เมื่อมีสนามจากภายนอก \vec{E}_0 มีทิศทางการโพลาริเซชันดังรูป สมมติว่าเส้นไดโพลปกติตั้งขึ้น ดังนั้นไดโพลโมเมนต์ของแต่ละโมเลกุลสามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta\vec{p} = q\Delta\vec{d}$$



รูปที่ 1.8 ลักษณะการโพลาริเซชันที่ผิวของไดอิเล็กตริก (ก) พื้นผิวของไดอิเล็กตริกแสดงการโพลาริเซชันโดยสนามจากภายนอก \vec{E}_0 (ข) การหักล้างของประจุภายในจะเหลือประจุที่ผิว ρ_s

ถ้าเราอินทิเกรตเส้นของไดโพลเราจะได้

$$\vec{p} = \int_0^d q\Delta\vec{d} = q\vec{d} \tag{1.29}$$

ไดโพลโมเมนต์รวมจะเป็น

$$\vec{P} = Q\vec{d} \tag{1.30}$$

เมื่อ $Q = \Sigma q$ และเป็นประจุพื้นผิวทั้งหมดที่เกิดจากโพลาริเซชัน โพลาริเซชัน \vec{P} หรือไดโพลโมเมนต์ต่อหน่วยปริมาตร สามารถเขียนได้ว่า

$$\vec{P} = \frac{p}{V} = \frac{Qd}{Ad} = \frac{Q}{A}\vec{d} = \rho_{sp}\vec{d} \tag{1.31}$$

โพลาริเซชันจะเท่ากับความหนาแน่นประจุพื้นผิว ρ_{sp} ของประจุที่เกิดจากโพลาริเซชัน สามารถเขียนความหนาแน่นฟลักซ์เหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (The induced electric flux density); \bar{D}_i , ระหว่างชั้นของประจุทั้งสองได้เป็น

$$\bar{D}_i = -\rho_{sp} \quad (1.32)$$

\bar{D}_i จะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ \bar{E}_i โดย $\bar{D}_i = \epsilon_0 \bar{E}_i$ ดังรูปที่ 1.8 เราใช้เปอร์มิตติวิตีของน้ำคูณกับ \bar{E}_i เพราะเราทำการทดลองไดอิเล็กตริกในน้ำที่ซึ่งมีการเพิ่มของกลุ่มของไดโพล ทำการเปรียบเทียบสมการนี้กับสมการ (1.29) เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{P} และ \bar{D}_i เป็น

$$\bar{D}_i = -\bar{P} \quad (1.33)$$

สนาม \bar{E}_d ที่อยู่ในไดอิเล็กตริกจะเห็นจากรูปที่ 1.8 จะเป็นสนามที่ป้อนเข้ามา (\bar{E}_o) ที่ลดลงโดยสนามเหนี่ยวนำ \bar{E}_i (ตรงข้ามกับ \bar{E}_o) นั่นคือ

$$\bar{E}_d = \bar{E}_o + \bar{E}_i \quad (1.34)$$

เมื่อ $\bar{P} = -\bar{D}_i$ เขียนโดยใช้สมการ (1.34)

$$\bar{P} = -\epsilon_0 \bar{E}_i = -\epsilon_0 (\bar{E}_d - \bar{E}_o) \quad (1.35)$$

หรือ

$$\epsilon_0 \bar{E}_o = \epsilon_0 \bar{E}_d + \bar{P} \quad (1.35a)$$

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (The electric flux density); \bar{D}_d ที่อยู่ในไดอิเล็กตริกจะเท่ากับ

$$\bar{D}_d = \epsilon_0 \bar{E}_d + \bar{P} \quad (1.36)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_d จะได้จาก $\bar{D}_d = \epsilon_d \bar{E}_d$ เป็น

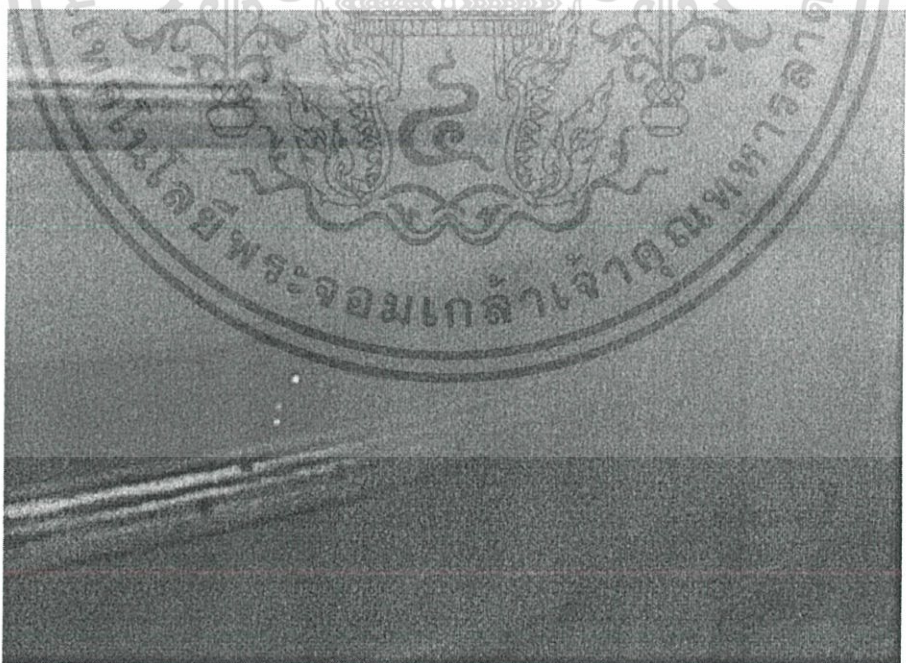
$$\epsilon_d = \epsilon_0 + \frac{\bar{P}}{\bar{E}_d} \quad (1.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ไดอิเล็กตริกเป็นไอโซโทรปิก (\bar{P} และ \bar{E}_d อยู่ในทิศเดียวกัน) และ ϵ_d เป็นสเกลาร์จะเขียนได้เป็น $\epsilon_d = \epsilon_0 (1 + \chi)$ เมื่อ χ เรียกว่า "Electric susceptibility" ในทางปฏิบัติเมื่อพิจารณาไดอิเล็กตริกอย่างง่ายจะไม่คิดงานกับโพลาไรเซชัน \bar{P} แต่จะคิดงานกับเปอร์มิตติวิตี ϵ_d และความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า \bar{D} โดยตรง นั่นคือ จะคิดงานกับ $\bar{D} = \epsilon_d \bar{E}_d$ ซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตีที่สามารถหาได้เพื่ออธิบายผลที่เกิดจากโพลาไรเซชันทั้งหมด



(ก) ช่วงเวลาประมาณ 10 นาที โมเลกุลโปรตีนเริ่มมีการเรียงตัวตามทิศทางของสนามจากภายนอก



(ข) เวลาประมาณ 30 นาที มีการรวมตัวหนาแน่นที่ผิวอิเล็กโทรด

รูปที่ 1.9 การแสดงให้เห็นถึงการโพลาไรซ์ของโมเลกุลโปรตีนซึ่งเป็นโพลาร์โมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การทำให้โปรตีนในน้ำเสียตกตะกอนด้วยวิธีทั่วไป

1.5.1 ลักษณะของน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนไปด้วยโปรตีน เช่น โรงงานฆ่าสัตว์ โรงงานแป้งต่างๆ เป็นต้น จะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ ทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีววิทยา

1.5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย (Physical Characteristics of Wastewater)

ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจะประกอบไปด้วย กลิ่น อุณหภูมิ สี ความขุ่น ซึ่งแต่ละลักษณะจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เพื่อช่วยให้สามารถบ่งถึงคุณภาพของน้ำเสียอย่างคร่าวๆได้

1.5.1.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสีย (Chemical Characteristics of Wastewater)

ลักษณะสมบัติทางเคมีประกอบด้วย พีเอช สภาพกรด สภาพด่าง ความกระด้าง ปริมาณออกซิเจนละลาย บีโอดี ซีโอดี ซัลเฟต คลอไรด์ ไนเตรต ฟอสเฟต เหล็ก แมงกานีส และ โลหะหนักอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งแต่ละลักษณะจะบ่งถึงคุณภาพของน้ำและน้ำเสียแต่ละแหล่ง

1.5.1.3 ลักษณะทางชีววิทยาของน้ำเสีย (Biological Characteristics of Wastewater)

น้ำเป็นสื่อที่ตีมากของการแพร่กระจายโรคซึ่งเกิดขึ้นโดยแบคทีเรีย แบคทีเรียสามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่คือ Pathogenic bacteria และ Nonpathogenic bacteria ซึ่งชนิดแรกจะจัดเป็นพวกที่ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหารและยากต่อการวิเคราะห์หา สำหรับพวก Nonpathogenic bacteria หรือเรียกว่า โคลิฟอร์ม แบคทีเรีย (Coliform bacteria) ซึ่งจะพบบ่อยๆในอุจจาระของคนและสัตว์และถ้าตรวจพบในตัวอย่างน้ำก็แสดงว่าน้ำนั้นมี Faecal material และอาจจะมีพวก Pathogenic bacteria อยู่ในตัวอย่างน้ำนั้นด้วย การวิเคราะห์น้ำทั่วไปเพื่อหาจำนวนของโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ Multiple-tube fermentation หรือเรียกกันว่า Most Probable Number (MPN) และ Membrane Filter Technique (MFT)

1.5.2 การวัดปริมาณของสารอินทรีย์

ในปัจจุบันนี้นิยมใช้วัดค่าของ Biochemical Oxygen Demand (BOD) และ Chemical Oxygen Demand (COD) รวมถึงค่า pH ด้วย

Biochemical Oxygen Demand (BOD) ค่าของบีโอดีนี้เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในการแสดงถึงความสกปรกมากน้อยเพียงใดของน้ำเสียจากชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานต่างๆ ค่าของบีโอดีเป็นค่าที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบและควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียโดยทางชีววิทยาและใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

Chemical Oxygen Demand (COD) การทดสอบหาค่าของซีโอดีใช้สำหรับประมาณปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป โดยทั่วไปแล้วค่าของซีโอดีจะมีค่ามากกว่าค่าของบีโอดี เพราะว่ามีปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางเคมีจะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยเอนไซม์เป็นเอนไซม์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทางชีววิทยา ประโยชน์ของการหาค่าซีโอดีที่มีเหนือกว่าของบีโอดีคือเวลาของการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีใช้ประมาณ 3 ชั่วโมง แต่สำหรับบีโอดีต้องใช้เวลาถึง 5 วันจึงจะทราบผล ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าของซีโอดีจึงนิยมใช้กันมากสำหรับการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป

ค่า pH คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเป็นค่าที่สำคัญค่าหนึ่งในน้ำเสียทั่วไป ค่านี้จะเป็นค่าหนึ่งที่สามารถบ่งถึงคุณภาพของน้ำว่าจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั่วไปในน้ำหรือไม่ ส่วนมากนิยมใช้เครื่อง pH meter ในการวัด pH ซึ่งสะดวกและรวดเร็วมาก

1.5.3 การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการที่สำคัญอย่างหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ให้มีคุณภาพดีเหมือนเดิมหรือใกล้เคียงกับของเดิม ซึ่งสามารถทำได้โดยการแยกหรือทำลายสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีปริมาณลดลงจนถึงระดับมาตรฐานที่กำหนดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการเน่าเสียขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อให้มีลักษณะสมบัติให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมให้สามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนชนิดต่างๆ ออกจากน้ำเสียโดยทั่วไปมี 3 กระบวนการ คือ

1.5.3.1 การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)

วิธีนี้นิยมใช้เป็นกระบวนการอันดับแรกในระบบบำบัดน้ำเสียร่วมกับกระบวนการอื่น การบำบัดทางกายภาพประกอบด้วย การดักด้วยตะแกรง (Screening) การทำให้อลอย (Floatation) การกรอง (Filtration) การตกตะกอน (Sedimentation) การดักหรือการกวาด (Skimming) การควน (Mixing) และอื่นๆ

1.5.3.2 การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment)

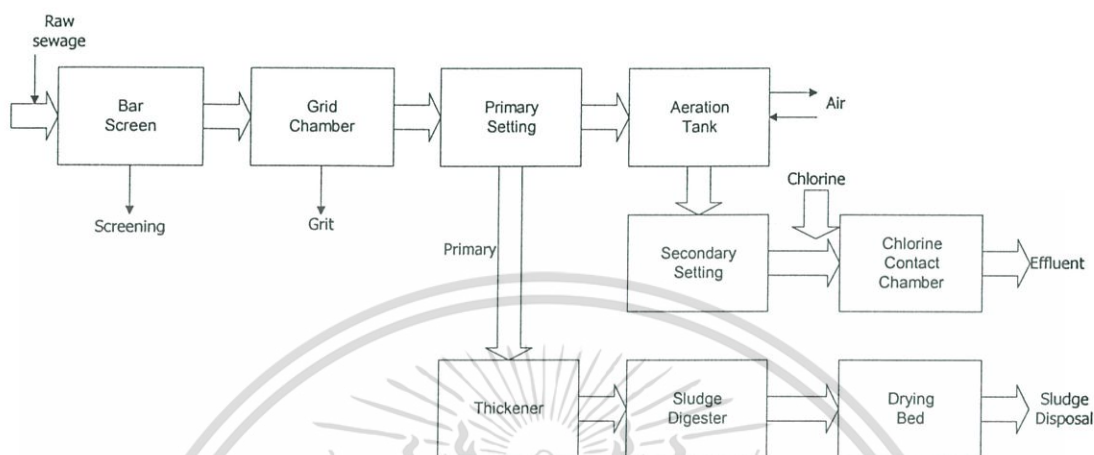
การบำบัดทางเคมีใช้เสริมกับการบำบัดทางกายภาพ เช่นเติมสารเคมีเพื่อเร่งการตกตะกอน วิธีการทางเคมีที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ การสะเทิน (Neutralization) การออกซิเดชัน (Oxidation) การตกตะกอนผลึก (Precipitation) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

1.5.3.3 การบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment)

เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของความสกปรกในน้ำเสียโดยอาศัยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบแรกเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ (Aerobic system) จะมีการให้อากาศอย่างเพียงพอเพื่อให้จุลินทรีย์กำจัดสารอินทรีย์ให้ลดน้อยลงถึงเกณฑ์มาตรฐาน เช่น แอททิเวเต็ด สลัดจ์ (Activated sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contractor) เป็นต้น และระบบที่สองเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (Anaerobic system) จะมีการปรับสภาพของระบบบำบัดให้จุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทำงาน ตัว

อย่างของระบบบำบัดแบบนี้ได้แก่ บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic pond) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพแอนแอโรบิก (Anaerobic rotating biological contractor) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอโรบิก (Anaerobic rotating biological contractors) ปฏิกรณ์ชั้นสลัดจ์แอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic sludge blanket UASB) เป็นต้น การบำบัดทางชีววิทยานิยมใช้ต่อจากการบำบัดทางกายภาพเพื่อให้น้ำสะอาดยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.10 ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในปัจจุบัน [12]

1.5.4 การบำบัดและกำจัดสลัดจ์

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการต่างๆดังกล่าวมาแล้วจะมีสลัดจ์ (Sludge) เกิดขึ้นเสมอ สลัดจ์ส่วนมากจะตกตะกอนและมีการสะสมในถังตกตะกอนและถังปฏิริยาแบบต่างๆที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เมื่อปริมาณสลัดจ์มีมากถึงระดับหนึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกจากถัง มิฉะนั้นระบบบำบัดน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพลดลง สลัดจ์เหล่านั้นจะมีสิ่งสกปรกปะปนอยู่มากจึงต้องทำการบำบัดเสียก่อนที่จะนำไปกำจัดทิ้งต่อไปเพื่อเป็นการป้องกันมิให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัญหาอื่นๆตามมา ดังนั้นการบำบัดและการกำจัดสลัดจ์จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

1.5.5 มาตรฐานน้ำทิ้ง (Effluent standard)

คุณภาพของน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาจากโรงงานแต่ละประเภทนั้นจำเป็นต้องผ่านการบำบัดเพื่อให้มีปริมาณสารเจือปนลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดการเน่าเสียขึ้นในแหล่งน้ำที่รับน้ำทิ้ง ปกติหน่วยงานของรัฐบาลหรือผู้ที่เกี่ยวข้องที่รับผิดชอบในการควบคุมคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำสาธารณะจะเป็นผู้กำหนดมาตรฐานคุณภาพของน้ำทิ้ง สำหรับประเทศไทย กระทรวงอุตสาหกรรมเป็นผู้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข

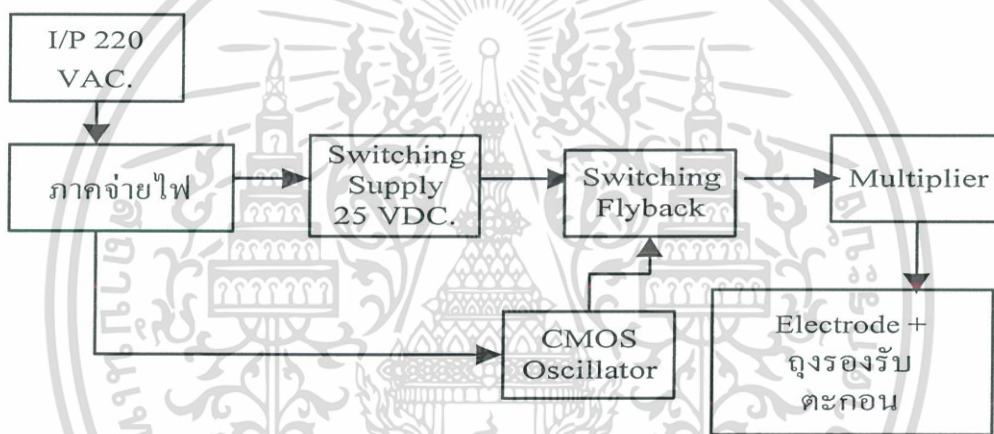
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การออกแบบระบบควบคุมการปล่อยอนุภาคสนามไฟฟ้า ของท่อนลอสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 วงจรสมมุทธ์และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบเป็นวงจร

ระบบท่อนลอสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิทชิงแรงดันสูง ดังรูปที่ 2.1 และส่วนที่ 2 จะเป็นส่วนของท่อนลอสหรือโครงสร้าง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป ส่วนในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นวงจรควบคุมท่อนลอสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุมท่อนลอสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

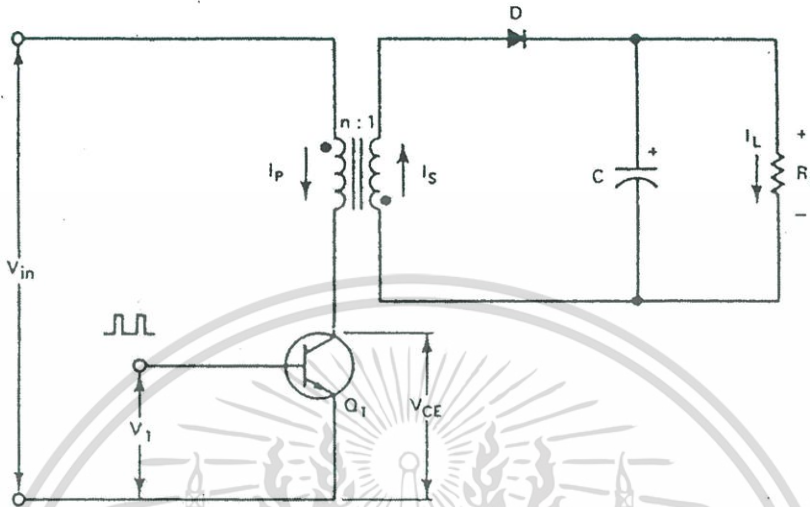
โดยมีหลักการทำงานดังนี้คือ ระบบวงจรควบคุมจะมีแรงดัน 220 โวลต์เอซี ผ่านภาคจ่ายไฟที่แปลงสัญญาณเอซีเป็น 12 โวลต์ดีซีซึ่งจ่ายให้กับ Switching supply ยกกระดานแรงดันเป็น 25 โวลต์ดีซีและจ่ายให้ตัวควบคุมความถี่ CMOS Oscillator เพื่อผลิตความถี่ไปขับ (drive) ให้กับระบบ Switching flyback ผ่านระบบมัลติพลายเออร์ ผลิตแรงดันสูงให้กับอิเล็กโทรดแบบวงแหวน สร้างอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับ โมเลกุลของโปรตีนตกตะกอนมาที่ถูกรองรับตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.003 มิลลิเมตร เพื่อเก็บตะกอนโปรตีนเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ได้

แต่ละบล็อกไดอะแกรมย่อยๆจะได้มีการอธิบายในแต่ละบล็อกในหัวข้อถัดไป

2.2 หลักการออกแบบวงจร Switching supply แรงดันลบ

2.2.1 หลักการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

หลักการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงพิจารณาจากรูปที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.2 ฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์แบบมีการแยกกันทางไฟฟ้า

ซึ่งมีการทำงานดังนี้คือ เมื่อ Q_1 ปิดวงจร จะเกิดกระแสไหลในขดลวดปฐมภูมิสะสมพลังงานและไดโอด D ถูกไบอัสกลับ เนื่องจากการจัดเรียงขั้วระหว่างขดลวดหม้อแปลงด้านอินพุตและเอาต์พุตตรงข้ามกัน เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจร ขั้วของขดลวดทั้งสองจะกลับขั้วกัน เนื่องจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก ไดโอด D นำกระแสตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุและจ่ายกระแสไปยังโหลด จากวงจรพบว่า นอกจากจะใช้หม้อแปลงเป็นตัวแยกระบบทางไฟฟ้าแล้วยังทำหน้าที่เป็นโช้ค (Choke) อีกด้วย ดังนั้นภาคเอาต์พุตของฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์จึงไม่จำเป็นต้องมีขดลวดอีก ในทางปฏิบัติบางครั้งอาจจำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำๆ ต่อระหว่างขดลวดเรียงกระแสกับตัวเก็บประจุเอาต์พุต เพื่อลดสัญญาณรบกวนในการสวิตชิงที่ความถี่สูงๆ

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีอัตราทนแรงดันคอลเลกเตอร์สูงสุดขณะที่สวิตช์เปิดวงจรและกระแสคอลเลกเตอร์สูงสุดขณะที่สวิตช์ปิดวงจร

แรงดันคอลเลกเตอร์ขณะเปิดวงจร คือ

$$V_{CE,max} = \frac{V_{in}}{1 - \delta_{max}} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_{in} คือ แรงดันไฟตรงอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

δ_{\max} คือ ดิวตี้ไซเคิลสูงสุด (Duty cycle)

สมการ (2.1) เป็นการบอกค่าของแรงดันคอลเลกเตอร์ในย่านที่ปลอดภัย ดิวตี้ไซเคิลจะต้องมีค่าต่ำ ปกติจะต่ำกว่า 50% ($\delta_{\max} < 0.5$) ในทางปฏิบัติ δ_{\max} จะใช้ประมาณ 0.4 ซึ่งจะเป็นการจำกัดให้แรงดันคอลเลกเตอร์สูงสุด $V_{CE,\max} \leq 2.2 V_{in}$ ทรานซิสเตอร์ควรมีแรงดันไม่ต่ำกว่า 800 V

กระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ขณะเปิดวงจรคือ

$$I_c = \frac{I_L}{n} \quad (2.2)$$

เมื่อ I_L คือ กระแสด้านปฐมภูมิ

n คือ สัดส่วนจำนวนรอบของขดลวด

พลังงานที่สะสมในโช้ค

$$P_{out} = \left(\frac{LI_L^2}{2T} \right) \eta \quad (2.3)$$

เมื่อ η (Eta) คือ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ แรงดันตกคร่อมหม้อแปลงอาจแทนได้

เท่ากับ

$$V_{in} = \frac{L di}{dt} \quad (2.4)$$

ถ้าสมมติให้ $di = I_L$ และ $1/dt = f / \delta_{\max}$ ดังนั้นสมการ (2.4) จะเป็น

$$V_{in} = \frac{LI_L f}{\delta_{\max}} \quad (2.5)$$

หรือ

$$L = \frac{V_{in} \delta_{\max}}{I_L f} \quad (2.6)$$

แทนสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.3) จะได้

$$P_{out} = \left(\frac{V_{in} f \delta_{\max} I_L^2}{2f I_L} \right) \eta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้สมการเพื่อหา I_L

$$I_L = \frac{2P_{out}}{\eta V_{in} \delta_{max}} \quad (2.7)$$

แทนสมการ (2.7) ลงในสมการ (2.2) ก็จะได้สมการกระแสคอลเลกเตอร์ในเทอมของกำลังเอาต์พุต

$$I_C = \frac{2P_{out}}{\eta V_{in} \delta_{max}} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) สมมติให้ประสิทธิภาพของ Converter เท่ากับ 0.8 (80 เปอร์เซ็นต์) และดิวิตีไซเกิล $\delta_{max} = 0.4$ (40 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้น

$$I_C = \frac{6.2P_{out}}{V_{in}} \quad (2.9)$$

การเลือกอุปกรณ์สวิตชิงที่ใช้กับสวิตชิงฟลายแบ็ค อุปกรณ์สวิตชิงในที่นี้หมายถึงเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพาเวอร์มอสเฟต ฯลฯ ซึ่งจะต้องทนแรงดันตกคร่อมได้สูงเมื่อตัวมันนำกระแส เช่น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ จะต้องทราบพิกัดที่สำคัญ คือ $V_{CE(max)}$ และ $I_{C(max)}$ แต่ถ้าเป็นเพาเวอร์มอสเฟตก็คือ $V_{DS(max)}$ และ $I_{D(max)}$ ฯลฯ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์สวิตชิงที่เป็นเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$V_{CE(max)}$ ที่เกิดขึ้นในวงจรเมื่อ Q_1 ต้องทนได้ในขณะไม่นำกระแสคือ

$$V_{CE(max)} = 2 * V_{in} + V_S * (N_S / N_P) \quad (2.10)$$

โดยที่ V_{in} คือแรงดันไฟตรงที่ได้รับจากภาคเรกติฟายและฟิลเตอร์ด้านอินพุต

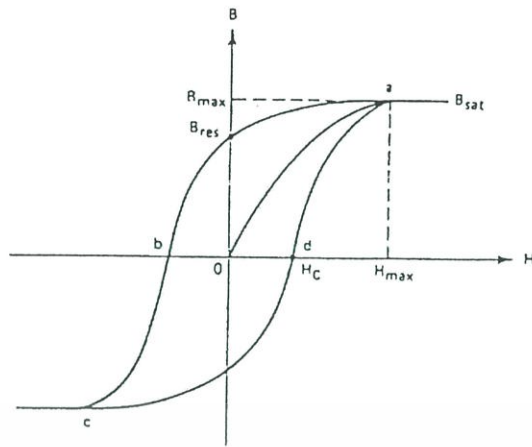
V_S คือแรงดันที่ขดทุติยภูมิ ($V_{out} - 0.7 \approx V_{out}$)

(N_S / N_P) คืออัตราส่วนของจำนวนรอบระหว่างขดทุติยภูมิกับปฐมภูมิ

แต่จากทฤษฎีของหม้อแปลง $N_S / N_P = V_S / V_P$

$$V_{CE(max)} = 2V_{in} + V_S * V_S / V_P \approx 2V_{in} + (V_o)^2 / V_{in}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟ B - H ของหม้อแปลงในคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค

อีกจุดหนึ่งที่สำคัญคือ ทรานซิสเตอร์ที่ใช้จะต้องทนกระแสคอลเลกเตอร์ I_C ในขณะทำงานด้วย คือ

$$I_C = I_L * (N_s / N_p) \tag{2.11}$$

เมื่อ I_L คือกระแสที่ไหลผ่านโหลดสูงสุด นอกจากนี้ อาจหา I_C ได้จาก

$$I_C = (2P_{out}) / (\eta V_{in} \delta_{(max)}) \tag{2.12}$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ (อยู่ในช่วง 60% - 90%)

$\delta_{(max)}$ คือ ค่าคิวดีไซ์สูงสุดของสัญญาณพัลส์จากรวม (ความกว้างของพัลส์ / คาบเวลาของพัลส์)

ซึ่งโดยทั่วไป $\delta_{(max)}$ จะมีค่าต่ำกว่า 0.5 (≈ 0.4) แล้วแต่จะออกแบบ เช่น สมมติให้คอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพ η เป็น 0.8 และ $\delta_{(max)}$ เป็น 0.4 ก็จะได้

$$I_C = 6.25 * (P_{in} / P_{out})$$

จากลักษณะการทำงานดังที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงในคอนเวอร์เตอร์แบบนี้จะถูกขับเพียงทิศทางที่เป็นบวกทิศทางเดียว ดังกราฟ B - H ในรูปที่ 2.3 ดังนั้นแกนที่ใช้จึงต้องมีขนาดปริมาตรใหญ่เป็นพิเศษ ปริมาตรของแกนสามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ปริมาตรของแกน} = \frac{\mu_0 \mu_e I_{L(max)}^2 L_{out}}{B_{max}^2} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ_0 คือ $4\pi * 10^{-7}$

μ_c คือค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กสัมพัทธ์เทียบกับอากาศ

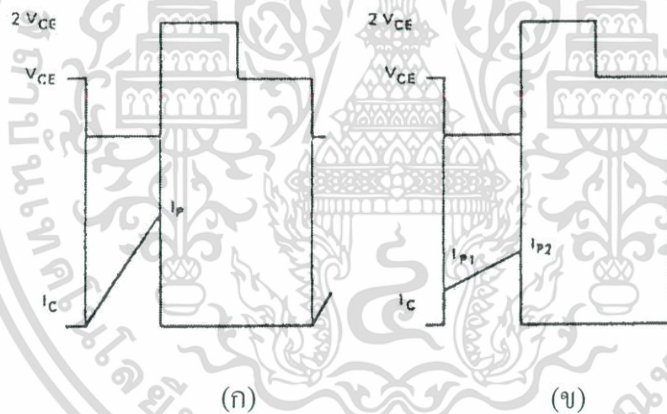
I_L คือกระแสที่จ่ายแก่โหลดสูงสุด (แอมแปร์)

L_{out} คือค่าความเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต (ไมโครเฮนรี)

B_{max} คือค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (เวบเบอร์ / ตารางเมตร)

การเลือกใช้แกนจะต้องเลือกวัสดุที่ทำแกนที่มีค่า μ_c มากเพื่อลดขนาดเทอะทะของแกน และจำนวนรอบของขดลวดลง อันจะเป็นเหตุให้เกิดเป็นความร้อนสะสมขึ้นได้

ในฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์นั้นหม้อแปลงและใช้คิมิโหมดการทำงานอยู่ 2 โหมด คือ
 (1) การส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์ (Complete energy transfer) เมื่อพลังงานทั้งหมดถูกเก็บไว้ที่ขดลวดในหม้อแปลงแล้วการส่งผ่านไปยังขดลวดทุติยภูมิก่อนที่ทรานซิสเตอร์จะปิดวงจร และ
 (2) การส่งผ่านพลังงานอย่างไม่สมบูรณ์ (Incomplete energy transfer) เมื่อพลังงานทั้งหมดไม่ได้เก็บไว้ในขดลวดที่หม้อแปลงแล้วส่งผ่านพลังงานก่อนที่ทรานซิสเตอร์จะปิดวงจร รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของโหมดทั้งสอง



รูปที่ 2.4 รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสเมื่อ

- ก) การส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์
- ข) การส่งผ่านพลังงานอย่างไม่สมบูรณ์

รูปคลื่นการส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์ ปรากฏกระแสคอลเลคเตอร์มียอดสูงมากเกิดขึ้น ขณะคาบเวลาปิดวงจรของทรานซิสเตอร์เหมือนกับค่าเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิค่าต่ำๆ ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองการสูญเสียในการพันขดลวดและกระแสกระเพื่อมที่อินพุตคาปาซิเตอร์มากขึ้น ทรานซิสเตอร์จะต้องทนกับกระแสนี้ได้ด้วย

สำหรับโหมดการส่งผ่านพลังงานอย่างไม่สมบูรณ์ตรงกันข้ามกับที่ได้กล่าวมาแล้ว ก็จะมีปรากฏกระแสคอลเลคเตอร์มียอดต่ำกว่า ขณะที่ทรานซิสเตอร์ "ON" ในความเป็นจริงแล้วขณะนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์มีการสูญเสียสูงมาก อย่างไรก็ตามก็ดีหม้อแปลง/โซ่ทางด้านขดลวดปฐมภูมิมีค่าความเหนี่ยวนำสูงก็ยังคงการใช้โหมคการทำงาน โหมคนี้เพื่อเก็บพลังงานสะสมหลังจากที่สวิทช์เปิดวงจรไปแล้วไว้ที่แกนหม้อแปลง สมมติว่าปริมาตรของการส่งผ่านพลังงานอย่างไม่สมบูรณ์ หม้อแปลงนั้นจะต้องมีปริมาตรมากกว่าการส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ตัวพารามิเตอร์ต่างๆมีค่าเท่ากัน

กฎในการออกแบบ

ขั้นตอนที่สำคัญและสมการที่จำเป็นในการออกแบบหม้อแปลง/โซ่ของฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมคการส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 1 : ยอดกระแสขดลวดปฐมภูมิ เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาเป็นอันดับแรกซึ่งมีค่าเท่ากับยอดกระแสคอลเลคเตอร์ด้วย

จากความสัมพันธ์ของแรงดัน

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.14)$$

ในโหมคการส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์กระแสจะเพิ่มจากศูนย์ถึงยอดกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงเวลา t_c เมื่อสวิทช์ปิดวงจรแรงดันอินพุทสามารถเขียนได้เป็น

$$V_{in} = L_p \frac{I_{pp}}{t_c} \quad (2.15)$$

แทน $\frac{1}{t_c} = \frac{f}{\delta_{max}}$ ดังนั้นสมการ (2.15) จะได้

$$V_{in,min} = \frac{L_p I_{pp} f}{\delta_{max}} \quad (2.16)$$

เมื่อ V_{in} = แรงดันไฟตรงอินพุท, V

L_p = ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดปฐมภูมิ, mH

I_{pp} = ยอดกระแส, A

δ_{max} = คิวตี้ไซเกิลสูงสุด, μs

f = ความถี่การสวิทช์, kHz

กำลังงานเอาต์พุทในโหมคการส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์จะเท่ากับพลังงานที่สะสมต่อเวลา 1 รอบคลื่น

$$P_{out} = \frac{1}{2} L_p I_{pp}^2 f \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หารสมการ (2.17) ด้วยสมการ (2.16)

$$\frac{P_{out}}{V_{in,min}} = \frac{L_p I_{pp}^2 f \delta_{max}}{2L_p I_{pp} f}$$

จัดสมการที่ได้ใหม่ จะได้ยออดกระแสขดลวดปฐมภูมิ

$$I_{pp} = I_c = \frac{2P_{out}}{V_{in,min} \delta_{max}} \quad (2.18)$$

ขั้นตอนที่ 2 : ความสัมพันธ์ระหว่างควิตีไซเทิลต่ำสุดและสูงสุด

ในฟลายแบ็คคอนเวอร์เตอร์การเรกยูเลตเป็นการปรับเปลี่ยนควิตีไซเทิลของสวิทซ์จึงเป็นการกำหนด δ_{min} และ δ_{max} ถ้าแรงดันอินพุทเปลี่ยนจาก $V_{in,min}$ ไปเป็น $V_{in,max}$ ดังนั้น

$$\delta_{min} = \frac{\delta_{max}}{(1 - \delta_{max})K + \delta_{max}} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$K = \frac{V_{in,max}}{V_{in,min}} \quad (2.20)$$

ขั้นตอนที่ 3 : ความเหนี่ยวนำขดลวดปฐมภูมิ หาได้จากสมการ (2.21)

$$L_p = \frac{V_{in,min} \delta_{max}}{I_{pp} f} \quad (2.21)$$

ขั้นตอนที่ 4 : เลือกขนาดที่เล็กที่สุดของแกน

จากแผ่นข้อมูลของแกน ผู้ออกแบบสามารถเลือกวัสดุและรูปทรงของแกนได้ตามความเหมาะสมของงาน ถ้าต้องการพื้นที่ขดลวดปฐมภูมิตั้งในขอบบิ้น คำนวณหาพื้นที่ในการพัน A_c และพื้นที่แกน A_c

$$A_c A_c = \frac{(6.33 L_p I_{pp} D^2) 10^8}{B_{max}} \quad (2.22)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด และ $B_{max} = \frac{B_{sat}}{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ 30 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ในบอบบิ้นนั้นเป็นการพันของขดลวดปฐมภูมิ และอีก 70 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือเป็นพื้นที่ของขดลวดทุติยภูมิกับช่องว่างอากาศระหว่างเส้นลวดและความหนาของเทปป้องกันลวดจรรวมกัน ดังนั้นในสมการ (2.22) ในเทอมขวามือจะต้องคูณด้วย 3 แต่เพื่อความปลอดภัยเราจะใช้ 4 เป็นตัวคูณ ดังนั้นในสมการ (2.22) จะกลายเป็น

$$A_e A_c = \frac{(25.32 L_p I_{pp} D^2) 10^8}{B_{\max}} \quad (2.23)$$

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณความยาวช่องว่างแกน

ฟลายเบ็คทำงานแบบ single-endedly หม้อแปลง/โช้คใช้ฟลักซ์เพียงครั้งเดียว กระแสและฟลักซ์ไม่มีทางเป็นลบ ในทางปฏิบัติจะทำให้แกนเกิดการอิ่มตัว มี 2 วิธีที่จะแก้ปัญหานี้คือ (1) ใช้แกนที่มีปริมาตรสูงๆ (2) สร้างช่องว่างในส่วนของฟลักซ์จนทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์ลดลง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ออกแบบก็จะเลือกวิธีที่ 2 เป็นวิธีการแก้ปัญหา

พลังงานทั้งหมดที่เก็บสะสมอยู่ในหม้อแปลง/โช้ค จะอยู่ในช่องว่างปริมาตร V_g ซึ่งความยาว l_g ดังนั้น

$$\frac{1}{2} L_p I_{pp}^2 = \left(\frac{1}{2} B_{\max} H V_g \right) 10^8 \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$V_g = A_e l_g$$

และ

$$\mu_0 H = \frac{B_{\max}}{0.4}$$

μ_0 = ความซึมซาบอากาศ = 1

ดังนั้นความยาวช่องว่างจะได้

$$l_g = \frac{(0.4 \pi L_p I_{pp}^2) 10^8}{A_e B_{\max}^2} \quad (2.25)$$

ถ้าใช้แกนชนิด E-E หรือชนิดที่คล้ายๆกัน จะต้องใช้หม้อแปลง/โช้คที่มีโครงสร้างแบบ Center leg เพื่อให้เกิดความยาวช่องว่างอากาศ l_g

ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ เมื่อทราบความยาวของช่องว่างแล้ว ดังนั้นจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิก็สามารถหาได้ดังนี้

$$N_p = \frac{B_{\max} I_g}{0.4 \pi I_{pp}} \quad (2.26)$$

หรือจะใช้อีกสมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_p = \frac{(L_p I_{pp}) 10^8}{A_e B_{\max}} \quad (2.27)$$

สมการ (2.26) และ (2.27) ได้คำตอบเหมือนกัน

ขั้นตอนที่ 7 : คำนวณจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

แรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ V_s สามารถคำนวณหาได้เมื่อแรงดันอินพุท (แรงดันขดลวดปฐมภูมิ) มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ควิตีแฟกเตอร์มีค่าสูงสุด สังเกตได้ว่า $V_{in, \min} = 1.4 V_{in, ac} - 20 V_{dc \text{ ripple}}$ และตกคร่อมไดโอด

แทนค่าแรงดันเอาต์พุทจากการเรียงกระแสตกคร่อมไดโอด แรงดันเอาต์พุทของขดลวดทุติยภูมิจะได้

$$V_{out} + V_D = V_{in, \min} \frac{\delta_{\max} N_s}{(1 - \delta_{\max}) N_p} \quad (2.28)$$

และ

$$N_s = \frac{N_p (V_{out} + V_D) (1 - \delta_{\max})}{V_{in, \min} \delta_{\max}} \quad (2.29)$$

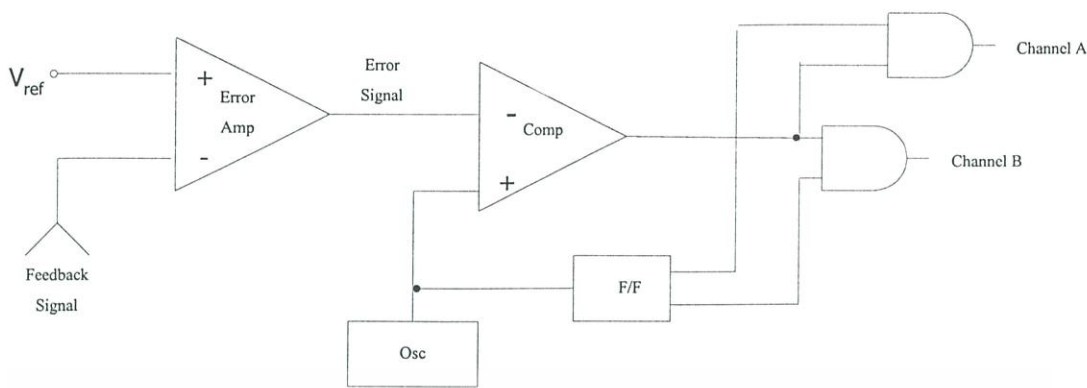
2.2.2 วงจรควบคุมการทำงานแบบพัลส์วิตมอดดูเลชัน (Pulse width modulation; PWM)

วงจรควบคุมการทำงานแบบ PWM นี้เป็นหัวใจของวงจรทั้งหมดเพราะวงจร PWM นี้จะทำหน้าที่ในการส่งพัลส์ไปกระตุ้นให้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิทซ์ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต ฯลฯ ทำการนำกระแสหรือหยุดนำกระแสตามสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งความกว้างของพัลส์นี้จะสามารถปรับให้กว้างหรือแคบได้เพื่อเป็นตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุทให้มากหรือน้อยตามไปด้วย โดยมีความถี่คงที่มีเสถียรภาพสูงในการควบคุมและในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุท

แม้ว่าเทคนิคการควบคุมสวิทซ์ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทซ์ซึ่งนี้มีอยู่หลายอย่าง แต่เทคนิคของ PWM โดยการสร้างความถี่คงที่นี้ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยปกติทั่วไป PWM จะถูกสร้างออกมาเป็นวงจรรวม (Integrate Circuits) ซึ่งโดยการรวบรวมวงจรต่างๆ ที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุม ได้แก่ เออเรอร์แอมพลิฟายเออร์ (Error Amplifier); ฟลิปฟลอป (Flip-Flop); คอมพารเตเตอร์ (Comparator); ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator); เคอเรนทลิมิตติ้ง (Current Limiting) ฯลฯ มาอยู่ในชิพ IC เดียวกันเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน

การทำงานของวงจร PWM ดังในรูปที่ 2.5 การทำงานจากรูปวงจรเออเรอร์แอมพลิฟายเออร์ มีหน้าที่รับสัญญาณจากระดับแรงดันจากเอาต์พุทของแหล่งจ่ายไฟตรงนำมาเปรียบเทียบกับ V_{ref} ที่หนดไว้แล้วทำการขยายสัญญาณเออเรอร์นี้ส่งต่อไปให้กับวงจรคอมพารเตเตอร์ วงจรคอมพารเตเตอร์มีหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณเออเรอร์ (Error signal) กับสัญญาณฟันปลา (Sawtooth) จากออสซิลเลเตอร์ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุทของคอมพารเตเตอร์จะมีรูปเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างของพัลส์ขึ้นอยู่กับสัญญาณเออเรอร์ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจรรวมของการควบคุมโดย PWM

วงจรฟลิปฟล็อปมีหน้าที่รับสัญญาณฟันปลาจากออสซิลเลเตอร์ไปทำการหาร 2 แล้วเปลี่ยนเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแล้วส่งต่อไปให้แอนดเกท (And Gate) ไปทำการขับทรานซิสเตอร์ในแต่ละช่องซึ่งจะมีสัญญาณต่างเฟสกัน 180° และสามารถปรับเปลี่ยนความกว้างของพัลส์ควิตี้ไซเคิล (Duty cycle) ได้โดยอัตโนมัติตามแต่ระดับแรงดันเอาต์พุต นั่นคือถ้าแรงดันเอาต์พุตต่ำควิตี้ไซเคิลจะกว้างขึ้นแต่เมื่อแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นควิตี้ไซเคิลก็จะแคบลง ฉะนั้นแรงดันเอาต์พุตจึงสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้เสมอ

2.2.3 เรกติไฟเออร์และฟิลเตอร์

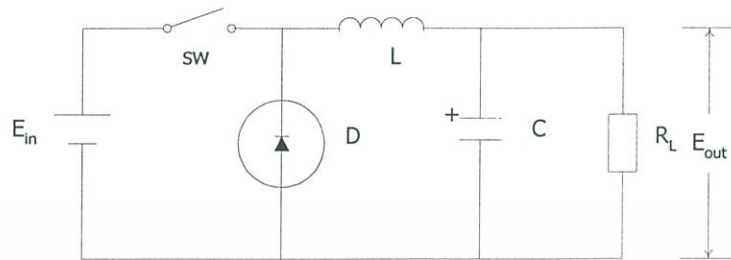
เรกติไฟเออร์และฟิลเตอร์ในส่วนนี้ เราจะกล่าวถึงเฉพาะกรณีของด้านเอาต์พุตของวงจร คือ การเรกติไฟเออร์จากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลัง (Power transformer) จากนั้นทำการกรองเพื่อให้ควิตี้ไซเคิลเอาต์พุตมีการกระเพื่อม (Ripple) น้อยที่สุด

การสวิตชิ่งทรานซิสเตอร์ของเพาเวอร์สวิตชิ่งนั้น สัญญาณที่ผ่านหม้อแปลงสวิตชิ่งจะถูกกรองเพื่อให้ได้ค่ากระแสและแรงดันตรงตามความต้องการ ในการออกแบบวงจรในส่วนนี้จึงมีความสำคัญมากพอสมควร เนื่องจากสัญญาณจากหม้อแปลงสวิตชิ่งนั้นเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงมาก (20 kHz) วงจรเรกติไฟเออร์ก็เพียงพอแล้วเพราะความถี่สูงก็จะสามารถทำให้เรียบได้ง่ายสำหรับวงจรฟิลเตอร์ ในส่วนนี้ส่วนใหญ่จะใช้แบบพายฟิลเตอร์ (Pi-Filter) เนื่องจากความถี่สูง วงจรพายฟิลเตอร์จะให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าวงจรแบบอื่น คือ คุณสมบัติของ L และ C

ในการวิเคราะห์ห้วงจรเอาต์พุตฟิลเตอร์ (Output Filter) เริ่มจากการทำงานของสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายซึ่งอาศัยการออน-ออฟของสวิตชิ่งทรานซิสเตอร์ป้อนสัญญาณให้สวิตชิ่งทรานซิสเตอร์ทางด้านปฐมภูมิและเหนี่ยวนำไปยังขดทุติยภูมิ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ขดทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงมีลักษณะเปิดพัลส์ตามจังหวะการอน-ออฟของสวิทซ์ทรานซิสเตอร์ การทำงานของเร็กติไฟายเออร์และฟิลเตอร์จึงขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตพัลส์นี้ด้วย ซึ่งเปรียบเสมือนการอน-ออฟของสวิทซ์



รูปที่ 2.6 การทำงานของวงจรฟิลเตอร์

พิจารณาช่วงที่สวิทซ์ทำงาน (On)

เป็นช่วงที่มีพัลส์เข้ามา ไดโอดทำตัวเหมือนเปิดวงจร

$$E_{in} = L \left(\frac{di}{dt} \right) + E_{out} \quad (2.30)$$

เมื่อ E_{in} : อินพุตโวลเตจ (V)

L : อินดักแตนซ์ฟิลเตอร์ (H)

I : กระแสในวงจรขณะสวิทซ์ทำงาน (On) (A)

E_{out} : ดีซีเอาท์พุทโวลเตจ (V)

จากสมการที่ (2.30)

$$\frac{di}{dt} = \frac{(E_{in} - E_{out})}{L} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31)

$$I = \left\{ \frac{(E_{in} - E_{out})}{L} \right\} \cdot t_{on} \quad (2.32)$$

พิจารณาช่วงที่สวิทซ์ออฟ (Off)

คือช่วงที่ไม่มีพัลส์เข้ามา ไดโอดทำตัวเหมือนตัดวงจร

$$L \left(\frac{di}{dt} \right) + E_{out} = 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{di}{dt} = - \frac{E_{out}}{L} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

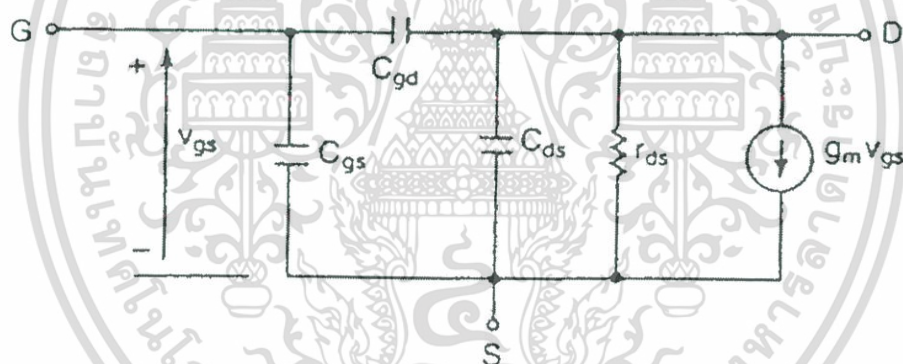
$$I = -\left(\frac{E_{out}}{L}\right) \cdot t_{off} \quad (2.35)$$

2.2.4 หลักการออกแบบแอกทีฟโวลติเมตไดโอด ทรานซิสเตอร์ และเฟต

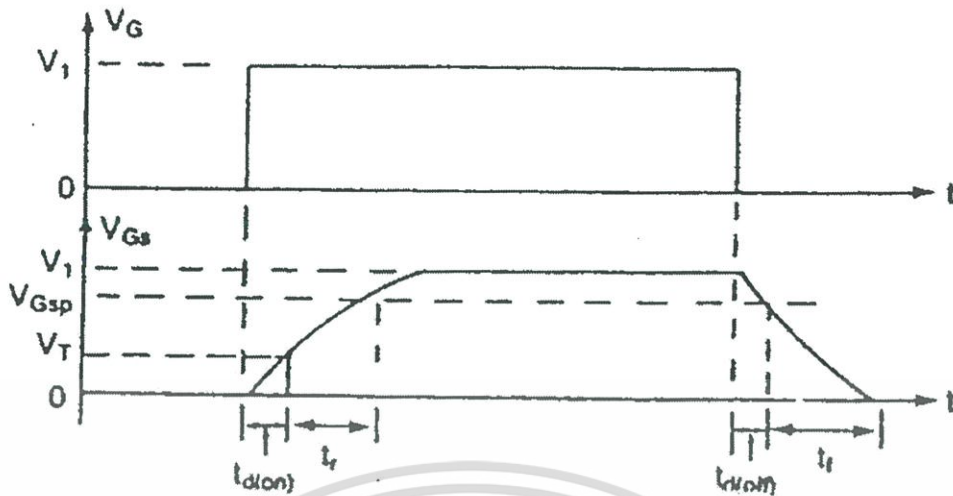
2.2.4.1 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสอินพุตต่ำมากๆ ความเร็วในการสวิตช์สูง เวลาในการสวิตช์ต่ำมากเป็นนาโนวินาที มอสเฟตไม่มีปัญหาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ Second breakdown เหมือนกับทรานซิสเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟตก็มีปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต และต้องการการเก็บรักษาเป็นพิเศษ

ลักษณะสมบัติการสวิตช์ ถ้าปราศจากสัญญาณที่เกท Enhancement-type MOSFET จะถูกพิจารณาเป็นไดโอด 2 ตัวต่อเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด npn โครงสร้างของเกทจะมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงกับซอร์ส C_{gs} และกับเดรน C_{gd} ทรานซิสเตอร์จะมีรอยต่อไบแอสกลับจากเดรนไปยังซอร์สและมีค่าความจุไฟฟ้า C_{ds} ซึ่งโมเดลสวิตช์ของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.7 รูปสัญญาณในการสวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.8



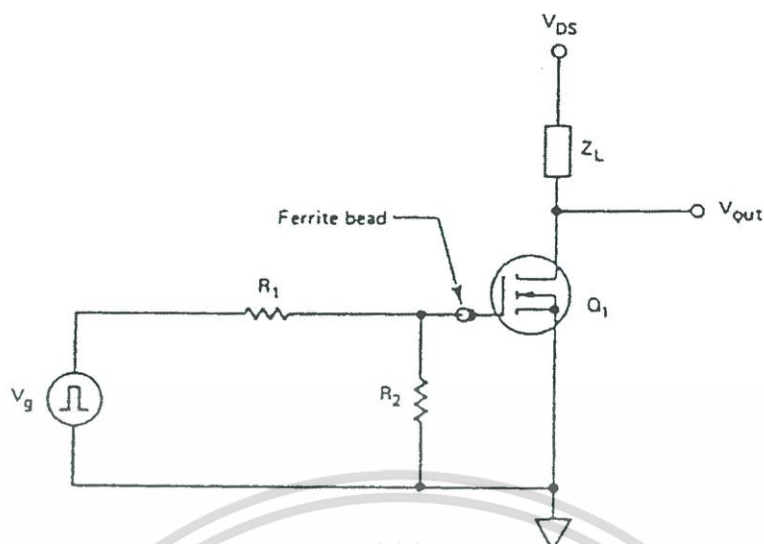
รูปที่ 2.7 โมเดลสวิตช์ของมอสเฟต



รูปที่ 2.8 รูปสัญญาณในการสวิตช์ของมอสเฟต

จากรูปที่ 2.8 turn-on delay time, $t_{d(on)}$ เป็นเวลาที่ใช้ในการประจุ C_{gs} จนแรงดันถึงระดับ threshold voltage rise time, t_r เป็นเวลาที่ใช้ในการประจุเกต จากแรงดันเริ่มต้นจนถึงแรงดันเกตสูงสุด V_{GSP} ซึ่งใช้ในการขับมอสเฟตให้อยู่ในบริเวณเชิงเส้น turn-off delay time, $t_{d(off)}$ เป็นเวลาที่ใช้ในการคายประจุเกตจากระดับแรงดันเกต V_1 จนมอสเฟตทำงานที่บริเวณ pinch-off fall time, t_f เป็นเวลาที่ใช้ในการคายประจุเกตจากบริเวณ pinch-off จนแรงดันถึงระดับ threshold-voltage ถ้า $V_{gs} < V_T$ มอสเฟตจะหยุดนำกระแส

พารามิเตอร์ในการทำงานของมอสเฟต เริ่มต้นจากการออกแบบวงจรขับเกต จากลักษณะสมบัติในการทำงานที่ดีของมอสเฟตกำลังทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงมากๆ ได้ ในการออกแบบต้องมีข้อระวังเกี่ยวกับปัญหาการรอสซิลเลทเมื่อใช้งานความถี่สูงๆ 2 ประการคือ ประการแรกความยาวของตัวนำที่ต่อไปยังขั้วของมอสเฟตจะต้องสั้นที่สุด โดยเฉพาะที่ขาเกต ถ้าไม่สามารถที่จะใช้ตัวนำที่สั้นได้จะต้องใช้เฟอร์ไรท์บีด (ferrite bead) หรือตัวต้านทานค่าต่ำๆ R_1 ต่ออนุกรมกับขาเกตของมอสเฟตดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การใช้งานมอสเฟตเป็นสวิตช์แบบคอมมอนซอร์ส

ประการที่สอง เนื่องจากมอสเฟตมีอินพุทอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก ดังนั้นแหล่งจ่ายของวงจรจับจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมากเพื่อป้องกันการป้อนกลับแบบบวกซึ่งจะนำไปสู่การเกิดออสซิลเลทได้ ณ จุดนี้ ในขณะที่ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของมอสเฟตมีค่าสูงมาก ค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนไปตามความถี่ ดังนั้นเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (fall time) ของมอสเฟตจึงขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายวงจรจับด้วย

ค่าโดยประมาณของเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงจะได้จากสมการดังต่อไปนี้

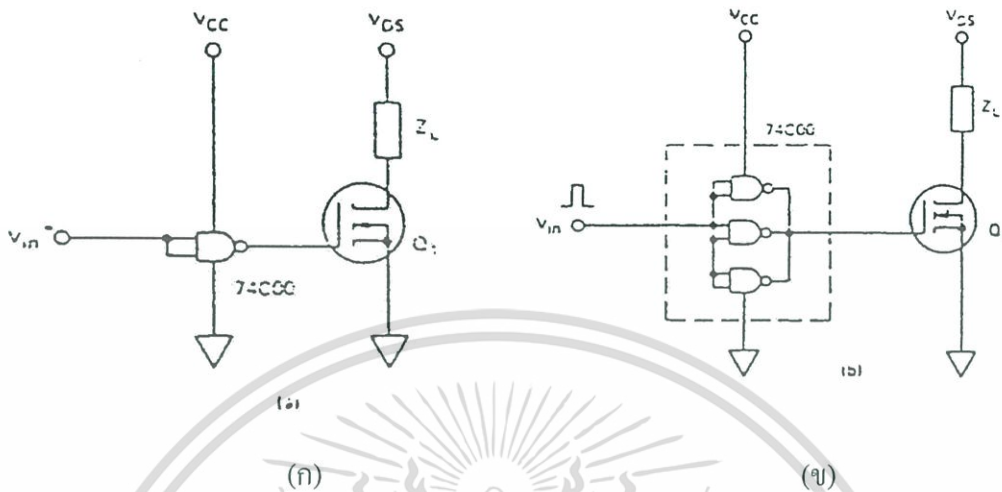
$$t_r \text{ หรือ } t_f = 2.2 R_g C_{iss} \quad (2.36)$$

- เมื่อ t_r คือ เวลาขาขึ้นของมอสเฟต, ns
 t_f คือ เวลาขาลงของมอสเฟต, ns
 R_g คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายวงจรจับ, Ω
 C_{iss} คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางด้านอินพุทของมอสเฟต, pF

จากสมการค่าที่ได้จะถูกต้องถ้า $R_2 \gg R_g$ จากรายละเอียดที่ผ่านมาประกอบกับมอสเฟตไม่มีค่าเวลาสะสม (Storage time) หรือเวลาหน่วง (Delay time) ทำให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะปรับค่าเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงได้ ค่าความต้านทาน R_2 ในวงจรใช้ในการหยุดการทำงานของมอสเฟต การจับมอสเฟตด้วย CMOS ด้วยเหตุที่มอสเฟตมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูง ทำให้สามารถใช้ CMOS มาจับได้โดยตรงดังรูปที่ 2.10 (ก) ซึ่งจะใช้เวลาขาขึ้นและเวลาขาลงประมาณ 60 ns ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดเวลาในการสวิตช์ซึ่งจะต้องใช้บัฟเฟอร์ชนิด emitter-follower หรือใช้ CMOS ที่ขนานกันมากกว่า 1 ชุดดังรูป (ข)



รูปที่ 2.10 (ก) การขับมอสเฟตด้วย CMOS

(ข) การใช้ CMOS ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสเกตได้สูงขึ้น

ข้อดีของมอสเฟตเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์

- **ควบคุมด้วยแรงดัน** เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้ในงานสวิตช์ของมอสเฟตกับทรานซิสเตอร์แล้ว สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงคือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสมบัติทางเอาท์พุท ซึ่งลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยกระแส โดยการป้อนกระแสที่ขาเบสก็จะทำให้เกิดการไหลของกระแสคอลเลกเตอร์ ส่วนมอสเฟตนั้นเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน สำหรับในการขับมอสเฟตชนิด N-channel enhancement ให้ทำงานได้นั้น จะต้องป้อนแรงดันบวกระหว่างเกตกับซอร์ส จากการทำงานของทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยกระแสทำให้ต้องใช้วงจรถับที่สามารถจ่ายกระแสเบสได้อย่างเพียงพอเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้อย่างอึดตัว ในขณะที่มอสเฟตนั้นใช้วงจรถับที่จ่ายแรงดันในการควบคุมกระแสเดรน ดังนั้นในการออกแบบวงจรถับของมอสเฟตจึงทำได้ง่ายกว่า ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า ใช้อุปกรณ์ในการสร้างน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวงจรถับของทรานซิสเตอร์
- **ความเร็วในการทำงานแบบสวิตช์สูง** มอสเฟตมีความเร็วในการทำงานแบบสวิตช์สูงกว่าทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ประเภท Unipolar ทำให้ไม่เกิดค่าเวลา Storage time เหมือนกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งค่าเวลาดังกล่าวมีผลต่อความเร็วในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์เป็นอย่างมาก

- **ไม่เกิดปรากฏการณ์ Secondary breakdown** พื้นที่ในการทำงานที่ปลอดภัยของมอสเฟตนั้นจะมากกว่าทรานซิสเตอร์ พื้นที่ในการทำงานของทรานซิสเตอร์นั้นจะถูกจำกัดด้วยปรากฏการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนุญาดให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Secondary breakdown ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสที่มากจนเกินไปและทำให้เกิดความร้อนจนกระทั่งเกิดการเบรคดาวน์ได้ แต่มอสเฟตจะไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเนื่องจากถ้ามีความหนาแน่นของกระแสมากจนทำให้เกิดความร้อนแล้วจะทำให้การเคลื่อนที่ได้อิเล็กตรอนที่ Channel นั้นลดลง เป็นผลให้กระแสที่ไหลนั้นลดลงด้วยจึงไม่เกิดปรากฏการณ์ Secondary breakdown

2.2.4.2 ทรานซิสเตอร์

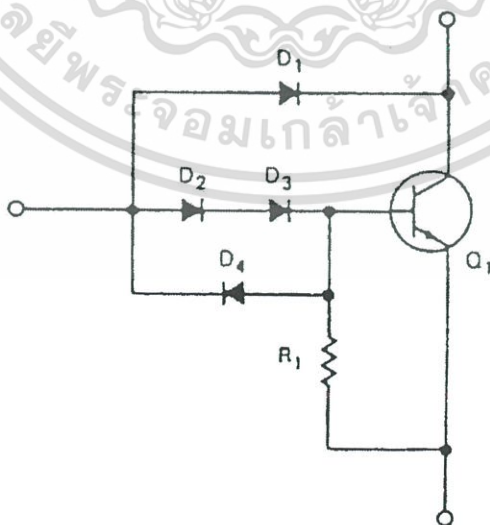
การใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิตช์ ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ต้องการกระแสในการขับเบสเพื่อควบคุมจำนวนการไหลของกระแสคอลเลกเตอร์โดยจำนวนการไหลของกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ตามความสัมพันธ์

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

(2.37)

เมื่อ I_C คือ กระแสคอลเลกเตอร์, A
 I_B คือ กระแสเบส, A

การทำงานของทรานซิสเตอร์จะแบ่งการทำงานเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะเชิงเส้น (Linear) มักใช้ในงานคำนวณวงจรรขยาย และ สภาวะอิ่มตัว (Saturation) มักใช้ในงานเป็นสวิตช์ปิด-เปิดวงจร วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์อิ่มตัว การอิ่มตัวและการเกิดช่วงเวลาสะสมจะเป็นผลทำให้ความเร็วในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ลดลง ดังนั้นวิธีหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าวจึงมีการคิดค้นเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์ซึ่งนั่นเอง



รูปที่ 2.11 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์อิ่มตัวโดยใช้ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 แสดงการใช้ไดโอดป้องกันการอิ่มตัว (Anti-saturation diodes) หรือบางครั้งเรียกว่าไดโอด Baker clamp เมื่อทรานซิสเตอร์เปิดวงจรจะเห็นว่าที่ขาเบสนั้นมีไดโอด D_2 , D_3 ต่ออนุกรมอยู่ สมมติทุกตัวมีแรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสเท่ากับ 0.7 V ดังนั้นแรงดันที่ขาเบสจะต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันอินพุท 1.4 V แต่เนื่องจากที่ขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์นั้นยังมีไดโอด D_1 ต่ออยู่อีกหนึ่งตัวก็จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสอีก 0.7 V ทำให้แรงดันคอลเลกเตอร์ต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันอินพุท 0.7 V ด้วย เพราะฉะนั้นแรงดันที่คอลเลกเตอร์จะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาเบสเท่ากับ $1.4 - 0.7 = 0.7\text{ V}$ ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะที่ไม่มีโอกาสอิ่มตัวได้เลย

ไดโอดป้องกันการอิ่มตัวนี้จำเป็นจะต้องใช้ชนิดที่มีความเร็วสูง เช่น ชนิด Fast recovery เนื่องจากความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์นั้นมีความเร็วสูงตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป ไดโอด D_2 และ D_3 ควรมีแรงดัน Reverse blocking rating ต่ำๆ แต่สำหรับไดโอด D_1 จะต้องมีค่าแรงดันไม่ต่ำกว่า $2V_{CE}$ โดยทั่วไปใช้ประมาณ 800 V PIV

ส่วนไดโอด D_4 เป็นไดโอดประเภท "Wrap-around" มีหน้าที่ดึงกระแสเบสของทรานซิสเตอร์เปิดวงจร โดยเป็นตัวคายประจุของค่าเก็บประจุระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ทำให้ช่วงเวลาสะสมลดลง

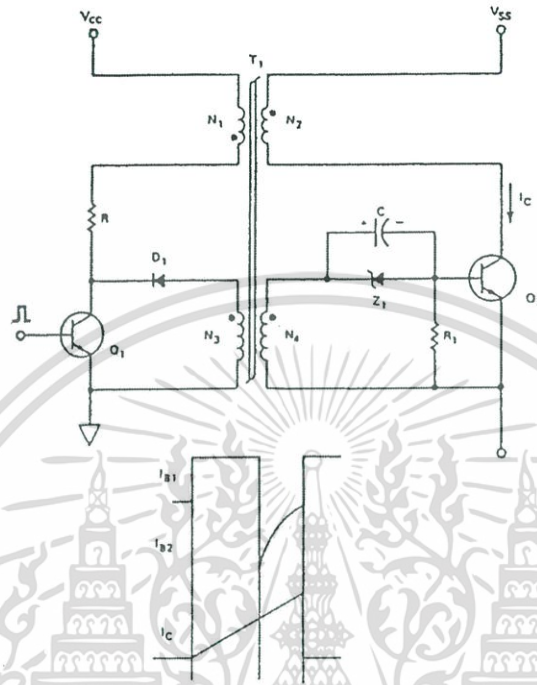
- วงจรขับกระแสคงที่ (Constant drive current circuits) ข้อจำกัดต่างๆในการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์นั้นนอกจากจะทราบถึงวิธีการหลีกเลี่ยงมิให้เกิดการอิ่มตัวโดยการควบคุมให้กระแส I_{B1} มีขนาดที่พอเพียงและลดช่วงเวลาสะสมให้น้อยที่สุดแล้วนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสวิตช์และควบคุมกระแสนอนกลับ I_{B2} ให้มีขนาดที่เพียงพอเช่นเดียวกัน

จะเห็นว่าเมื่อกระแส I_{B2} มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ช่วงเวลาสะสมและช่วงเวลาขาลงนั้นลดลง ทำให้แรงดัน V_{EB} เพิ่มขึ้นด้วย ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะทำให้พลังงาน reverse-bias secondary breakdown หรือ E_{SB} นั้นลดลงด้วย และสำหรับการออกแบบวงจรขับจะต้องคำนึงถึงเรื่องกระแสนอนกลับเป็นพิเศษ มีฉะนั้นจะเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์สวิตช์ได้เมื่อทำงานในโหมด Second breakdown ในทางปฏิบัตินั้นวงจรขับกระแสนอนกลับควรมีอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายต่ำ เพื่อที่จะเพิ่ม I_{B2} และลด V_{EB} ในค่าดัชนีทางผู้ผลิตจะบอกค่าจำกัดของแรงดันไบแอสย้อนกลับระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสได้ โดยในทางปฏิบัติจะใช้ V_{EB} ระหว่าง -2 V ถึง -5 V

- วงจรขับเบสแบบสัดส่วน (Proportional) เนื่องจากวงจรขับกระแสแบบอื่นยังมีข้อบกพร่องอีกหลายประการนั่นก็คือ จ่ายกระแสคอลเลกเตอร์ได้ต่ำ ช่วงเวลาสะสมของทรานซิสเตอร์ก็ยังไม่มีความเร็วเพียงพอ ทำให้ประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์ต่ำลง เนื่องจาก β ของทรานซิสเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง เทคนิคในการควบคุม β ของทรานซิสเตอร์ให้คงที่ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสคอลเลกเตอร์ใดๆก็ตาม เราจะใช้วงจรที่เรียกว่า "วงจรขับเบสแบบสัดส่วน" โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดช่วงเวลาสะสม ขณะที่กระแสคอลเลกเตอร์ต่ำๆ เมื่อเทียบกับการ

ใช้วงจรขับกระแสคงที่ จากวงจรขับเบสแบบสัดส่วนดังรูปที่ 2.12 มีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อไม่มีการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจร, Q_2 เปิดวงจร ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจรมันจะทำให้เกิดกระแสไหลและเก็บสะสมพลังงานในขดลวด N_1 ซึ่งถูกจำกัดกระแสโดยตัวต้านทาน R จนทำให้หม้อแปลง T_1 เกิดการอิ่มตัว



รูปที่ 2.12 วงจรขับเคลื่อนแบบสัดส่วน

เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจรพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในขดลวด N_1 ก็จะเหวี่ยงวนไปยังขดลวด N_4 เป็นผลทำให้เกิดกระแสไหลเข้าเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 และ Q_2 ปิดวงจรในที่สุดเกิดกระแสคอลเลกเตอร์ I_C ไหลผ่านขดลวด N_2 ด้วย ดังนั้นขดลวด N_2 และ N_4 ขณะนี้จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นหม้อแปลงที่จ่ายกระแส โดยทรานซิสเตอร์ Q_2 จะเปิดวงจรก็ต่อเมื่อทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจร

ดังนั้นการควบคุมให้ β ของทรานซิสเตอร์ Q_2 คงที่ หาได้จากสัดส่วนของสมการดังนี้

$$\beta = \frac{N_4}{N_2} \quad (2.38)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์เมื่อหม้อแปลงทำงานขณะ t_{on} และ t_{off} จะต้องเท่ากัน ดังนั้น

$$\Delta \phi t_{on} = \Delta \phi t_{off} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta \phi = 2B_{\max} A_C \quad (2.40)$$

เมื่อ B_{\max} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดขณะทำงาน, Gauss

A_C คือ พื้นที่ของแกน, cm^2

จากสมการ

$$N(\Delta \phi) = \frac{V}{2f(10^{-8})} \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.40) และ (2.41) เมื่อขดลวด N_1 และ N_4 ที่ควิตไซ้เกิดสูงสุด 50%

$$N_1 = \frac{V_{CC}(10^8)}{2fB_{\max} A_C} \quad (2.42)$$

$$N_4 = \frac{V_{BE}(10^8)}{2fB_{\max} A_C} \quad (2.43)$$

เมื่อ V_{BE} คือ แรงดันระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2

f คือ ความถี่ของคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน, kHz

จากสมการ (2.42) และ (2.43) จะได้สัดส่วนการพันระหว่าง N_1/N_4 เท่ากับ

$$\frac{N_1}{N_4} = \frac{V_{CC} t_{off}}{V_{BE} t_{on}} \quad (2.44)$$

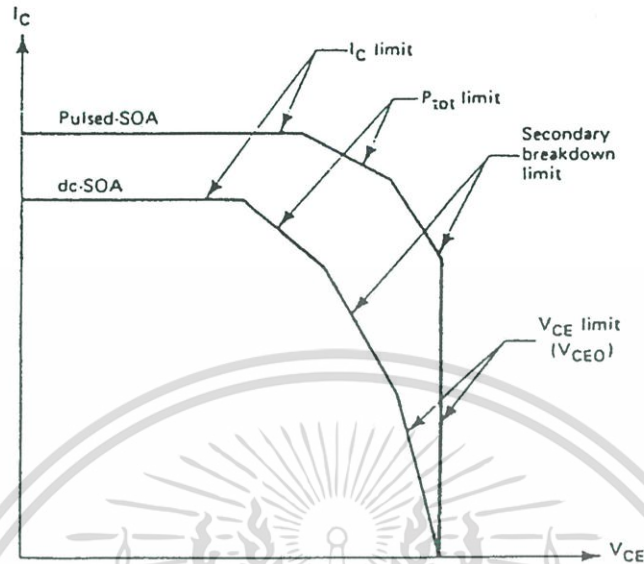
สำหรับการป้องกันมิให้ทรานซิสเตอร์สวิทช์ของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์เกิดการอิมิตัวเพื่อลดช่วงเวลาสะสม ดังนั้นวงจรป้องกันการอิมิตัวจึงเป็นการแก้ปัญหานี้ได้ดีที่สุดซึ่งอาจประยุกต์ใช้ Baker Clamp จากวงจรขับเบสพื้นฐาน และถ้าทรานซิสเตอร์สวิทช์ซึ่งนั้นต่อเนื่องเป็นวงจรคาร์ลิงตันด้วยก็จะลดไดโอดป้องกันการอิมิตัวไปได้

ปรากฏการณ์ Secondary breakdown ของทรานซิสเตอร์

- **Secondary breakdown** เมื่อป้อนไบแอสตรง วิศวกรหรือผู้ออกแบบวงจรเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ควรจะต้องพิจารณาและระมัดระวังเกี่ยวกับข้อจำกัดต่างๆของทรานซิสเตอร์สวิทช์ให้รอบคอบเสียก่อน ไม่ว่าจะเป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์ปิดหรือเปิดวงจรก็ตาม ปัญหาแรกที่ผู้ออกแบบมักพบบ่อยคือ ปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรง โดยปกติแล้วทางโรงงานหรือผู้ผลิตนั้นจะกำหนดกราฟในลักษณะของพื้นที่ทำงานที่ปลอดภัย (Safe Operating Area, SOA) เอาไว้ให้ ซึ่งในกราฟนั้นจะบอกให้ผู้ออกแบบทราบว่าขอบเขตในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์มีข้อจำกัดสูงสุดในย่านไคบ่าง กราฟนี้จะใช้พิจารณาเมื่อเส้น load line ขณะได้รับไบแอสตรงอยู่ในพื้นที่ SOA จึงจะปลอดภัย



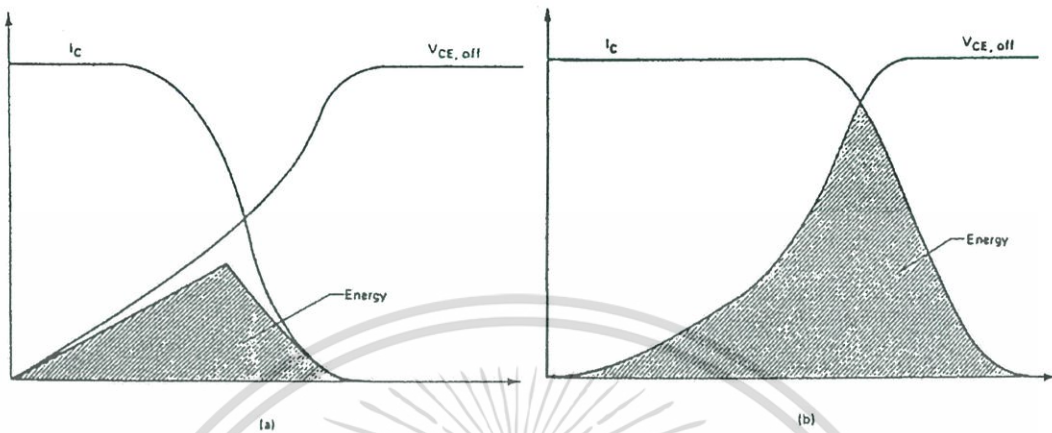
รูปที่ 2.13 SOA ของทรานซิสเตอร์

ปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรงจะเกิดเมื่อผู้ออกแบบกำหนดจุดการทำงานของทรานซิสเตอร์เกินนอกเหนือจากขอบเขตพื้นที่ SOA ทำให้ความร้อนที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลังสูงขึ้น สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์เป็นลบ ความร้อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดกำลังสูญเสียสูงขึ้นตามจนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเบรคควาน์ระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์เป็นลบด้วย ถ้าปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ยังไม่มีการแก้ไขจะทำให้รอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์พังทะลายส่งผลให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่จี๊ดจำกัด

จากผลเสียที่ได้ของปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรงจึงทำให้มีผู้คิดค้นวิธีที่จะหลีกเลี่ยงมิให้เกิดขึ้น เช่น โรงงาน National Semiconductor ได้ปรับปรุงขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์ให้สามารถทำงานที่ระดับกำลังงานและแรงดันคอลเลคเตอร์สูงสุดโดยไม่เกิดความเสียหายโดยการเพิ่ม JFET อนุกรมกับขาเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง โดยที่ JFET จะทำหน้าที่เหมือนกับ ballast resistor ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นคงที่ อุณหภูมิที่ตัวทรานซิสเตอร์จึงไม่สูงขึ้น

- **Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสกลับ** ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องช่วงเวลาสะสมและค่าสูญเสียเมื่อนำทรานซิสเตอร์กำลังไปใช้ในงานสวิทซ์ขึ้นนั้น ถ้าหากช่วงเวลาสะสมมีค่ามากเกินไปจะทำให้หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัวเป็นผลให้ย่านการเรกกูเลตถูกจำกัดให้แคบลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าสูญเสียในการสวิตช์ข้อมจะส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายทำให้ผู้ออกแบบที่ต้องการแหล่งจ่ายประสิทธิภาพสูงต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทั้งสองด้วย



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ของ I_C และ $V_{CE, off}$ ของทรานซิสเตอร์

- (a) เมื่อโหลดแบบความต้านทาน
- (b) เมื่อโหลดแบบความเหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 2.14 แสดงลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์กำลังที่แรงดันสูงขณะเปิดวงจรเมื่อใช้กับโหลดความต้านทานและโหลดความเหนี่ยวนำ สังเกตพบว่าเมื่อโหลดที่ใช้เป็นโหลดความเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดพลังงานสูงกว่า เมื่อเทียบกับโหลดความต้านทาน (พิจารณาพื้นที่แรเงา แสดงถึงพลังงานที่เกิดขึ้นนั่นเอง) ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Secondary breakdown ได้

กำลังงานขณะเกิด Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสกลับ (E_{SB}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{SB} = \frac{1}{2} L_{eff} I_C^2 \quad (2.45)$$

เมื่อ

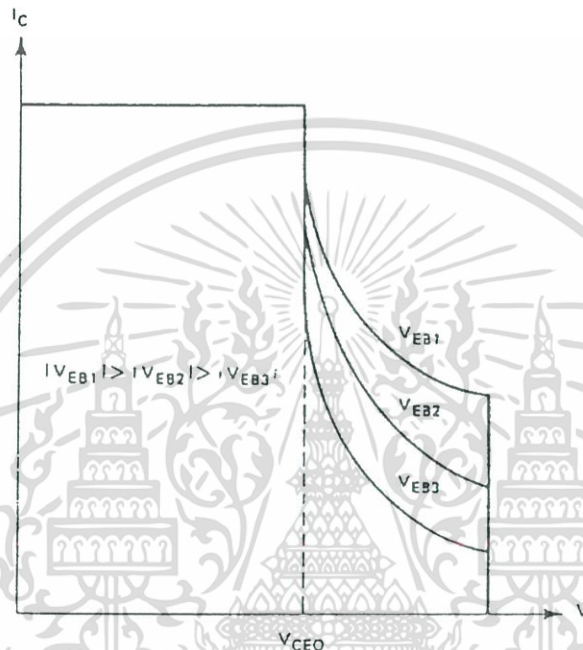
$$L_{eff} = \frac{V_{CEX}}{V_{CEX} - V_{CC}} L \quad (2.46)$$

โดยที่ E_{SB} มีหน่วยเป็นจูล ซึ่งในการทดสอบทรานซิสเตอร์จะปลดขาเบสออกหรือเพิ่มความต้านทานขาเบสให้สูงๆ และกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทำงานใกล้กับแรงดันเบรคดาวน์, V_{CEX} เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ E_{SB} (E_{SB} จะมีย่านกว้างมากระหว่างมิลลิจูลถึงจูล)

พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ (Reverse-Bias Safe Operating Area; RBSOA) แสดงในรูปที่ 2.15 คล้ายกับกรณีของกราฟ SOA สำหรับกราฟของ RBSOA แสดงเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน V_{CE} ต่ำกว่าแรงดัน V_{CEO} เป็นพื้นที่ที่ปลอดภัยจากแรงดันไบแอสกลับ V_{EB} แต่ก็ยังถูกจำกัดด้วยอัตราทนกระแสคอลเลกเตอร์ I_C ของตัวทรานซิสเตอร์เอง เมื่อใดที่แรงดัน V_{CE} มีค่าสูงเกินกว่าแรงดัน V_{CEO} พบว่ากระแสคอลเลกเตอร์จะลดลงอย่างสัมพันธ์กับแรงดันไบแอสกลับที่ป้อนเข้าไป

ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าแรงดันไบแอสกลับ V_{EB} ที่มีค่าสูงๆจะเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ขณะเปิดวงจร ผู้ออกแบบมักจะใช้ไดโอดหรือวงจร snubber เป็นตัวป้องกันปรากฏการณ์ดังกล่าว

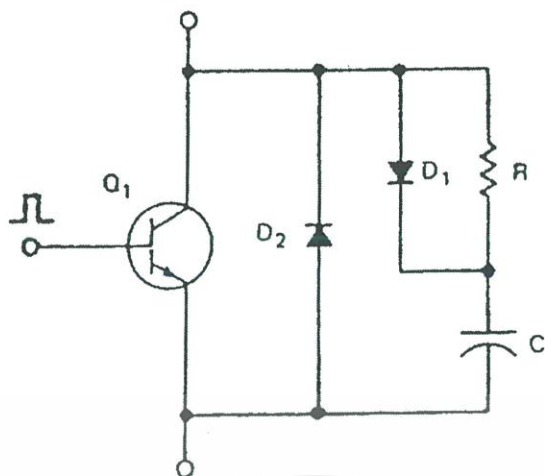


รูปที่ 2.15 พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ RBSOA

ย้อนกลับมาพิจารณาวงจรขับเบสอีกครั้ง โดยปกติแล้วกระแสเบสย้อนกลับ I_{B2} นั้นถ้ายังมีค่ามากเท่าใดก็จะทำให้ช่วงเวลาสะสมน้อยลงเท่านั้น แต่การที่ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับมีค่ามากๆ นั้น ย่อมส่งผลกระทบต่อทรานซิสเตอร์ โดยเฉพาะการพังทลายของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ได้ ในทางปฏิบัติแล้วมีวิธีป้องกันมิให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ได้โดย

- 1) ใช้ค่าแรงดัน V_{CE} ต่ำๆ ขณะที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร
- 2) ลดกระแสคอลเลกเตอร์ ขณะที่แรงดันคอลเลกเตอร์เพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้วิธีที่ 2 เป็นวิธีป้องกันมากกว่าเพราะสามารถออกแบบวงจรป้องกันได้โดยไม่ต้องยุ่งยากนัก ซึ่งวงจรในการแก้ปัญหานี้ก็คือวงจร snubber ดังรูป



รูปที่ 2.16 วงจร snubber ต่อคร่อมทรานซิสเตอร์สวิทช์

จากรูปที่ 2.16 แสดงการใช้วงจร RC snubber เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์สวิทช์เสียหายเมื่อเปิดวงจร การทำงานมีดังนี้ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจรตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุผ่านไดโอด D_1 ค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C เท่ากับ $V_{CC} - V_D$

เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจรตัวเก็บประจุ C จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ทำให้พลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนจึงเกิดขึ้นที่วงจร snubber แทนทรานซิสเตอร์สวิทช์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ปลอดภัยจากความเสียหายได้

ในการออกแบบวงจร snubber ทางปฏิบัตินั้นจะใช้รูปที่ 2.16 เป็นรูปร่างอิงสมการของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจรสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \frac{CV_{CE}^2}{2} = \frac{I_C V_{CE} (t_r + t_f)}{2} \quad (2.47)$$

- เมื่อ
- I_C คือ กระแสคอลเลกเตอร์ I_C สูงสุด, A
 - V_{CE} คือ แรงดันระหว่างคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์สูงสุด, V
 - t_r คือ เวลาขอบขาขึ้น, μs
 - t_f คือ เวลาขอบขาลง, μs

แก้สมการ (2.47) เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ C จะได้

$$C = \frac{I_C (t_r + t_f)}{V_{CE}} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุขณะที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจรและคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ขณะช่วงเวลาทรานซิสเตอร์ปิดวงจร (t_{on}) แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเขียนได้ดังนี้

$$V_C = V_{CE} \left(\frac{t_{on}}{RC} \right) \quad (2.49)$$

ในทฤษฎีจะถือว่าเมื่อตัวเก็บประจุได้เก็บประจุจนเต็มทีนั้นจะมีแรงดันใกล้เคียงกับแรงดัน V_{CE} ดังนั้นจึงต้องเลือกค่า $\left(\frac{t_{on}}{RC} \right)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งมักจะเลือกค่า RC โดยให้ตัวเก็บประจุสามารถคายประจุ ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดของการปิดวงจร (t_{on})

จากในการแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น เรามักพบว่าสามารถแทนช่วงเวลาคงที่ 5τ สำหรับตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุจนหมดผ่านตัวต้านทานโดย $\tau = RC$ สมมติว่าในกรณีนี้ตัวเก็บประจุจะเริ่มคายประจุเมื่อสิ้นสุด 3τ

ดังนั้นค่าความต้านทานสูงสุดที่ใช้ในการคายประจุหาได้จาก

$$R = \frac{t_{on}}{3C} \quad (2.50)$$

ค่าความต้านทาน R ที่คำนวณได้จากสมการ (2.50) สามารถนำมาหากระแสขณะคายประจุผ่านทรานซิสเตอร์ขณะปิดวงจร โดยจำกัดค่ามิให้เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ของกระแสคอลเลกเตอร์ $0.25 I_C$ โดยหาจากสมการ

$$I_{dis} = \frac{V_{CE}}{R} \quad (2.51)$$

ถ้าค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีค่าต่ำเกินไปทำให้กระแส I_{dis} มีค่าสูงกว่า $0.25 I_C$ ดังนั้นค่าความต้านทาน R จะต้องเลือกอีกครั้งเพื่อให้เหมาะสมตรงกับเงื่อนไขขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณกำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน

$$P_R = \frac{1}{2} CV_{CE}^2 f \quad (2.52)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ที่ใช้งานของคอนเวอร์เตอร์, kHz

2.2.4.3 หลักการออกแบบแอกทีฟเอลิเมนต์ไดโอด

ถึงแม้ว่าไดโอดชนิด Fast และ Very fast recovery นั้นจะมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสค่อนข้างสูงประมาณ 0.8-1.2 V ก็ตาม แต่ไดโอดชนิดนี้ก็มีอัตราทนแรงดันย้อนกลับสูง นิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ไดโอดชนิดนี้ในงานที่ต้องการกำลังต่ำจนถึงกำลังขนาดปานกลางให้แรงดันเอาต์พุตตั้งแต่ 12 โวลต์ขึ้นไป

เนื่องจากในปัจจุบันแหล่งจ่ายไฟตรงสวิตชิ่งจะต้องทำงานในย่านความถี่ตั้งแต่ 20 kHz เป็นต้นไป การนำไดโอดชนิด Fast และ Very fast recovery มาใช้ย่อมเป็นการช่วยลดช่วงเวลา Reverse Recovery (t_{RR}) ลงได้ ปกติแล้วจะเลือกค่า t_{RR} ของไดโอดให้น้อยกว่า t_r ของทรานซิสเตอร์สวิตชิ่งอย่างน้อย 3 เท่า ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของไดโอดชนิดนี้คือ ช่วยลดแรงดันกระชากที่เกิดจากริปเปิล (Ripple) ของแรงดันเอาต์พุตและทนต่ออุณหภูมิขณะใช้งานได้สูงถึงประมาณ 175 °C โดยส่วนมากจะแสดงในรูปแบบของกราฟใช้งานในคาตาชีทซึ่งผู้ออกแบบสามารถคำนวณกระแสเอาต์พุตขณะใช้งานกับอุณหภูมิได้โดยตรง

ความสามารถในการทนกระแสของไดโอดเรียงกระแสสำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็ค

$$I_{FM} = \frac{2I_{out}}{1 - \delta_{max}} \quad (2.52)$$

เมื่อ δ_{max} คือ ดิวตีแฟกเตอร์สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์
สมมติ δ_{max} ของคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็คเท่ากับ 0.45 ดังนั้น

$$I_{FM} = 3.6 I_{out} \quad (2.53)$$

ดังนั้นเราจะทำการคำนวณหาอัตราทนกระแสของวงจรเรียงกระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบ็คขนาด 60 วัตต์ ซึ่งจ่ายแรงดันไฟตรงได้ 25 โวลต์ กระแส 50 มิลลิแอมป์ ดิวตีแฟกเตอร์และความถี่ใช้งานเท่ากับ 0.45 และ 20 kHz ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการ (2.53) หาอัตราทนกระแสของไดโอดได้ทันที

$$\begin{aligned} I_{FM} &= 3.6 I_{out} \\ &= 3.6 (50 * 10^{-3}) \\ &= 180 \text{ mA} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นอัตราทนกระแสของไดโอดมีค่าเท่ากับ 180 มิลลิแอมแปร์

2.2.5 หลักการออกแบบวงจรมัลติพลายเออร์ 4 ระดับ

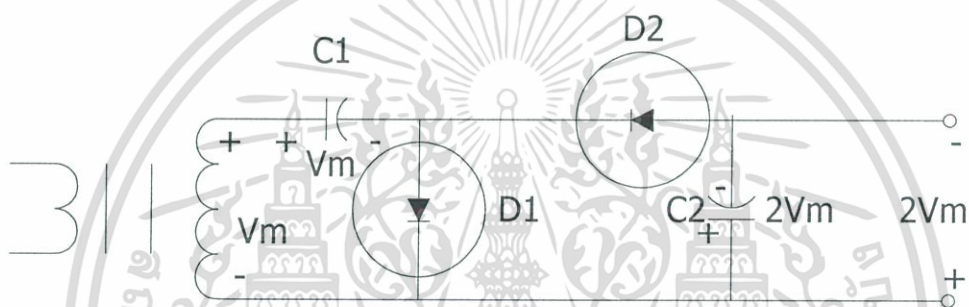
2.2.5.1 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า (Voltage multiplier circuits)

วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรเรียงกระแสที่สามารถเพิ่มแรงดัน dc ให้มีค่า 2,3,4 เท่า (หรือมากกว่า) ของแรงดันพีกหรือแรงดันสูงสุด (V_m) ของแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

- วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่า (Voltage Doubler)

วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่า มี 2 แบบคือ วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่า แบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น

- วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่า แบบครึ่งคลื่น (Half wave voltage doubler)



รูปที่ 2.17 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่า แบบครึ่งคลื่น

เมื่อรูปคลื่นแรงดันด้านบวกที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงปรากฏที่วงจร ไดโอด D_1 ได้รับการไบอัสตรงจึงนำกระแส (Conducting) ส่วนไดโอด D_2 ได้รับการไบอัสกลับจึงไม่นำกระแส (Non-conducting) เกิดการอัดประจุ C_1 จนถึง V_m ของแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ

ในช่วงสัญญาณด้านลบ D_1 ได้รับการไบอัสกลับและ D_2 ได้รับการไบอัสตรง D_2 จึงนำกระแสเกิดการอัดประจุ C_2 ทำให้ทราบว่าแรงดันตกคร่อม C_2 (V_{C2}) มีค่า $2V_m$ ดังนั้น

$$- V_{C2} + V_{C1} + V_m = 0$$

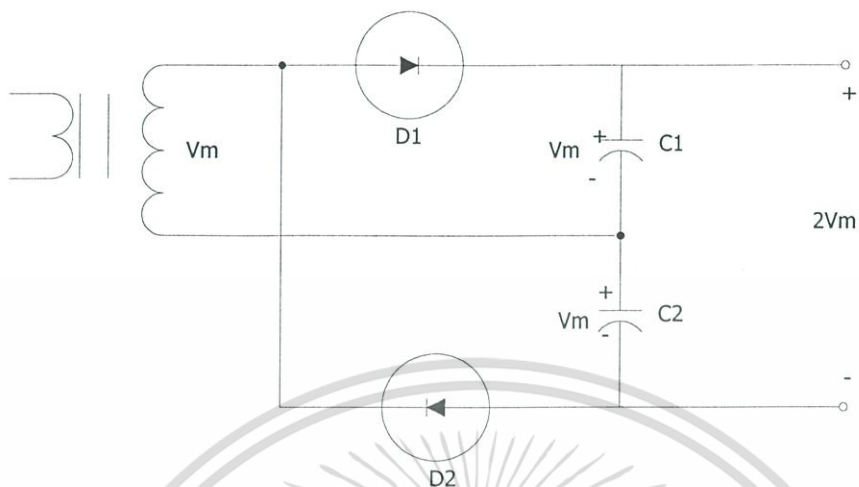
$$- V_{C2} + V_m + V_m = 0$$

$$V_{C2} = 2 V_m \quad (2.54)$$

จากหลักการข้างต้น C_1 ควรมีอัตราทนแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ V_m และ C_2 ควรมีอัตราทนแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ $2V_m$ ส่วนค่าแรงดันพีกย้อนกลับของไดโอดควรมีค่าเป็น $2 V_m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่า แบบเต็มคลื่น (Full wave voltage doubler)



รูปที่ 2.18 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่าแบบเต็มคลื่น

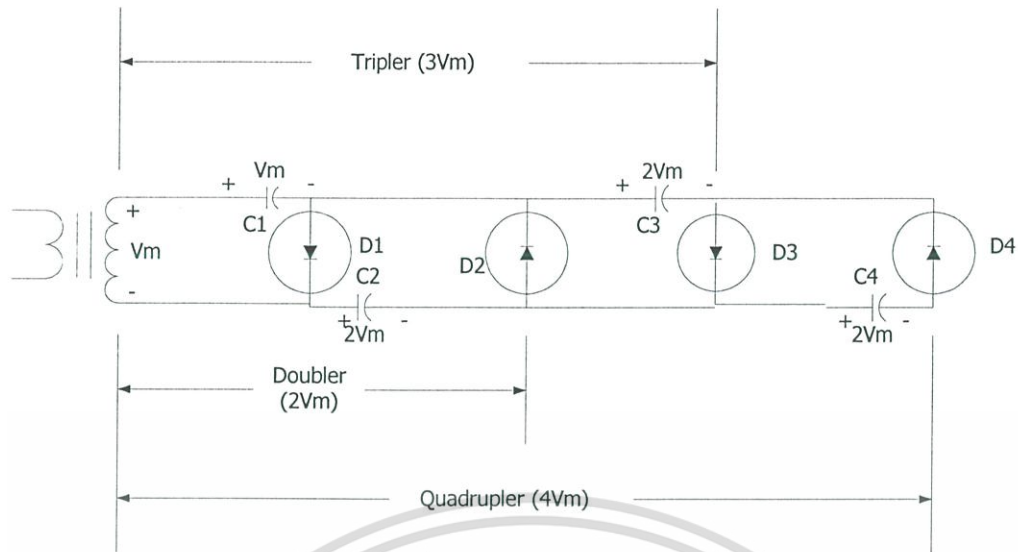
เมื่อรูปคลื่นแรงดันด้านบวกที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงปรากฏที่วงจรไดโอด D_1 ได้ รับการไบอัสตรง ส่วนไดโอด D_2 ได้รับการไบอัสกลับจึงไม่นำกระแส ทำให้ C_1 อัดประจุจนกระทั่ง มีค่า V_m ของขดลวดทุติยภูมิ

ในช่วงสัญญาณด้านลบ D_1 ได้รับการไบอัสกลับ และ D_2 ได้รับการไบอัสตรง จะเกิดการ อัดประจุ C_2 จนถึง V_m

จากหลักการข้างต้นทำให้ทราบว่า C แต่ละตัวควรมีอัตราทนแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ V_m ส่วน PIV ของไดโอดควรมีค่า $2V_m$

- วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 3 เท่าและ 4 เท่า (Voltage Triple and Quadrupler)

วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 2 เท่าแบบครึ่งคลื่นสามารถพัฒนาปรับปรุงให้เป็นวงจรทวีแรงดัน ไฟฟ้า 3 เท่าและ 4 เท่าหรือ n เท่าของ V_m ได้



รูปที่ 2.19 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 3 เท่าและ 4 เท่า

วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าเหมาะที่จะนำไปใช้กับงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงมากและกระแสไฟฟ้าที่ต่ำมาก ถ้าจำนวนแรงดันไฟฟ้าของวงจรเพิ่มขึ้นเท่าใด ค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรก็จะยิ่งลดต่ำลงเท่านั้น เช่น ในภาคแรงดันไฟฟ้าสูงในวงจรเครื่องรับโทรทัศน์หรือในเครื่องฟอตอนิก เป็นต้น

หลักการทำงานของวงจรชนิดนี้เริ่มต้นจาก C_1 ได้รับการอัดประจุผ่าน D_1 จนมีค่าถึง V_m ในระหว่างสัญญาณครึ่งไซเคิลด้านบวกของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิระหว่างสัญญาณครึ่งไซเคิลด้านลบ C_2 ได้รับการอัดประจุเป็น $2V_m$ เกิดจากผลรวมของแรงดันตกคร่อม C_1 กับแรงดันที่หม้อแปลง

ระหว่างสัญญาณด้านบวก D_3 ได้รับการไบอัสตรงแรงดันตกคร่อม C_2 อัดประจุ C_3 จนถึง $2V_m$ และเมื่อสัญญาณด้านลบเข้ามา D_2 และ D_4 จะได้รับการไบอัสตรง แรงดันจาก C_3 จะอัดประจุ C_4 จนถึง $2V_m$ ลักษณะเช่นนี้แรงดันตกคร่อมที่ C_2 เป็น $2V_m$ ที่ C_1 กับ C_3 เป็น $3V_m$ ที่ C_2 กับ C_4 เป็น $4V_m$

เพราะฉะนั้นการวัดแรงดันไฟฟ้าจากวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าด้านบนและด้านล่างของวงจร จะได้จำนวนแตกต่างกัน กล่าวคือ ถ้าเราวัดด้านบนจะได้วงจรที่มีแรงดันไฟฟ้าเป็นจำนวนเลขคี่ เช่น 3 เท่าและ 5 เท่า เป็นต้น แต่ถ้าวัดด้านล่างจะได้วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าเป็นจำนวนเลขคู่ เช่น 2 เท่า 4 เท่า ดังรูปที่ 2.19

ในที่นี้เราต้องการแรงดันไฟฟ้าให้ได้เต็มที่เรายังวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านล่าง เพราะฉะนั้นเราจึงสามารถสรุปสูตรได้ดังนี้

$$V_{out} = n * V_m \quad (2.55)$$

เมื่อ n = จำนวนตัวเก็บประจุ

V_m = แรงดันสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์และระยะในการวางอาโนดและคาโทด

3.1 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์รูปทรงต่างๆ และการเลือกรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์

3.1.1 อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 3.1 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจะจัดระยะ d_1 , d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์สามารถวัดหาได้ง่าย อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ในขณะที่เบรคดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆหลายประการ

3.1.1.1 อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กทรอนิกส์สนามสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆจุดในช่องระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = V/d \quad (3.1)$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กทรอนิกส์

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

นั่นหมายความว่า เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรคดาวน์นี้คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กทรอนิกส์นั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

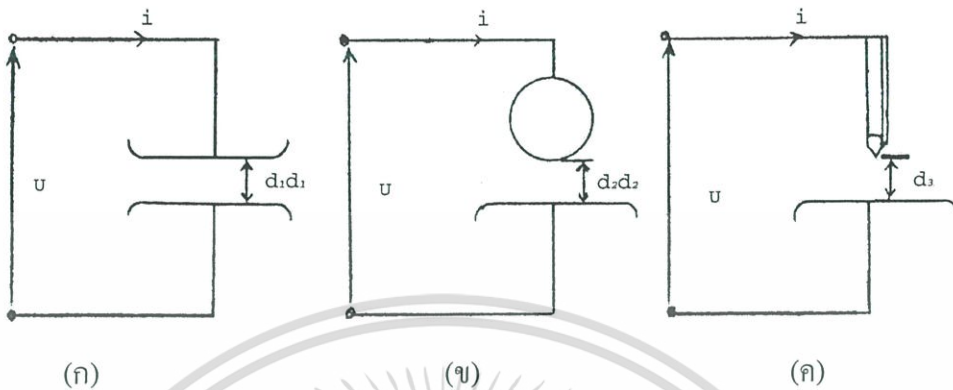
$$E_b = V_b/d$$

เมื่อ V_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆเช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในการออกแบบและเลือกรูปทรงของอิเล็กโตรดมักจะกำหนดระยะห่างของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 3.1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- (ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field)
- (ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field)

3.1.1.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดแบบนี้มีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อยคงเช่นอิเล็กโตรดในรูปที่ 3.1 ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าๆ จะได้ดังรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (3.2)$$

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

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1$$

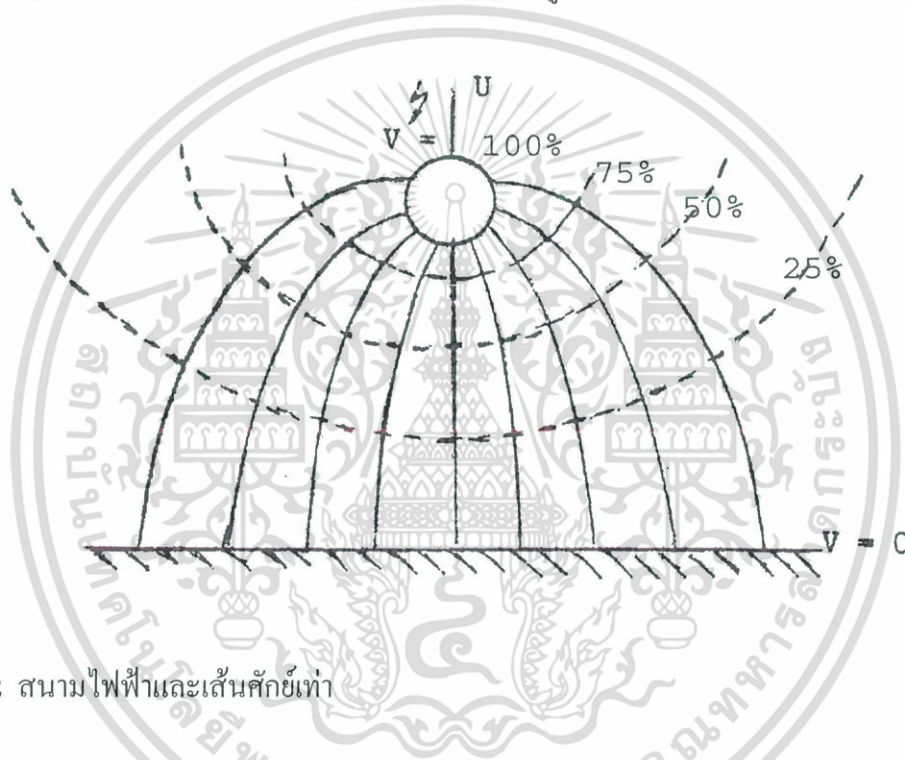
โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ V/d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ครรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้น η มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรคความระหว่างอิเล็กโตรดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ คือ

$$E_b = \frac{V_b}{d \cdot \eta^*}$$

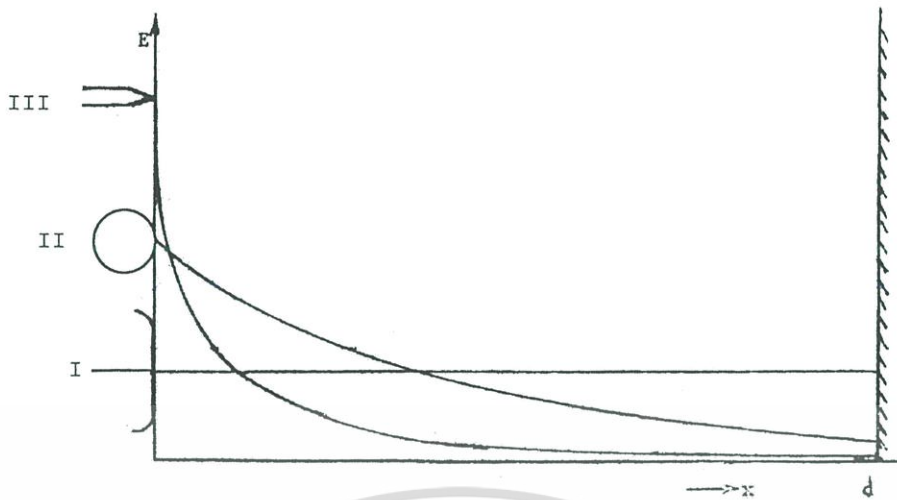
สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ก่อนเกิดเบรคความจะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลยและลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรคความทันทีที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b



รูปที่ 3.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

ในกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลม เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 3.3 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรคความ แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆ ผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ โดยที่ E เป็นความเครียดสนามไฟฟ้า และ x เป็นระยะห่างจากผิวอิเล็กโทรด

การวางตำแหน่งของอิเล็กโทรดจะถูกกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นประการสำคัญ ฉะนั้นการออกแบบรูปทรงของอิเล็กโทรดจึงควรต้องทราบรูปลักษณะและขนาดของความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อเลือกชนิดและรูปร่างแห่งเรขาคณิตได้เหมาะสมและประหยัด

3.1.2 อิเล็กโทรดรูปทรงต่างๆ

3.1.2.1 แผ่นระนาบ ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นระนาบ 2 แผ่นวางขนานกันจะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field) ซึ่งในการวิเคราะห์ตามความเป็นจริงแล้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นระนาบจะมีความซับซ้อนยุ่งยากมาก เพราะจะเกิดปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามที่บริเวณขอบหรือริมของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจะต้องทำการวิเคราะห์ในลักษณะสามมิติ ในแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นกลมขนานกันเพราะจะมีสนามไหลวนรอบในลักษณะสมมาตรรวมอยู่ด้วย

สนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแผ่นอิเล็กโทรดจะมีลักษณะโป่งพองออก อย่างไรก็ตามค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบอิเล็กโทรดจะไม่มีค่าเกินกว่า V/d หรือ

$$E = V/d$$

โดยที่

V เป็นแรงดันที่จ่ายคร่อมแผ่นขั้วอิเล็กโทรด

d เป็นระยะระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรด (ที่ขนานกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการเลือกรูปทรงของอิเล็กโทรดจะพิจารณาในส่วนที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นั่นคือส่วนที่อยู่ภายในแผ่นระนาบ ซึ่งก็เปรียบเสมือนการวิเคราะห์แผ่นอิเล็กโทรดระนาบที่ไม่มีขอบเขตจำกัดวางขนานกันนั่นเอง Rogowski ได้เสนอการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอสำหรับระบบแกนสมมาตร โดยทำการวิเคราะห์ต่อจากที่ Maxwell ได้ทำไว้ ดังนี้ [22]

$$z = a / \pi (w + 1 + e^w) \quad (3.3)$$

โดย z และ w เป็นค่าแสดงตำแหน่งเชิงซ้อน (Complex coordinates) ในระนาบ z และระนาบ w (z - and w - planes) เมื่อแทนค่า z และ w ด้วยจำนวนเชิงซ้อน $z = x + iy$ และ $w = u + iv$ จะสามารถแสดงค่า z เป็นส่วนจริงกับจินตภาพได้ดังนี้

$$x = a / \pi (u + 1 + e^u \cos v) \quad (3.4)$$

$$y = a / \pi (v + e^u \sin v) \quad (3.5)$$

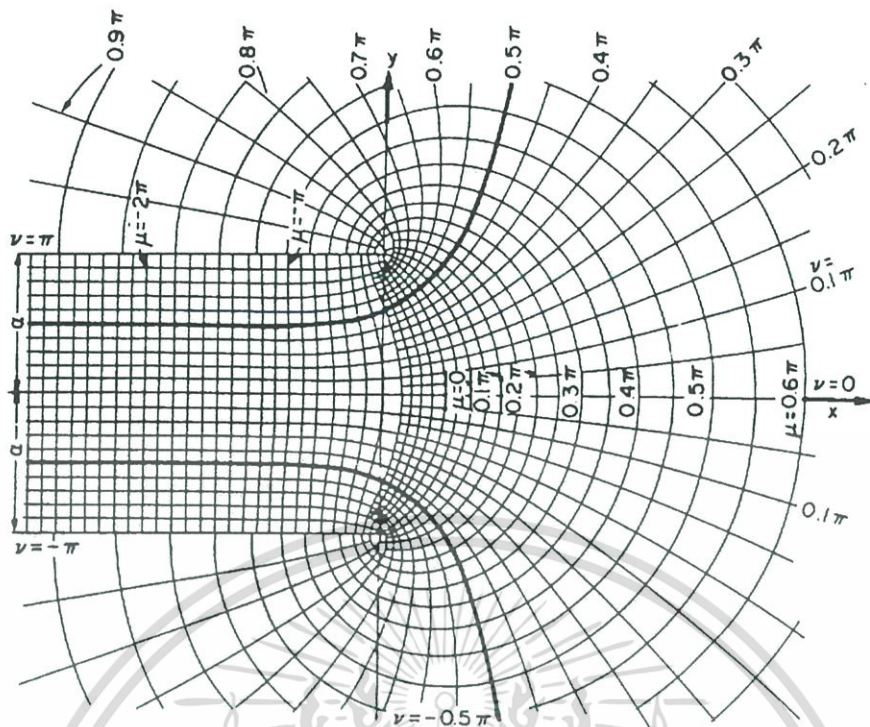
พิจารณาแผ่นระนาบที่ไม่มีขอบเขตขนานกัน 2 แผ่น ในระนาบ w วางอยู่ที่ตำแหน่ง $v = \pm \pi$ (คงที่) จากสมการ (3.4) และ (3.5) จะเห็นว่าเราสามารถแปลงแผ่นระนาบทั้ง 2 นี้ไปบนระนาบ z ได้ และจะอยู่เฉพาะซีกซ้ายของระนาบเท่านั้น เส้นต่างๆ ที่กำหนดโดย $v =$ ค่าคงที่ระหว่าง $-\pi \leq v \leq \pi$ จะใช้แสดงเส้นสมศักย์ (แนวเส้นที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน) ส่วนเส้น $u =$ ค่าคงที่ระหว่าง $-\infty \leq u \leq \infty$ จะใช้แสดงเส้นทางของสนามไฟฟ้าที่กระจายในระนาบ w โดยเส้นต่างๆที่กล่าวไปสามารถแสดงในระนาบ z ได้ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเป็นการแสดงการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นระนาบขนานกันที่สิ้นสุดที่ $x = 0$ จะเห็นว่าที่บริเวณขอบของแผ่นระนาบมีเส้นสมศักย์ของ $v =$ ค่าคงที่เบียดชิดกันหนาแน่น

ดังนั้นระนาบ $v = +\pi$ และ $v = -\pi$ มีขนาดไม่เพียงพอในการพิจารณาที่จะถือว่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรดมีความสม่ำเสมอหมดตลอด แต่สำหรับบริเวณ $u \leq -\pi$ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นสมศักย์จะค่อนข้างสม่ำเสมอขึ้นและขนาดของความเครียดสนามไฟฟ้าในระนาบ z อาจสามารถคำนวณได้จากหลายวิธี ดังแสดงต่อไปนี้

จากค่าสังยุคเชิงซ้อนของความเครียดสนามไฟฟ้าในระนาบ z

$$\begin{aligned} E_z^* &= E_x - iE_y \\ &= i \frac{dw}{dz} \\ &= i \cdot \frac{1}{dz/dw} \end{aligned} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 รูปแสดงการแปลง (Transformation) รูปสี่เหลี่ยม จักรหน้าบ - w ไปยังระนาบ - z โดยสมการ (3.3) เป็นรูปแผ่นขอบโค้งแบบ Rogowski [22]

และมีขนาดเป็น

$$|E_z| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

หรืออาจเขียนแสดงค่าสนามไฟฟ้าเป็น

$$E_z = E_x + iE_y = -\text{grad } v$$

$$= -\left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + i \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \tag{3.7}$$

ค่าสัมบูรณ์ของ E_z อาจเขียนได้เป็น

$$|E_z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2}} \tag{3.8}$$

จากสมการ (3.4) และ (3.5) จะสามารถหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าได้โดยแทนลงในสมการ (3.8) ได้เป็น

$$|E_z| = \frac{\pi}{a\sqrt{1 + e^{2u} + 2e^u \cos v}} = f(u, v) \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ค่าแรงดันคร่อมแผ่นขั้วอิเล็กโทรดต่างๆสามารถหาได้โดยพิจารณาสมมติที่เส้น $v = \pi$ มีศักย์ไฟฟ้าเป็น $\phi = v$ และเส้น $v = -\pi$ มีศักย์ไฟฟ้าเป็น $\phi = -v$ ขนาดของค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในระนาบ w จะเป็น

$$|E_w| = \frac{2V}{2\pi} = \frac{V}{\pi}$$

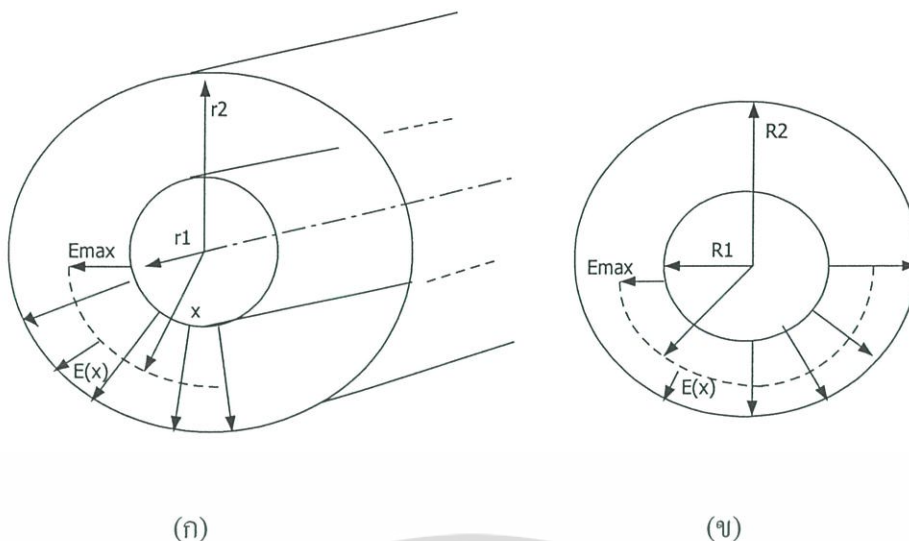
ดังนั้นขนาดของค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในระนาบ z จะเป็น $|E_w|$ $|E_z|$ หรือ

$$|E_z| = \frac{V}{2\sqrt{1 + e^{2u} + 2e^u \cos v}} \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.10) จะเห็นว่าที่ u ค่าต่างๆ ($u \leq -3 \approx -5$) จะได้ค่า $|E_z|$ ประมาณได้เป็น V/a คงที่ แต่สำหรับที่ $u = 0$ และ $v = \pm \pi$ (ที่ขอบของแผ่นระนาบ) $|E_z|$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตามมักจะพิจารณาให้ค่า $|E_z|$ จำกัดอยู่ในขอบเขตน้อยกว่าหรือเท่ากับ V/a โดยมีเงื่อนไขทั่วไปคือ $\cos v \geq 0$ หรือ v อยู่ระหว่าง $\pm \pi/2$ หรือ 90° ซึ่งแสดงด้วยเส้นหนาในรูปที่ 3.4 เรียกว่าเส้นขอบของ Rogowski (Rogowski's profile) เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าภายในขอบเขตดังกล่าว ($u \leq -3 \approx -5$ และ $\pi/2 \leq v \leq \pi/2$) จะถือว่าสนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอทั้งหมด

3.1.2.2 ทรงกระบอกแกนร่วมและทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วม (Coaxial cylindrical and spherical field)

อิเล็กโทรดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกแกนร่วม (coaxial cylindrical) และทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วม (concentric sphere) เป็นอิเล็กโทรดที่มีการใช้งานกันมาก ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในทรงกระบอกแกนร่วมและในทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วม



รูปที่ 3.5 รูปทรงของอิเล็กโทรด

(ก) รูปทรงกระบอกแกนร่วม

(ข) รูปทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วม

รูปที่ 3.5 (ก) แสดงภาคตัดขวางของทรงกระบอกแกนร่วม รัศมีภายในและภายนอกเป็น r_1 และ r_2 ตามลำดับ และมีแท่งตัวนำอยู่ที่แกนกลาง ส่วนรูปที่ 3.5 (ข) แสดงภาคตัดขวางของทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วมรัศมีภายในและภายนอกเป็น R_1 และ R_2 ตามลำดับ และมีจุดประจุอยู่ที่จุดศูนย์กลาง ในกรณีเช่นนี้สนามไฟฟ้าจะกระจายในลักษณะสมมาตรรอบแกนของทรงกระบอก และรอบจุดศูนย์กลางของทรงกลม จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 กรณี ค่าสนามไฟฟ้าจะเป็นฟังก์ชันกับระยะทาง x โดย x เป็นระยะทางตั้งฉากจากแกนกลางของทรงกระบอก และจากจุดศูนย์กลางของทรงกลม ดังรูป

แกนของทรงกระบอกแกนร่วมจะมีประจุกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอโดยมีค่าประจุต่อความยาวเป็น Q/l เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะมีทิศตามแนวรัศมี และที่ผิวทรงกระบอกของรัศมี x ใดๆ จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอด เรียกว่า พื้นผิวศักย์เท่า (Equipotential surface) จากสมการของแมกซ์เวลล์ เมื่อพิจารณาประจุภายใต้พื้นผิวปิดจะได้ว่า

$$Q = \int_S D \cdot dA \quad (3.11)$$

โดย $D = \epsilon E$ และ A เป็นพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศของ D ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^x \epsilon E \cdot 2\pi l \cdot dx \\ &= \epsilon E 2\pi l x \\ E(x) &= \frac{Q}{2\pi \epsilon l x} \end{aligned} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมระหว่างทรงกระบอกทั้งสองจะหาได้จาก

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 = V &= \int_{r_1}^{r_2} E(x) dx \\ &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \frac{1}{x} dx \\ &= \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.12) และ (3.13) จะได้ว่า

$$E(x) = \frac{V}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \frac{1}{x} \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.14) จะเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าไม่ขึ้นกับค่า l และ ϵ แต่จะขึ้นกับค่า x และเราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดได้ที่ $x = r_1$ หรือที่ผิวทรงกระบอกที่อยู่ด้านในดังสมการ

$$E_{\max} = \frac{V}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \frac{1}{r_1} \quad (3.15)$$

หรือ

$$E_{\max} = \frac{V}{(r_1 - r_2)} \cdot \frac{(r_1 - r_2)}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

ดังนั้นในทรงกระบอกแฉกนร่วม การกระจายของสนามไฟฟ้าจะมีค่า \forall เป็น $\frac{r_1 - r_2}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$

เมื่อพิจารณาสมการ (3.15)

ส่วนในทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วมจะมีจุดประจูดอยู่ที่จุดศูนย์กลางเป็น Q และที่พื้นผิวรัศมี x ใดๆ จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดพื้นผิว (Equipotential surface) เมื่อพิจารณาประจุภายในพื้นผิวปิดจาก

$$Q = \int_s D \cdot dA = \int_s \epsilon E \cdot dA$$

โดย E ตั้งฉากกับ dA จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q &= \epsilon E \cdot \int_s dA \\ &= \epsilon E \cdot 4\pi x^2 \\ E(x) &= \frac{Q}{4\pi\epsilon \cdot x^2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่รัศมี x ใดๆ จะได้

$$\begin{aligned} V(x) &= E(x)x \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon \cdot x} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าที่ระยะอนันต์จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ และที่จุดศูนย์กลาง ($x = 0$) จะมีศักย์เป็นอนันต์ และเราสามารถหาศักย์ระหว่างผิวทรงกลมทั้งสองได้เป็น

$$V_1 - V_2 = V = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.17)$$

จากสมการ (3.16) และ (3.17) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$E(x) = \frac{V}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) x^2} \quad (3.18)$$

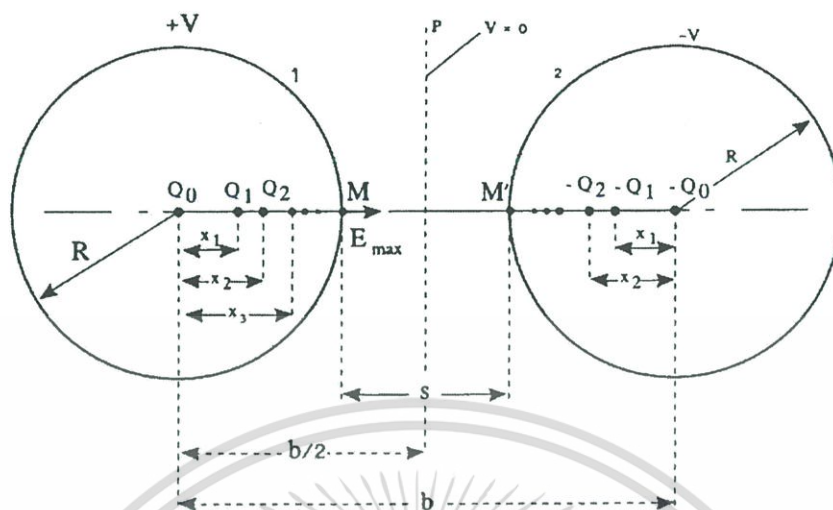
จะเห็นได้ว่าที่ค่า x น้อยๆ ค่า $E(x)$ จะมาก และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่จุด $x = r_1$ หรือที่ผิวทรงกลมที่อยู่ด้านใน ดังสมการ

$$\begin{aligned} E_{\max} &= \frac{V}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) r_1^2} \\ &= \frac{V}{(r_2 - r_1) \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \end{aligned} \quad (3.19)$$

ดังนั้นจะได้ว่าในทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วมจะมีค่า η ในการกระจายของสนามไฟฟ้าเป็น r_1 / r_2 เมื่อพิจารณาทรงกระบอกแกนร่วมและทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วมที่รัศมีภายในและภายนอกเท่ากัน ($r_1 = R_1$ และ $r_2 = R_2$) จะเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{\max}) ในอิเล็กโทรดแบบทรงกลมจุดศูนย์กลางร่วมจะมีค่าสูงกว่าแบบทรงกระบอกแกนร่วม เพราะค่า $\ln(A_1 / A_2)$ จะมีค่ามากกว่า $(1 - A_1 / A_2)$ เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 อิเล็กโตรดทรงกลม (Sphere)



รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลม

รูปที่ 3.6 จะแสดงทรงกลมรัศมี (R) เท่ากัน 2 ลูก วางห่างกันในระยะที่จุดศูนย์กลางห่างกัน b มีศักย์เป็น $+V$ และ $-V$ ตามลำดับ การวิเคราะห์จะถือว่าสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสมมาตรระหว่างอิเล็กโตรด โดยอ้างอิงกับระนาบสมมติ P ซึ่งวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดที่ระนาบ P นี้จะมีศักย์เป็นศูนย์ ประจุที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมทางซ้ายมือ (1) จะเป็น Q_0

$$Q_0 = 4\pi\epsilon_0 R V \quad (3.20)$$

เมื่อไม่คิดทรงกลมทางขวามือ (2) จะได้ว่าที่ผิวของทรงกลมจะมีศักย์เท่ากันตลอด เมื่อวางทรงกลมทางขวาซึ่งมีประจุ $-Q_0$ ลงไป จะเกิดสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสมมาตรระหว่างทรงกลมขึ้น โดยอ้างอิงกับระนาบ P แต่ประจุนี้อาจทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากันที่ผิวทรงกลมที่สมมติขึ้น การวิเคราะห์ทำโดยสมมติให้มีประจุสมมติ $+Q_1$ และ $-Q_1$ ในทรงกลมทั้งสอง ที่ระยะห่างคงที่จากจุดศูนย์กลางทรงกลม วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์ปัญหาของสนามไฟฟ้าเรียกว่าเทคนิคประจุจำลอง (Image charge technique) เมื่อมีประจุ $-Q_0$ ที่ทรงกลมทางขวา (2) ทำให้ศักย์ที่ผิวของทรงกลมทางซ้าย (1) ไม่เท่ากันตลอดผิว ประจุสมมติ $+Q_1$ ที่จะชดเชยค่า $-Q_0$ จะหาได้จาก

$$|Q_1| = Q_0 \frac{R}{b} = 4\pi\epsilon \cdot R V \frac{R}{b} \quad (3.21)$$

โดยประจุสมมติ $+Q_1$ นี้จะวางที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง x_1 ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_1 = \frac{R^2}{b}$$

เมื่อพิจารณาประจุ $+Q_0$ และ Q_1 ในทรงกลมซ้ายมือ (1) และประจุ $-Q_0$ นอกทรงกลมจะได้ ศักย์ที่ผิวทรงกลม (1) เท่ากันตลอดเป็น $+V$ แต่จะต้องเพิ่มประจุสมมติ $-Q_1$ ภายในทรงกลมทางขวามือ (2) ด้านในการที่จะทำให้สนามไฟฟ้าสมมาตรที่ระนาบ P และประจุ $-Q_1$ นี้ก็จะมีผลให้ศักย์ที่ผิวทรงกลมไม่เท่ากันอีก การชดเชยก็คือ สมมติประจุขึ้นมาอีกเป็น $+Q_2$ ภายในทรงกลมทางซ้ายมือ (1) และจะมีประจุ $-Q_2$ ในทรงกลมทางขวา (2) อีกเช่นกัน โดยมีขนาดเป็น

$$\begin{aligned} |Q_2| &= Q_1 \frac{R}{(b-x_1)} \\ &= 4\pi\epsilon_0 RV \frac{R}{(b-x_1)} \cdot \frac{R}{b} \end{aligned} \quad (3.22)$$

ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง

$$x_2 = \frac{R^2}{(b-x_1)}$$

ประจุสมมติจะถูกเพิ่มลงไปเรื่อยๆ เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมเท่ากัน ดังรูปที่ 3.6 ศักย์ไฟฟ้าหรือความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมทั้งสองสามารถคำนวณได้จากประจุดังกล่าวที่วางในตำแหน่งต่างๆ อ้างอิงกับจุดศูนย์กลางของทรงกลม ค่าที่จะสนใจคือค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งจะเกิดที่ระยะระหว่างทรงกลมสั้นที่สุด $M-M'$

ที่ระยะห่างจากทรงกลม r ใดๆ จะมีศักย์เป็น ϕ ซึ่ง ϕ จะแปรผันโดยตรงกับ $1/r$ ค่าสนามไฟฟ้า $E(r)$ ที่จุดนี้จะหาได้จาก

$$E(r) = -\text{grad } \phi$$

ซึ่งแปรผันกับ $1/r^2$ ค่าความเข้มสนามทั้งหมดของทรงกลมจะหาได้จากผลรวมของความเข้มสนามของแต่ละประจุสมมติภายในทรงกลมรวมกัน ดังนั้นค่าความเครียดสนามสูงสุดที่จุด M และ M' จะหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} E(R) = E_{\max} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{n=0}^2 \frac{Q_n}{(R-X_n)^2} + \sum_{n=0}^2 \frac{Q_n}{(b-R-X_n)^2} \right\} \\ &= RV \sum_{n=0}^2 \left\{ \pi_{k-1}^n \left[\frac{R}{R-X_{k-1}} \right] \right\} \left\{ \frac{1}{(R-X_n)^2} + \frac{1}{(b-R-X_n)^2} \right\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

โดย

$$Q_n = \frac{Q_{n-1}R}{(b-X_{n-1})} = 4\pi\epsilon_0 RV \pi_{k-1}^n \left[\frac{R}{b-X_{k-1}} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_n = \frac{R^2}{(b - X_{n-1})} \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$X_0 = 0$$

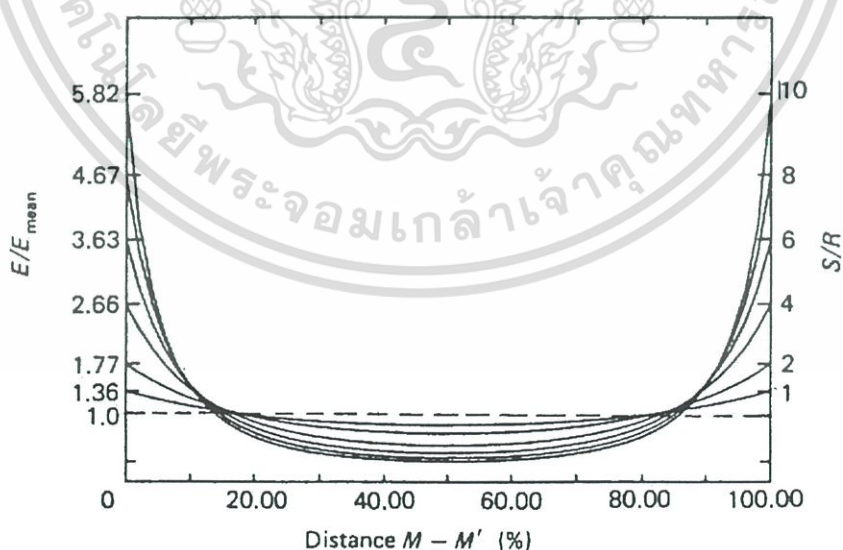
สมการ (3.23) นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณค่าความเข้มสนามที่จุดใดๆ ระหว่างระยะ $M - M'$ ได้อีกด้วย โดยค่า R ในส่วน $(R - X_n)^2$ และ $(b - R - X_n)^2$ จะถูกแทนด้วยระยะทางจากจุดศูนย์กลางของทรงกลม (1) และจุดที่พิจารณาจะอยู่ระหว่างจุด M กับระนาบ P หรือ $R \leq X \leq b/2$

จากสมการ (3.23) เมื่อพิจารณาให้ $S > R$ จะสามารถประมาณค่าความเครียดสนามสูงสุด (E_{\max}) ได้เป็น

$$E_{\max} \approx 0.9 \frac{V}{s/2} \cdot \frac{R + s/2}{R} \quad (3.24)$$

โดย $s = b - 2R$ เป็นระยะห่างระหว่างทรงกลมหรือเท่ากับระยะ $M - M'$ และ V เป็นศักย์ไฟฟ้าของทรงกลมดังในรูปที่ 3.6 หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ระหว่างทรงกลมสองลูก

สมการสนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมสองลูกสามารถใช้ได้กับสนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมกับแผ่นระนาบได้โดยค่า $s/2$ เป็นระยะห่างของผิวทรงกลมกับแผ่นระนาบ และ V เป็นความต่างศักย์ของทรงกลมกับแผ่นระนาบ



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างระยะ $M - M'$ ของอิเล็กโทรด

ทรงกลม 2 ลูกในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่จะคำนวณสนามไฟฟ้าสูงสุด (จากสมการ (3.23)) นั้น จะต้องใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข ด้วยคอมพิวเตอร์ และจะได้ค่าสนามไฟฟ้าในช่วงระหว่างระยะทางที่สั้นที่สุด $M-M'$ รูปที่ 3.7 แสดงค่าที่คำนวณได้ที่ระยะต่างๆของ $M-M'$ จะเห็นได้ว่าความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน S/R เพิ่มขึ้น

3.2 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์

3.2.1 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบ

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยให้การมองภาพรวมในการออกแบบสร้างหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเป็นไปได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ทั้งยังช่วยในการประหยัดเวลามากยิ่งขึ้น ทำให้ทราบถึงทิศทางการกระจายและขอบเขตของสนามไฟฟ้า ทั้งนี้จะช่วยในการคำนวณออกแบบลักษณะรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ได้รวดเร็วและสะดวกมากยิ่งขึ้นด้วย ซึ่งวิธีการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นทำได้ดังนี้ [20]

ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

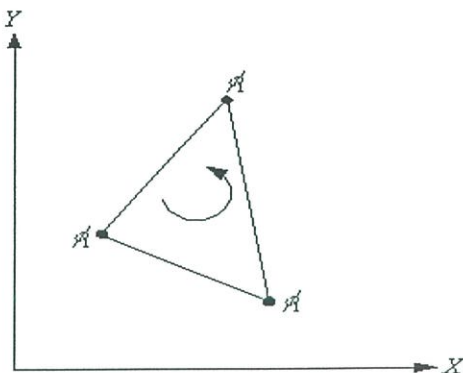
1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังรูปที่ 3.8 ขอบเขตดังกล่าวของปัญหานั้นแตกต่างกัน



รูปที่ 3.8 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่างๆ

2. การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element interpolation function) ยกตัวอย่างเอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วยจุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 โดยจุดต่อนี้เป็นตำแหน่งที่ไม่รู้ค่า ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าเหล่านี้อาจเป็นตัวแปรอะไรก็ได้ที่ต้องการหา เช่น ต้องการหาคัดดาที่เกิดขึ้น ณ จุดต่อนั้นๆ หากความหนาแน่นของกระแส ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เอลิเมนต์แบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อที่มีตัวไม่รู้ค่า

ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (3.25)$$

โดยที่ $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ สมการ (3.25) สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)} \quad (3.26)$$

โดยที่ $[N]$ คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในวิชานี้พจน์นี้สัญลักษณ์ $[]$ หมายถึงเมทริกซ์แถวอน $\{ \}$ หมายถึง เมทริกซ์แถวตั้ง

3. การสร้างสมการเอลิเมนต์ ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง ดังรูปที่ 3.9 อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.27) เขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (3.28)$$

4. การนำสมการแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาเขียนใหม่ทำให้ได้ระบบสมการขึ้นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

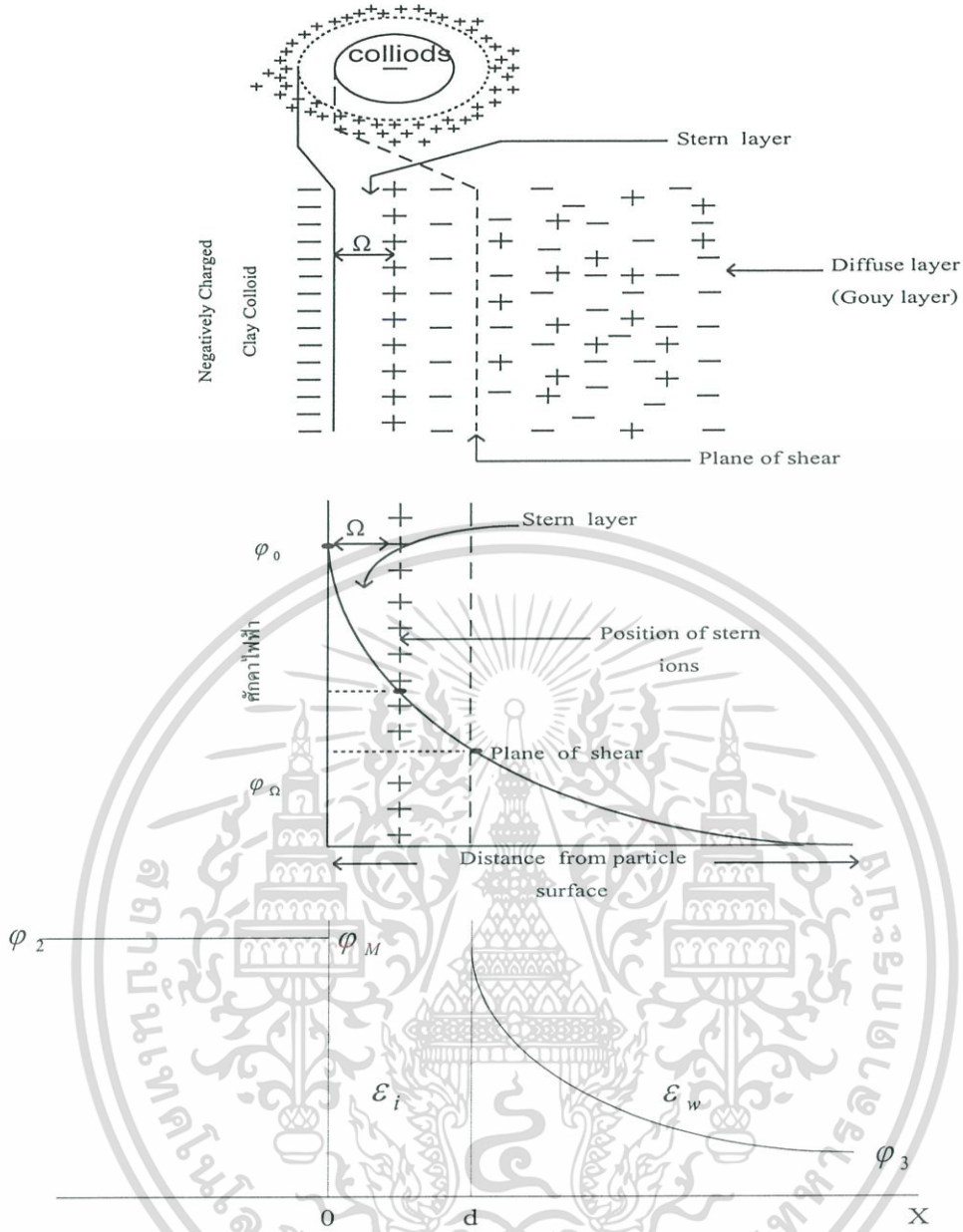
$$\sum (\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (3.29)$$

5. ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ลงในสมการ (3.25) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่ติดต่อ ซึ่งอาจจะเป็นค่าของศักดา ณ ตำแหน่งโครงสร้างนั้นๆ หรือค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ จุดต่อต่างๆ เป็นต้น

6. เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่นเมื่อรู้ค่าของศักดาไฟฟ้าก็สามารถหาค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้งหมดนี้จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนที่สำคัญอยู่ในขั้นตอนที่ 3 นั้นเอง

การออกแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะอาศัยทฤษฎี Electric double layer ในแบบจำลองของ Stern-Gouy-Chapman [3] ในรูปที่ 1.1 มาประกอบการอธิบายเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆอนุภาคโปรตีนและพฤติกรรมแรงผลักรวมและแรงดูด (Attraction) ระหว่างอนุภาค โดยได้จำกัดขอบเขตประจุไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าที่กระจายตัวในแถบของชั้นกระจาย (Distribution) ด้วยการแก้ปัญหาสมการทางไฟฟ้าและทางสถิติของเทอร์โมไดนามิกส์ผลที่ได้จะอ้างอิงแบบจำลอง Stern-Gouy-Chapman



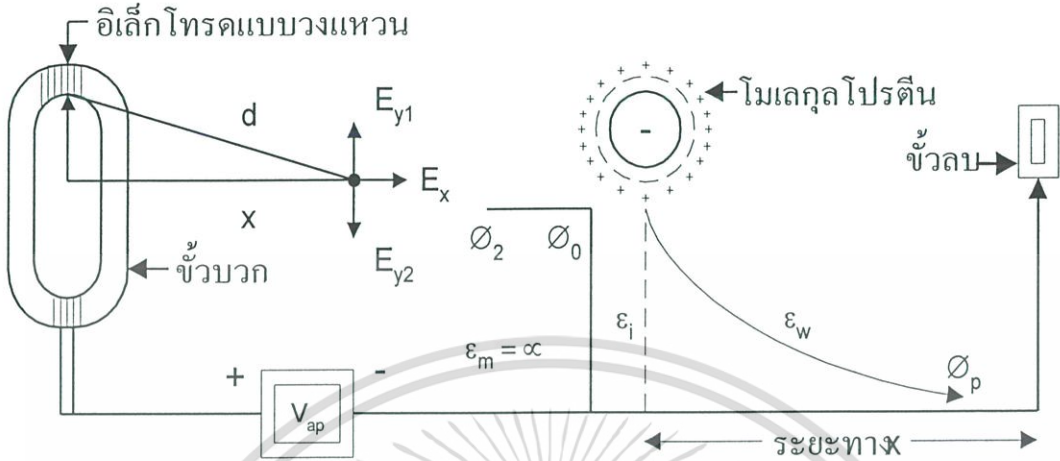
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการกระจายของประจุที่มีเปลือกอนุภาคคอลลอยด์ (Stern-Gouy-Chapman)

จากรูปเป็นการอธิบายโครงสร้างส่วนต่างๆของอนุภาคคอลลอยด์โดยยกตัวอย่างเป็นโครงสร้างของดินเหนียว จากรูปที่ 3.10 (ค) การเปลี่ยนแปลงจาก ϕ_2 และ ϕ_3 นั้นอยู่ในพื้นผิวที่มีระยะที่จำกัด ศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบ $x = 0$ คือ $\phi_M = \phi_2$ ส่วน $x > 0$ กำหนดด้วยสมการที่เรียกว่า Poisson-Boltzmann ดังนี้

$$\text{div} \bar{D} = \text{div} \epsilon \bar{E} = \rho \tag{3.30}$$

เมื่อ \bar{D} เป็นเวกเตอร์ของ Dielectric displacement และ ρ เป็นความหนาแน่นของประจุบริเวณนั้น (คือจำนวนของประจุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) จะได้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi \tag{3.31}$$



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการเริ่มต้นการประมาณค่าพารามิเตอร์จากการวางตำแหน่งอิลเล็กโทรดระหว่างหน้ากับโปรตีน

จากรูปที่ 3.11 การกระจายของศักย์ไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวของอิลเล็กโทรดและโปรตีน ซึ่งช่วงระหว่าง $x = 0$ และ $x = d$ จะสมมติว่าไม่มีประจุใดๆและมีค่า Permittivity เป็น ϵ_i ซึ่งแตกต่างจาก ϵ_w และอาจจะเป็นฟังก์ชันของทิศทาง การกำหนดตำแหน่งของชั้น ϵ นั้นจะใส่ค่าของแต่ละเฟสในแถบด้านใน $0 \leq x \leq d$ และอาจพิจารณาภายหลัง เริ่มพิจารณาช่วง $x > d$ จะได้จากสมการ (3.27) และ (3.28)

$$\text{div}(\epsilon \text{ grad } \phi) = -\rho \tag{3.32}$$

สำหรับช่วง $x > d$ ที่ $\epsilon = \epsilon_i$ คงที่

$$\text{div grad } \phi = \nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_o \epsilon_r} \tag{3.33}$$

เมื่อ ∇^2 เป็น Laplace operator = $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ และ $\epsilon_r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_o}$

ในช่วงที่ $x > d$ นั้น อีออนจะได้รับอิทธิพลจากศักย์ไฟฟ้าของสนามไฟฟ้าสถิตในบริเวณนั้น ซึ่งถ้าพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีการสะสมของกลุ่มประจุบวกและลบจะสามารถกำหนดด้วยสมการ Boltzmann จะได้ว่า

$$n_i = n_i^o = \exp\left(-\frac{w_i}{kT}\right) \tag{3.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ω_i คืองานที่ทำการนำไอออนชนิด i ขึ้นจากสารละลายที่ $\phi = \phi_3$ ไปยังตำแหน่งใน double layer ที่ศักย์ไฟฟ้าเป็น i และ n_i^0 เป็นกลุ่มสารประกอบชนิด i ซึ่งการประมาณเริ่มแรกจะสมมติว่า

$$\omega_i = z_i e (\phi - \phi_3) = z_i e \varphi \quad (3.35)$$

เมื่อ

$$\varphi = \phi - \phi_3 \quad (3.36)$$

ความหมายก็คือ เฉพาะงานที่ใช้ในการนำไอออนเข้าใกล้พื้นผิวเป็นงานทางไฟฟ้าหรือไอออนเคลื่อนที่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า ซึ่งจะไม่สนใจพลังงานหรือผลกระทบใด ๆ รอบๆ ไอออนหรือการสร้างโซลในตัวทำละลาย หรือชั้นกระจายของไอออนอื่น ซึ่งการกำหนดที่ทำได้ง่ายที่สุดคือการกำหนดเป็นประจุชนิดจุดและปริมาตรความหนาแน่นของประจุ ρ กำหนดด้วย

$$\rho = \sum_i n_i z_i e \quad (3.37)$$

เมื่อผลรวมแสดงชนิดของไอออนทั้งหมด และวาลেনซ์ Z_i อาจเป็นค่าบวกหรือลบก็ได้ จากสมการ (3.28) ถึง (3.32) สมมติให้ ϕ_3 มีค่าคงที่จะได้ว่า

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \sum_i n_i^0 z_i e \exp(-z_i e \varphi / kT) \quad (3.38)$$

สมการที่ (3.38) นี้ เป็นสมการ Poisson-Boltzman ที่อ้างอิงมาตั้งแต่แรกซึ่งเป็นสมการหนึ่งจากสมการที่สำคัญทั้งหมดซึ่งเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กระบวนการของอิเล็กโทรด ปฏิกิริยาคอลลอยด์ การส่งถ่ายโมเลกุลผ่านเมมเบรนเป็นต้น และจากสมการ (3.38) นี้จะถูกประมาณค่าจาก Debye-Huckel ถ้าพลังงานไฟฟ้าเทียบกับพลังงานความร้อนแล้วน้อยกว่าก็คือ $|z_i e \varphi| \leq kT$ ก็จะมีความเป็นไปได้ที่จะขยายเอกซ์โพเนนเชียลในสมการที่ (3.38) โดยไม่ต้องสนใจทั้งหมดแต่เฉพาะสองเทอมแรกจะได้ว่า

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \left(\sum_i z_i e n_i^0 - \sum_i z_i^2 e^2 n_i^0 \varphi / kT \right) \quad (3.39)$$

ผลรวมเทอมแรกจะต้องเป็นศูนย์ เพื่อรักษาสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าในกลุ่มของสารละลาย ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 \varphi = \left(\frac{\sum_i z_i^2 e^2 n_i}{\epsilon_0 \epsilon_r kT} \right) \varphi \quad (3.40)$$

$$\nabla^2 \varphi = K^2 \varphi$$

เมื่อ

$$K = \left(\frac{e^2 \sum_i n_i^0 z_i^2}{\epsilon kT} \right)^{1/2} \quad (3.41)$$

การสมมุติ φ ให้มีค่าน้อยมาก ๆ ซึ่งจะทำให้สมการง่ายลง เรียกว่า "การประมาณค่าของ Debye- Huckel" ซึ่งในสมการ (3.35) อยู่ในรูป $\varphi = \text{const} \exp(-KX)$ เมื่อ $\varphi = \varphi_{x=d} \exp(-K(X-d))$ ค่า K [ซึ่งมีระยะทางเป็น (length⁻¹)] ซึ่งเรียกว่า "Debye-Huckel Parameter" ซึ่งจะแสดงส่วนเด่นในทฤษฎีของ Double layer ออกมาและขอบเขต Double layer วัดเป็นขนาด $1/K$ ต่อช่วงของการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 3.11 (จาก $x = d$ ไปยังกลุ่มของสารละลาย) เป็นจำนวน $3/K$ ถึง $4/K$ สังเกตว่าจะเป็นอิสระจากค่าคงที่มูลฐานบางตัว ซึ่งค่า K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสารประกอบของกลุ่มอิเล็กโตรไลต์เท่านั้น น้ำที่มีอุณหภูมิ (T) 25 °C ค่าของ K จะกำหนดด้วยสมการ

$$K = \left(\frac{2000 F^2}{\epsilon_0 \epsilon_r R T} \right)^{1/2} \sqrt{I} \quad \text{หน่วยเป็น } m^{-1} \quad (3.42)$$

เมื่อ F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant) = 96485 Cmol⁻¹ และ I เป็นความหนาแน่นของไอออน = $1/2 \sum_i C_i Z_i^2$ เมื่อ C_i เป็นสารประกอบของไอออนในหน่วย molL⁻¹ ใน 10⁻³ M 1:1 สารประกอบอิเล็กโตรไลต์ที่เกิดจากน้ำ $1/K = 9.6$ นาโนเมตร สำหรับระบบของคอลลอยด์ที่น่าสนใจอยู่ในช่วง $1/K$ จากเศษส่วนของนาโนเมตรถึงประมาณ 100 นาโนเมตร $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ Fm⁻¹, $\epsilon_r = 78.5$ (ของน้ำ), $R = 8.31$ JK⁻¹mol เมื่อแทนค่า จะได้ว่า

$$K = 3.288 \sqrt{I} \quad (3.43)$$

แรงดันเอาท์พุทของระบบสวิตซ์ $V_{ap} = 1000V$ ซึ่งได้จากการวัด ดังนั้น V_{ap} จึงเป็นเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) การจำลองแบบ FEM ดังรูปข้างบน แบบจำลองวิธีการวางสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะใช้วิธี FEM ในการจำลองเพื่อหาศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในน้ำ

จากการประมาณแบบ 2 มิติ (2-dimension) พิจารณาเทียบ x และ y

$$\nabla V_{ap} = \frac{\partial^2 V_{ap}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_{ap}}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (3.44) เป็นสมการของปัวร์ซอง (Poisson's equation) ที่พูดถึงน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ โดยถือว่าไม่เป็นเอกพันธ์ (Non-homogenous) และขอบเขตที่ต้องการรู้ค่ามีหน่วยเป็น V/m²

ดังนั้นจากสมการ (3.44) จะใช้การประมาณค่าแบบผันตรง

$$F(V_{ap}) = \int \left[\frac{1}{2} \left\{ \left(\epsilon \frac{\partial V_{ap}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ap}}{\partial y} \right)^2 \right\} - \rho V_{ap} \right] dx dy = 0 \tag{3.45}$$

และสามารถเขียนไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[S]_{3 \times 3} \{V_{ap}\}_{3 \times 1}^{(e)} = \{q\}_{3 \times 1}^{(e)} \tag{3.46}$$

[S] = เมตริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

{V_{ap}} = เมตริกซ์คิกค่าไฟฟ้าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้นๆ

{q} = เมตริกซ์ภาระของตัวกลางในแต่ละเอลิเมนต์นั้นๆ

$$S_{ij} = \int_{v_i} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \epsilon \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \epsilon \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy, \dots, i, j = 1, 2, \dots, M \tag{3.47}$$

$$q_i = - \int_{v_i} \rho N_i dx dy, \dots, i, j = 1, 2, \dots, M \tag{3.48}$$

โดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 ทิศทางเพื่อทำการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ ซึ่งฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมสามารถกำหนดได้เป็น

$$N_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \tag{3.49}$$

$$N_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \tag{3.50}$$

$$N_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \tag{3.51}$$

และอนุพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างจะเป็น :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} = \frac{y_2 - y_3}{2\Delta} \qquad \frac{\partial N_1}{\partial y} = \frac{x_3 - x_2}{2\Delta} \qquad (3.52)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial x} = \frac{y_3 - y_1}{2\Delta} \qquad \frac{\partial N_2}{\partial y} = \frac{x_1 - x_3}{2\Delta} \qquad (3.53)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial x} = \frac{y_1 - y_2}{2\Delta} \qquad \frac{\partial N_3}{\partial y} = \frac{x_2 - x_1}{2\Delta} \qquad (3.54)$$

เมื่อ Δ คือ พื้นที่ของเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม ทำการแทนค่า partial derivatives ในรูปเมตริกซ์ทั่วไป จะได้

$$[s] = \int \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} dv \qquad (3.55)$$

$$q_i = \int_{v_i} \begin{bmatrix} \rho N_1 \\ \rho N_2 \\ \rho N_3 \end{bmatrix} dv \qquad (3.56)$$

ทำการคูณทั้งสองด้านด้วย 2Δ และ เมื่อ ε มีค่าคงที่ตลอดทั้งโดเมน จึงหารด้วย ε ทั้งสองด้าน จะได้ว่า

$$[s] = \int_{v_i} \begin{bmatrix} (y_3 - y_2)(y_3 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_3 - x_2)(y_3 - y_2)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \\ (y_3 - y_1)(y_3 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_3 - x_2)(y_3 - y_1)(y_3 - y_1) + (x_1 - x_3)(x_1 - x_3) \\ (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_3 - x_2)(y_1 - y_2)(y_3 - y_1) + (x_2 - x_1)(x_1 - x_3) \\ (y_3 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1) \\ (y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1) \\ (y_1 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_2 - x_1) \end{bmatrix} dv \qquad (3.56)$$

ผลการอินทิเกรตที่ได้จะตรงกัน

$$[s] = \frac{1}{4\Delta} \begin{bmatrix} (y_3 - y_2)(y_3 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_3 - x_2)(y_3 - y_2)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \\ (y_3 - y_1)(y_3 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_3 - x_2)(y_3 - y_1)(y_3 - y_1) + (x_1 - x_3)(x_1 - x_3) \\ (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_3 - x_2)(y_1 - y_2)(y_3 - y_1) + (x_2 - x_1)(x_1 - x_3) \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \begin{aligned} &(y_3 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1) \\ &(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1) \\ &(y_1 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_2 - x_1) \end{aligned} \right] dv \quad (3.58)$$

$$q_i = \frac{\rho\Delta}{3\epsilon} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial N_i V_i}{\partial x} = -\frac{y_2 - y_3}{2\Delta} V_1 - \frac{y_3 - y_1}{2\Delta} V_2 - \frac{y_1 - y_2}{2\Delta} V_3 \quad (3.60)$$

และ

$$E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial N_i V_i}{\partial y} = \frac{x_3 - x_2}{2\Delta} V_1 - \frac{x_1 - x_3}{2\Delta} V_2 - \frac{x_2 - x_1}{2\Delta} V_3 \quad (3.61)$$

การนำสมการแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบกันเพื่อหาผลลัพธ์ของศักดาไฟฟ้า จะใช้การประมาณแบบ Iteration method (วิธีทวนซ้ำ) ดังนั้นจึงได้

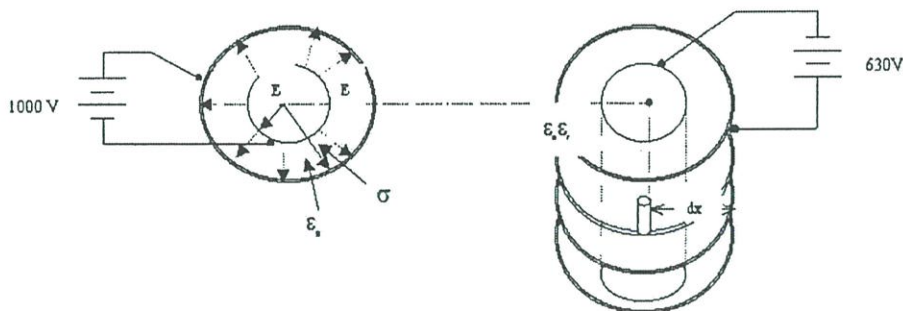
$$\phi_k = \frac{1}{C_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^n \Phi_i C_{ki} + \frac{1}{\epsilon C_{kk}} \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (3.62)$$

เมื่อได้แบบจำลองแล้วจึงทำการแทนค่าต่างๆ ได้โปรแกรมที่แสดงผลของการกระจาย ศักดาไฟฟ้าออกมาจากนั้นจึงทำการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์และรูปทรงที่ต้องการ

3.2.2 วิธีการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับการทดลองกับน้ำเสีย จะมีค่า Conductivity $\sigma = 4 \text{ (u/m}^2\text{)}$ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำ $\epsilon_r = 78.0$ รัศมีตัวนำ $a = 7 \text{ mm.}$; $b = 200 \text{ mm.}$ เติมแรงดันตกคร่อมวัดขณะยังไม่ได้นำน้ำเราจะได้ $V_{ab} = 1000 \text{ v.}$ และได้ค่า $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ และเมื่อใส่ไดอิเล็กตริกคือน้ำ และวัดแรงดันตกคร่อมจุด ab จะได้ $V_{ab} = 630 \text{ V.}$ ดังนั้นจะสามารถหาค่าความจุ ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และความหนาแน่นของเส้นแรงได้ ซึ่งหาได้จากรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 อิเล็กโทรดรูปวงแหวน

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= \frac{a}{b} \int E dx \\
 &= \frac{a}{b} \int \frac{Q \cdot dx}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r X} \left[\frac{dx}{x} \right] \\
 &= \frac{-Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \log_e(b/a) \\
 V_{ab} &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \log_e \frac{1}{(a/b)} \\
 V_{ab} &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \log_e(b/a)
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

จากสูตร

$$C = \frac{Q}{V} \tag{3.64}$$

เมื่อนำ (3.63) แทน (3.64)

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\log_e(b/a)} \tag{3.65}$$

เมื่อ

$$\log_e(b/a) = 2.3 \log_{10} b/a \tag{3.66}$$

นำ (3.66) แทน (3.65)

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{2.3 \log_{10}(b/a)} \tag{3.67}$$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในสมการที่ 3.67 จะได้

$$C = \frac{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 78}{2.3 \log_{10}(200/7)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความหนาแน่นเส้นแรง

$$D = Q / 2\pi a$$

และจาก

$$Q = CV_{ab}$$

$$Q = (1.29 \times 10^{-9}) (630) \\ = 812.7 \times 10^{-9} \text{ C}$$

และเราต้องการหาความหนาแน่นที่พื้นผิวรัศมี a และ b
ที่พื้นผิว a

$$D = \frac{Q}{2\pi a} \\ = \frac{812.7 \times 10^{-9}}{2\pi \times 7 \times 10^{-3}} \text{ C/m}^2 \\ = 18.49 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$$

และจะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุด (a)

$$E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \\ = \frac{18.49 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12} \times 78} \\ = 27 \text{ KV/m}$$

พื้นที่ผิว b

$$D = \frac{Q}{2\pi b} \\ = \frac{812.7 \times 10^{-9}}{2\pi \times 200 \times 10^{-3}} \\ = 0.65 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$$

และจะได้ความเข้มที่จุด (b)

$$E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \\ = \frac{0.65 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12} \times 78} \\ = 940 \text{ V/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ ความเข้มรวมภายในไดอิเล็กตริกที่มีรัศมี a และ b

$$\begin{aligned} E_T &= E_a + E_b \\ &= 27000 + 940 \text{ V/m} \end{aligned}$$

$$E_{T_{ab}} = 27940 \text{ V/m}$$

หลักการของกระแสการนำ

$$\begin{aligned} J &= \sigma \times E \text{ A/m} \\ &= 4 \times 27940 \text{ A/m} \end{aligned}$$

$$J = 111760 \text{ A/m}$$

ดังนั้นจะสามารถหาพื้นที่ของการออกแบบไดอิเล็กโตรด จาก

$$I = J \times S$$

เมื่อกำหนดให้กระแสไม่เกิน 1 Amp

$$S = \frac{I}{J}$$

$$S = \frac{1}{111760}$$

$$= 8.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$S = 2 \text{ mm.} \times 4.45 \text{ mm.}$$

พื้นที่ของตัวนำได้นำจะมีขนาด 2 mm. × 4.45 mm.

3.3 ระยะปลอดภัยในการวางอิเล็กโตรดในน้ำ

ในขั้นตอนนี้น้ำค่าที่ได้จากในหัวข้อที่ผ่านมาใช้ในการหาระยะห่างในการวางอิเล็กโตรดให้ปลอดภัยที่สุด

จากสมการ $E = V / L$

เมื่อ L เป็นระยะความปลอดภัยในการวางอิเล็กโตรด

$$\begin{aligned} L &= V / E \\ &= 1000V / 27940 \text{ V/m} \end{aligned}$$

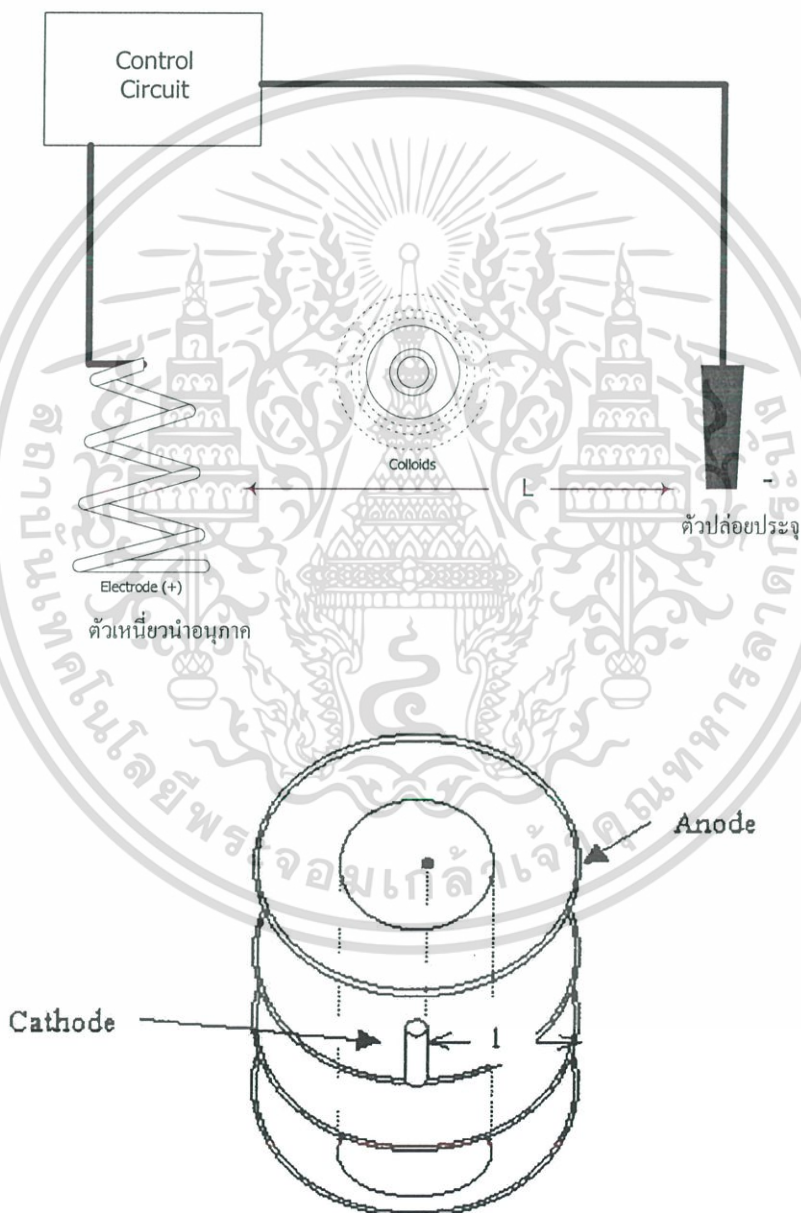
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$L = 4 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} \text{การหาค่า Dielectric strength} &= V / L \\ &= 1000\text{V} / 0.04 \text{ m.} \\ &= 25000 \text{ V/m} \end{aligned}$$

∴ ระยะความปลอดภัยในการวางอิเล็กโทรด 4 เซนติเมตร และสามารถทนแรงดันได้สูงสุดเท่ากับ 25 kV.



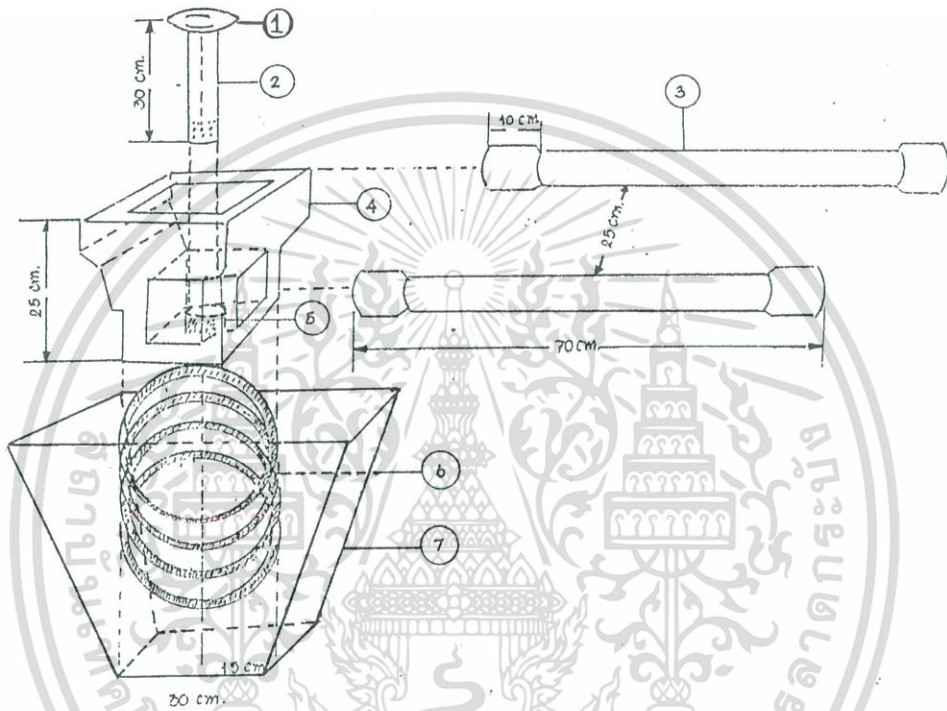
รูปที่ 3.13 ระยะห่างในการวางอิเล็กโทรดในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบโครงสร้างของท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.1 การออกแบบโครงสร้างหลักและรูปทรงของท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



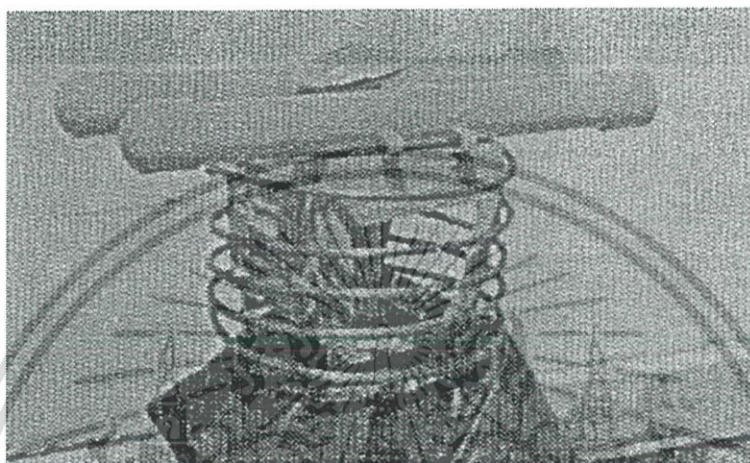
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ตามหมายเลขดังต่อไปนี้

- (1) เป็นวงจรถควบคุมของท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยภาคสวิทซ์ฟลายแบ็คแรงดันสูงและตัวปล่อยประจุแบบวงจรมัลติพลายเออร์ 4 ระดับ
- (2) ท่อดักฟองก๊าซที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวยิงอนุภาคแบบวงแหวนหรือรูปทรงโซลินอยด์ที่ทำจากทองแดงและโมเลกุลของน้ำ
- (3) ท่อนลอยทำจากท่อพีวีซีขนาด 2.5 นิ้ว ยาว 70 เซนติเมตร 2 ท่อน
- (4) ฐานรับตัวยิงอนุภาคได้น้ำ ทำจากพลาสติก
- (5) ข้อต่อตรงพีวีซีขนาด 2.5 นิ้วเพื่อรองรับ (2) ให้สามารถถอดประกอบและทำความสะอาดง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

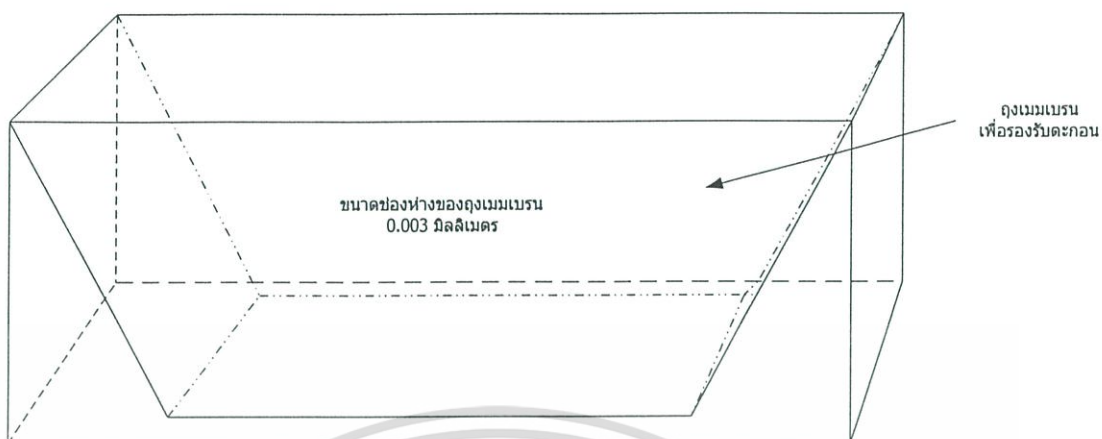
- (6) อิเล็กโทรดแบบวงแหวนทำจากท่อทองแดงกลวง รัศมีขนาด 20 เซนติเมตร เพื่อทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กสถิตได้ดี
- (7) ถูรองรับตะกอน
เมื่อได้ชิ้นส่วนแต่ละส่วนแล้ว จากนั้นก็ทำการประกอบฐานและจุดต่อประกอบเป็นทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 การประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.2 การออกแบบถูเมมเบรนที่รองรับตะกอน

จากรูปที่ 4.3 เป็นการติดตั้งถูเมมเบรนไว้ในตู้ทดลอง ซึ่งขนาดของช่องห่างของถูเมมเบรนมีขนาด 0.003 มิลลิเมตร ช่องห่างนี้จะมีผลโดยตรงกับอนุภาคคอลลอยด์ที่ตกตะกอน เหตุที่ผู้วิจัยใช้ถูเมมเบรนเพื่อรองรับตะกอนที่กั้นบ่อ เป็นเพราะว่ารูตะแกรงของถูเมมเบรนที่มีขนาดเล็กมากๆ ทำให้การเก็บตะกอนเป็นไปอย่างได้ผล เพราะตะกอนที่ตกลงมาแล้วจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้ไม่สามารถเล็ดลอดออกมาจากถูเมมเบรนได้อีก ซึ่งตะกอนที่ได้ก็นำไปศึกษาคุณสมบัติเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้



รูปที่ 4.3 การใช้ถุงเมมเบรนเพื่อรองรับตะกอนในตู้ทดลอง

4.3 บ่อทดลอง

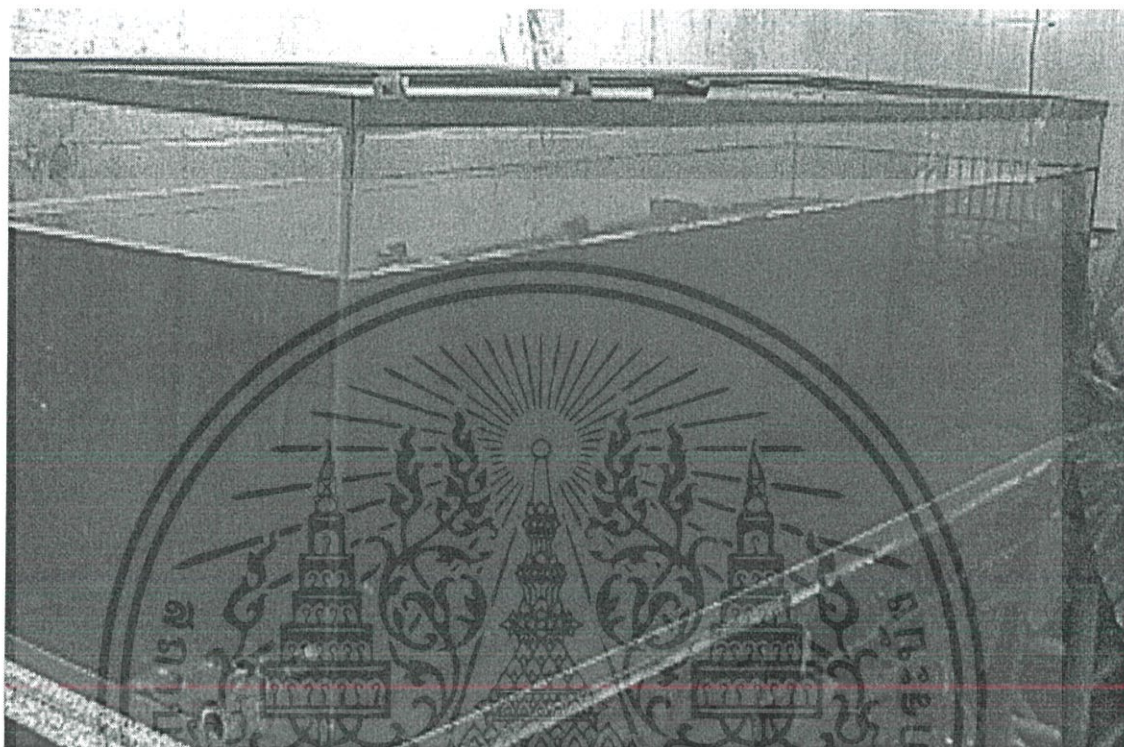


รูปที่ 4.4 ขนาดของตู้ทดลองสำหรับบรรจุน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนโปรตีน

จากรูปที่ 4.4 ในการออกแบบบ่อทดลองนั้นเพื่อความสะดวกในการทดลองที่มีสถานที่ค่อนข้างจำกัดจึงจำเป็นต้องใช้ตู้กระจกทำการทดลองเพื่อที่จะได้มองเห็นปฏิกิริยาตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลอง ผู้วิจัยจึงใช้ตู้กระจกที่มีขนาด กว้าง 2 ฟุต ยาว 6 ฟุต และลึก 2.5 ฟุต ซึ่งสามารถบรรจุน้ำที่จะทำการทดลองได้ 300 ลิตร โดยได้ทำการจำลองน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์ซึ่งเราใช้น้ำผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับเลือดวัว โดยมีอัตราส่วน 1 : 100 ลิตร ดังในรูปที่ 4.5 เป็นการเตรียมน้ำที่มีโปรตีนปนเปื้อนก่อนที่จะทำการทดลอง



รูปที่ 4.5 ตู้ทดลองจริงที่บรรจุการจำลองน้ำทิ้งโดยใช้น้ำผสมเลือดวัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

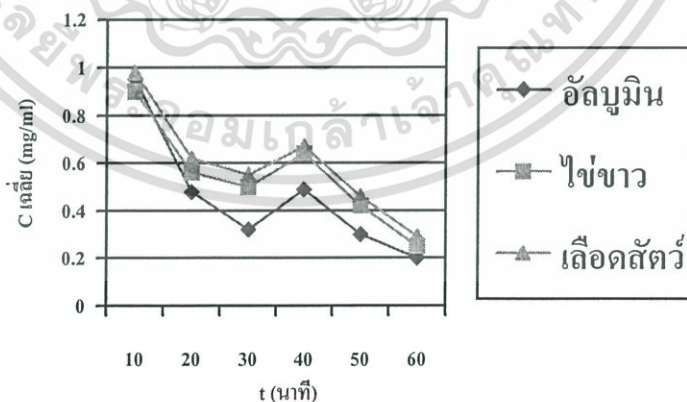
5.1 การทดลองทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความเข้มของสนามไฟฟ้า

5.1.1 คอลลอยด์โปรตีนจากสารชนิดต่างๆ ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากัน

การทดลองโดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ระดับ 1000 โวลต์กับคอลลอยด์โปรตีนชนิดต่างๆ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของโปรตีน โดยทดสอบในอัตราส่วนน้ำ 100 มิลลิลิตรต่อโปรตีน 2 มิลลิกรัม ดังในตารางที่ 5.1 และกราฟรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 คอลลอยด์โปรตีนชนิดต่างๆที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 1000 โวลต์ ได้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีน C (mg/ml)

เวลา (นาที)	10	20	30	40	50	60
อัลบูมิน	0.95	0.48	0.32	0.49	0.30	0.20
ไข่ขาว	0.90	0.56	0.50	0.64	0.42	0.25
เลือดสัตว์	0.98	0.62	0.55	0.67	0.46	0.29



รูปที่ 5.1 ความเข้มข้นของโปรตีน โดยเฉลี่ย C ที่ระดับแรงดัน 1000 โวลต์

ในหัวข้อนี้จะให้ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่คือ 1000 โวลต์ ณ เวลาต่างๆ กัน ปรากฏว่า ที่เวลา 20 นาที โปรตีนชนิดอัลบูมินจะเริ่มรวมตัวตกตะกอนได้เร็วกว่าและสามารถรวมตัวตกตะกอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

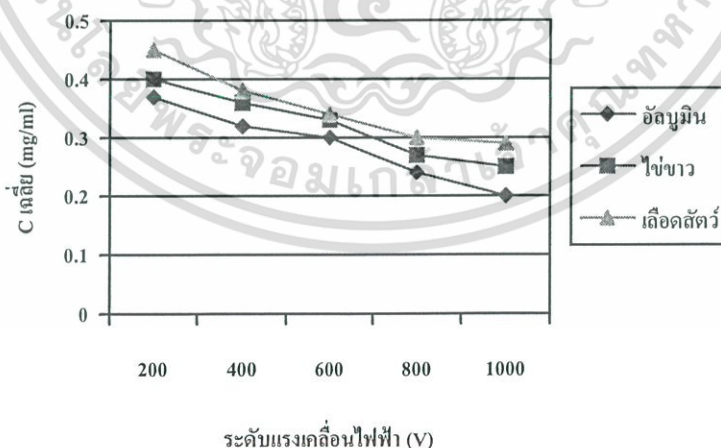
ได้เกือบทั้งหมด เพราะเป็นโปรตีนชนิดบริสุทธิ์ ซึ่งค่าที่ได้จากตารางนี้เป็นค่าเฉลี่ยจากการอ่านค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของโปรตีนที่วัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ในส่วนของกราฟรูปที่ 5.1 พิจารณาในช่วงเวลา 30-40 นาที กราฟจะมีค่าสูงขึ้น เป็นเพราะว่าในการสุ่มตัวอย่างน้ำมาทำการอ่านค่าความเข้มข้นของโปรตีนนั้นจะสุ่มทุกๆ 10 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 30-40 นาทีจะมีการรวมตัวของอนุภาคโปรตีนหนาแน่น ดังนั้นเมื่อมีการสุ่มตัวอย่างน้ำในช่วงนั้นมาจึงทำให้การอ่านค่าที่ได้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งจากการสังเกตในการทดลองจะเป็นอย่างนี้ทุกครั้งไป ซึ่งผู้วิจัยกำลังหาเหตุผลในการอธิบายความเปลี่ยนแปลง ณ จุดนี้อยู่

5.1.2 คอลลอยด์โปรตีนจากสารชนิดต่างๆ ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าต่างๆ

ทำการทดลองคอลลอยด์โปรตีนชนิดต่างๆ ที่ระดับแรงเคลื่อนค่าต่างๆ โดยให้เวลาคงที่ 60 นาทีและใช้อัตราส่วนของน้ำต่อโปรตีนเท่าเดิม ผลที่ได้ดังในตารางที่ 5.2 และกราฟรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 คอลลอยด์โปรตีนชนิดต่างๆ ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างกัน

ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า(V)	200	400	600	800	1000
อัลบูมิน	0.37	0.32	0.30	0.24	0.20
ไข่ขาว	0.40	0.36	0.33	0.27	0.25
เลือดสัตว์	0.45	0.38	0.34	0.30	0.29



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของโปรตีนชนิดต่างๆที่ระดับแรงเคลื่อนต่างกัน

จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนที่วัดได้จากเครื่อง Spectrophotometer จะมีลักษณะลดลงในแบบ Linear และโปรตีนชนิดอัลบูมินจะทำปฏิกิริยาได้ดีที่ต่ำกว่าชนิดอื่น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

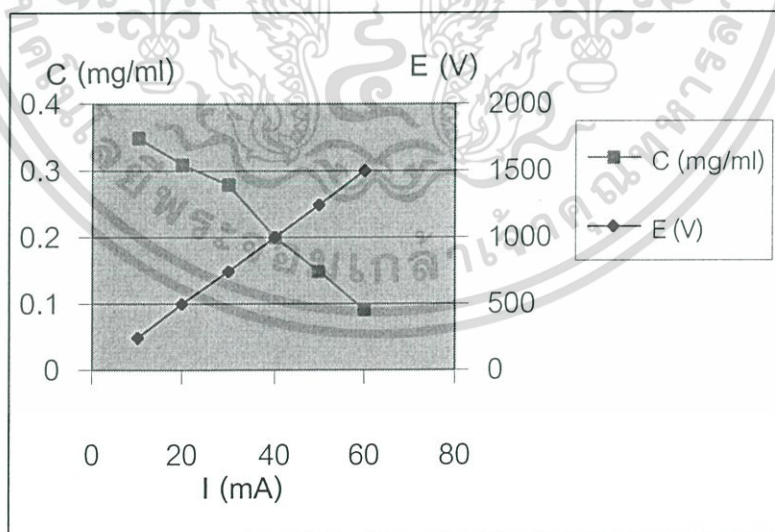
สุด ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงก็จะทำให้โปรตีนเริ่มทำปฏิกิริยาต่อสนามไฟฟ้าได้รวดเร็วมากขึ้น คือประมาณ 10 นาทีก็จะเริ่มรวมตัวให้เห็นได้แล้วและจะสามารถรวมตัวตกตะกอนได้เร็วมากขึ้นด้วย ค่าที่ได้ในตาราง 5.2 เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนของแสงของตัวอย่างน้ำด้วยเครื่อง Spectrophotometer เช่นเดียวกับตารางที่ 5.1 โดยทำการทดลอง 10 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

5.1.3 การทดสอบคอลลอยด์โปรตีนที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่า 1000 โวลต์

ในการทดสอบที่อุณหภูมิของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับคอลลอยด์โปรตีนที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่า 1000 โวลต์นั้น จะทำการทดสอบเหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา โดยการปรับค่าระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ต่างกันครั้งละ 250 โวลต์จนถึง 1500 โวลต์ ใช้เวลา 1 ชั่วโมงเหมือนเดิม ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การทดสอบที่อุณหภูมิของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่า 1000 โวลต์

I (mA)	10	20	30	40	50	60
E (V)	250	500	750	1000	1250	1500
C เฉลี่ย (mg/ml)	0.35	0.31	0.28	0.20	0.15	0.09



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันและความเข้มข้นของโปรตีนที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่า 1000 โวลต์

จากตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ที่ได้เป็นดังนี้คือ ถ้ากระแสและแรง

เคลื่อนไฟฟ้าต่ำๆ ค่าความเข้มข้นของโปรตีนจะมีค่าสูง แต่ถ้ากระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงก็จะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ค่าความเข้มข้นของโปรตีนต่ำลง นั่นคือกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของโปรตีนนั่นเอง

5.2 การทดลองและวิเคราะห์ทางด้านเคมี

การทดลองผู้วิจัยได้จำลองน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์ ซึ่งอุปกรณ์การทดลองจะประกอบด้วยบ่อบำบัดขนาดกว้าง 2.5 ฟุต ยาว 6 ฟุต ลึก 2 ฟุต สามารถบรรจุน้ำได้ 300 ลิตร ท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีระดับแรงดัน 1000 โวลต์ และได้ทำการวัดระดับ COD, BOD₅, pH, อุณหภูมิ และการตกตะกอนของโปรตีน โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ลักษณะ มีอัตราส่วนของน้ำเลือดหรือน้ำที่เกิดจากการชะล้างเศษเนื้อ 1 ลิตร และน้ำ 100 ลิตร ดังนี้

การทดลองที่ 1 นำน้ำ 300 ลิตรผสมกับน้ำเลือดของวัวหรือหมู 3 ลิตร แล้วผ่านท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีระดับแรงดัน 1000 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการวัด pH และอุณหภูมิ นำตัวอย่างน้ำไปทดสอบ COD และ BOD₅ ก่อนและหลังการทดสอบ

การทดลองที่ 2 ทำการทดลองกับน้ำที่ผ่านการชะล้างเศษเนื้อ โดยจำลองจากเนื้อมดละเอียด ทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

5.2.1 การทดลองขณะไม่มีอนุภาคโปรตีนและเลือดในน้ำ



รูปที่ 5.4 การทดลองท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับน้ำ

การทดลองนี้ยังไม่ใส่โปรตีนชนิดใดลงไป แต่ใช้ท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทดสอบกับน้ำเท่านั้น ซึ่งการทดลองนี้เพื่อวัดค่าแรงดันตกคร่อมในสภาวะที่ไดอิเล็กตริกเป็นน้ำธรรมดาเปรียบเทียบกับสภาวะที่ไดอิเล็กตริกเป็นน้ำผสมกับโปรตีนชนิดต่างๆ โดยที่ขณะที่ทดลองกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำนั้นแรงดันตกคร่อมที่วัดได้ประมาณ 750 โวลต์ แต่หากมีการผสมกันของน้ำกับโปรตีนชนิดต่างๆ แล้ว ระดับแรงดันตกคร่อมจะอยู่ที่ประมาณ 600 โวลต์ กว่าๆ

5.2.2 วิธีการสร้างคอลลอยด์โปรตีนและการทดลองขณะละลายในน้ำ

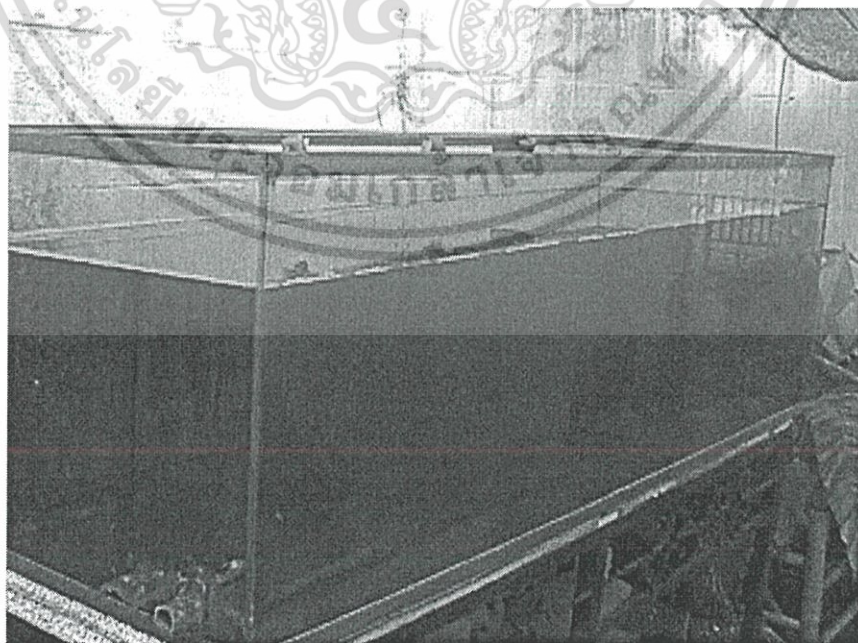
วิธีการสร้างคอลลอยด์โปรตีนสามารถทำได้ง่ายๆ โดยอันดับแรกใช้ไข่ไก่ก่อนเพราะเป็นสิ่งที่หาได้ง่าย โดยเฉพาะไข่ขาวผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:100 ส่วน แล้วทำการกวนให้เข้ากันจนได้ที่ประมาณ 2-3 นาที ก็จะได้คอลลอยด์ตามต้องการ แล้วนำน้ำที่ได้นี้ไปผ่านทูลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้

ส่วนการสร้างคอลลอยด์โปรตีนชนิดอื่นก็ทำเช่นเดียวกัน เช่น อาจจะใช้อัลบูมินผสมกับน้ำก็ได้ หรือจะเป็นน้ำจากเลือดสัตว์ สบู่ ผงซักฟอก เป็นต้น โดยนำน้ำที่ผสมกันจนเข้าที่แล้วไปผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองอีกทีหนึ่งเพื่อที่จะให้ได้อนุภาคคอลลอยด์ที่เล็กมาจริงๆ เพราะอนุภาคยิ่งเล็กที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็นด้วยแล้ว ในทางสิ่งแวดล้อมจะแก้ปัญหาได้ยากมาก

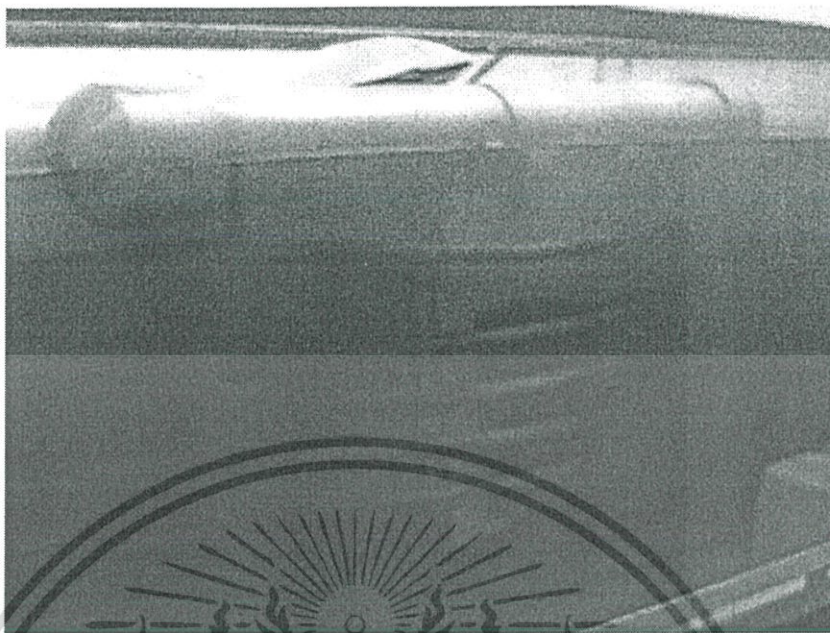
5.2.3 การใช้ทูลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านำกลับโมเลกุลโปรตีนจากสารชนิดต่างๆ

5.2.3.1 โปรตีนจากเลือดของสัตว์

โดยการเตรียมการจำลองน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์ซึ่งใช้เลือดของวัวผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:100 ลิตร ในตู้ทดลองที่เตรียมไว้ จากนั้นจึงใช้ทูลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำการบำบัดน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลดังรูปและตารางต่อไปนี้



รูปที่ 5.5 การจำลองน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์โดยใช้เลือดวัวผสมน้ำ อัตราส่วน 1:100
เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

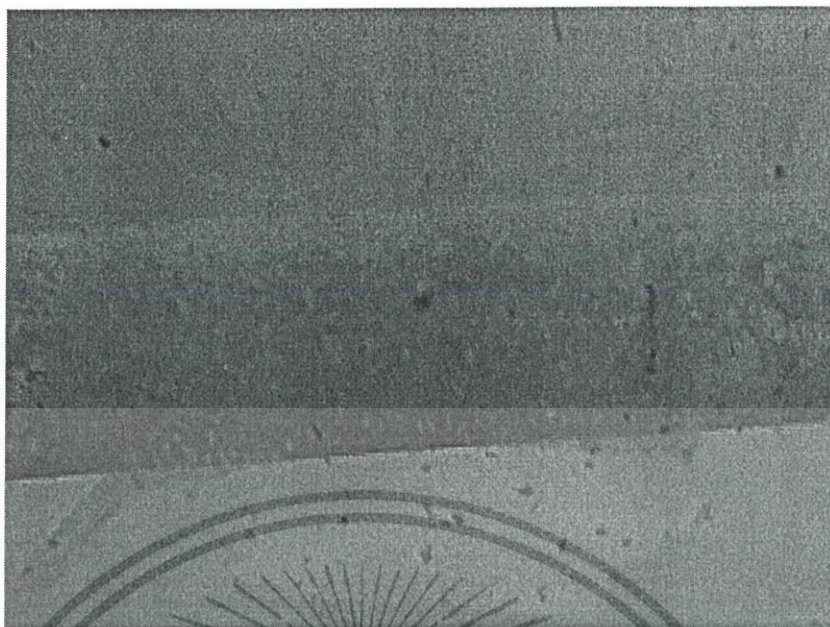


รูปที่ 5.6 หลังจากผ่านท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 5.7 หลังผ่านท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 อนุภาคคอลลอยด์โปรตีนรวมตัวตกตะกอนที่ก้นตู้ทดลอง

ตารางที่ 5.4 ระดับ pH , อุณหภูมิ, ผลการตกตะกอน โดยเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา

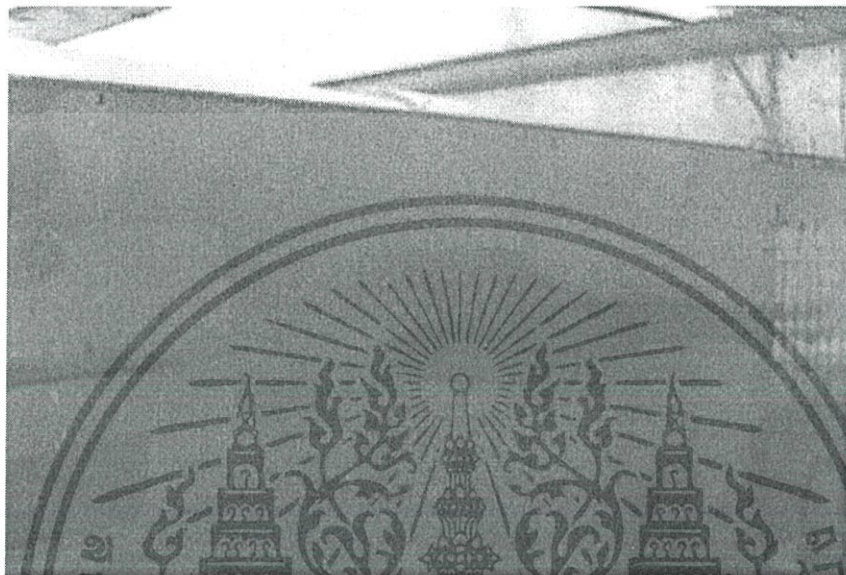
เวลา(นาที)	20	30	40	50	60
อุณหภูมิ(°C)	27.9	28	28	28.4	28.7
pH	6.6	7.9	8.1	7.9	7.9
การตกตะกอนโมเลกุลเลือด(%)	75	83	96.6	96.6	96.6

จากตารางที่ 5.4 ค่าอุณหภูมิอาจถือได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้เทอร์โมมิเตอร์ธรรมดาเป็นตัววัด ส่วนค่า pH นั้นก็อยู่ในระดับกลางๆ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยการใช้ pH meter เป็นตัววัดค่าที่ได้จะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขที่สามารถบันทึกได้เลย โดยที่ภายในเวลา 1 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ได้อยู่ในระดับเกือบ 97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งโมเลกุลโปรตีนสามารถรวมตัวตกตะกอนได้เกือบทั้งหมด ค่าเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนนั้นได้จากการเปรียบเทียบค่าสารโปรตีนตั้งต้นกับค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากเครื่อง Spectrophotometer ในแต่ละช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.2 โปรตีนจากไข่ขาว

เมื่อทำการสร้างคอลลอยด์โปรตีนจากไข่ขาวซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2.2 โดยผสมในอัตราส่วนเท่ากับ โปรตีนจากเลือดสัตว์แล้วผ่านทูลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลเป็นดังรูปที่ 5.9

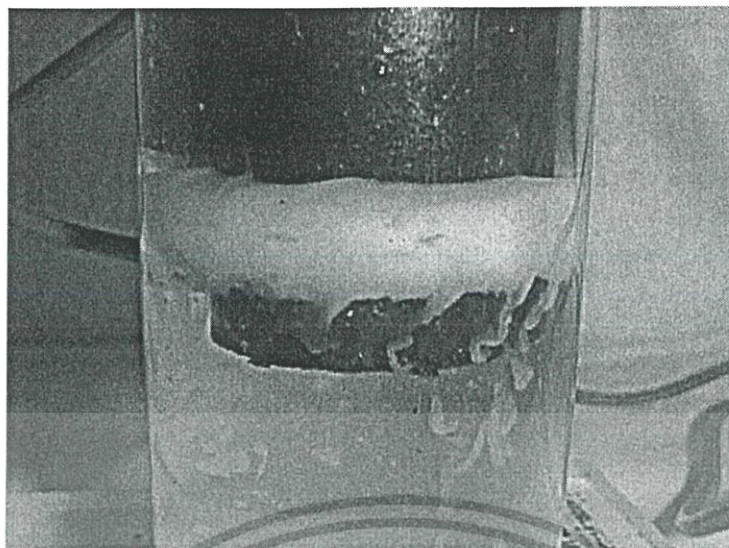


รูปที่ 5.9 คอลลอยด์โปรตีนจากไข่ขาว

จากรูปที่ 5.9 เมื่อเราใช้ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1000 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 10 นาที จะเริ่มมีปรากฏการณ์การรวมตัวกันของโมเลกุลโปรตีนจากไข่ขาวให้เห็นแล้ว จากนั้นใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมงก็สามารถรวมตัวตกตะกอนได้เกือบทั้งหมด

5.2.3.3 โปรตีนอัลบูมิน

ในหัวข้อนี้จะใช้อัลบูมินผงซึ่งเป็นโปรตีนที่มีความบริสุทธิ์ 98 % เบอร์ A-18 ทำการทดลองในระดับปฏิบัติการในห้องทดลอง เหตุผลที่ต้องทำการวิจัยในระดับเล็กๆ เพราะว่าโปรตีนบริสุทธิ์ชนิดนี้นั้นมีต้นทุนที่สูงมากและต้องนำเข้าจากต่างประเทศด้วย โดยทำการทดลองใช้ปริมาณอัลบูมินผสมกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆกัน และระดับแรงดันต่างๆกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.10 และตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.10 การทดสอบกับคอลลอยด์โปรตีนที่ได้จากอัลบูมินผสมกับน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.5 การทดสอบหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับ โปรตีนชนิดอัลบูมิน

เวลา (นาที)	1	2	3	4	5
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	28.7	28.7	28.7	29	28.9
พีเอช	7.2	7.4	7.4	7.3	7.2
ความเข้มข้นโดยเฉลี่ย (C)	0.45	0.35	0.26	0.30	0.11

5.2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยการทดสอบด้วยเครื่อง Spectrophotometer

สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเสียไว้ในขวดเก็บตัวอย่างน้ำแล้วทำการวิเคราะห์หาคุณลักษณะสมบัติของน้ำนั้นก่อน โดยการวัดการดูดกลืนของแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่มีความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร จากนั้นก็เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่สอง นำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว เก็บตัวอย่างไว้ในขวดเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการสเตอริไลซ์เช่นกัน จากนั้นก็เก็บไว้ในอุณหภูมิที่เหมาะสม

เมื่อได้ตัวอย่างน้ำจากทั้งสองขั้นตอนแล้วจึงนำมาทดสอบการดูดกลืนของแสงอีกครั้งเพื่อการเปลี่ยนแปลงและเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยการวัดค่าซีโอดีและบีโอดี

การวิเคราะห์ค่าบีโอดี นิยมใช้วิธีทางเคมี คือ Iodometric method หรือ Azide modification method ซึ่งเหมาะสำหรับหาค่าบีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียชุมชน ตลอดจนแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ค่าบีโอดีบ่งชี้ให้ทราบถึงปริมาณความสกปรกของน้ำในแม่น้ำ ลำคลอง น้ำเสียชุมชน และน้ำเสียอุตสาหกรรม เพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย ใช้ตรวจคุณภาพน้ำเสีย และวัดประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

การหาค่าบีโอดีสามารถคำนวณได้โดยนำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเจือจาง (Diluted) แล้วแทนค่าในสมการต่อไปนี้

$$BOD_5 = \frac{DO_i - DO_f}{P}$$

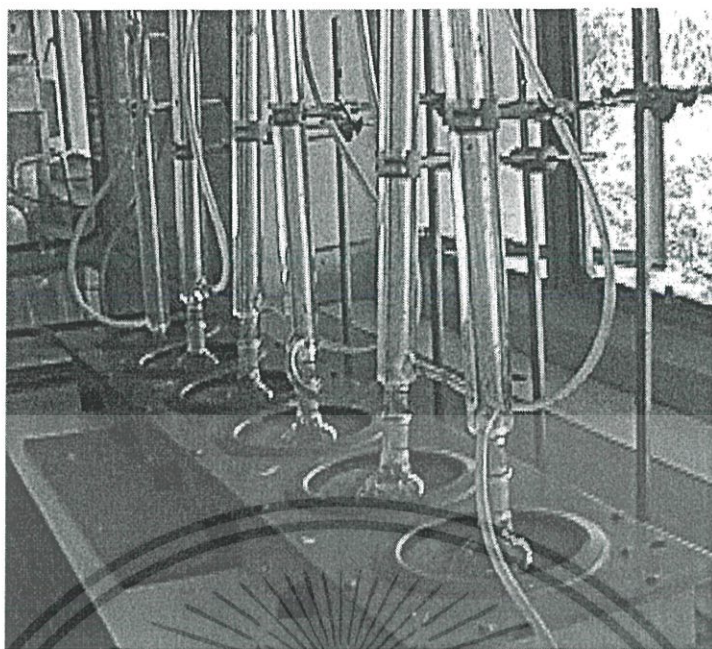
เมื่อ DO_i = ออกซิเจนเริ่มต้น (DO) ของน้ำเสียที่เจือจางแล้ว

DO_f = DO สุดท้ายของน้ำเสียที่เจือจางแล้วหลังจากผ่านไป 5 วัน

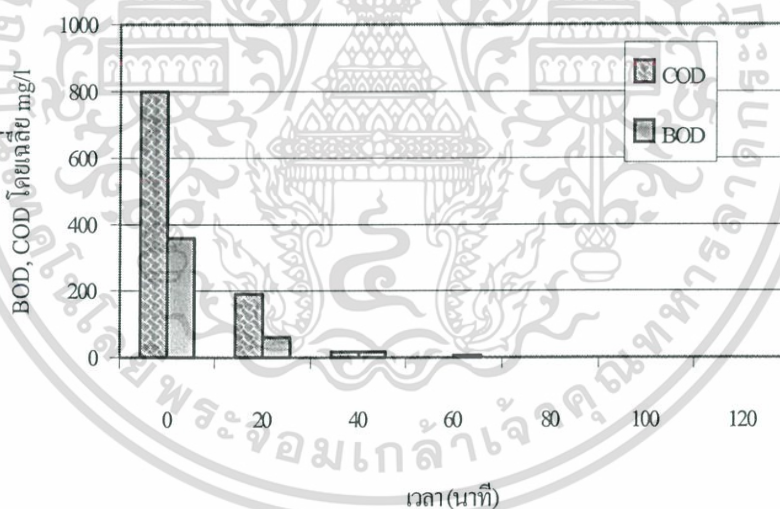
P = น้ำเสียที่เจือจาง = ปริมาตรของน้ำเสีย / ปริมาตรของน้ำเสียบวกกับน้ำที่นำมาเจือจาง

ขวดบีโอดีมาตรฐาน 300 ml. ดังนั้น P จึงเป็นปริมาตรของน้ำเสีย หาด้วย 300 ml.

การวิเคราะห์ค่าซีโอดีที่นิยมใช้คือ Dichromate reflux method สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกออกซิไดส์โดยสารละลายผสมของโพแทสเซียมไดโครเมตกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิสูง โดยใช้การกลั่นไหลกลับ (reflux) เพื่อป้องกันการสูญหายของสารที่ระเหยได้ ค่าซีโอดีใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียชุมชน ใช้ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ทราบความสามารถของแม่น้ำลำคลองว่าสามารถรับความสกปรกได้มากน้อยเพียงใด และใช้ในการประเมินค่าบีโอดีอย่างคร่าวๆ



รูปที่ 5.11 วิธีการวิเคราะห์หาค่า COD ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 5.12 ผลของ COD, BOD₅ ในแต่ละช่วงเวลา จากการสุ่มตัวอย่างน้ำภายใน 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.12 ค่าของ COD และ BOD₅ จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นหรือจากตัวอย่างน้ำที่สุ่มมาตอนแรกจะมีค่าตั้งต้นที่สูง แต่เมื่อผ่านการทดสอบด้วยทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน 1 ชั่วโมงก็พบว่า ค่าที่ได้มีค่าลดลงเป็นที่น่าพอใจ คือผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง โดยที่ค่า COD ลดลงจนเป็นศูนย์ ส่วนค่า BOD₅ ลดลงเหลือประมาณ 6 mg/l ซึ่งกระบวนการที่ได้มาของทั้งสองค่านี้นั้น เป็นกระบวนการทางวิทยาศาสตร์โดยในรายละเอียดไม่น่ามากกล่าวไว้ในที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงเงินค่าลิขสิทธิ์แล้ว กรุณาอย่านำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การประยุกต์ใช้ท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับน้ำทิ้งภายในสถาบันฯ

ปัญหาของแหล่งน้ำเสียกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้น และส่งผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างมหาศาล ที่สำคัญ สิ่งที่มาพร้อมกับน้ำเสียคือ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคหลายชนิดได้ดี โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่เรียกว่าแบคทีเรีย แบคทีเรียถือว่าเป็นพืชที่ให้ทั้งประโยชน์และโทษ ตามหลักวิชาการสามารถจำแนกแบคทีเรียตามโครงสร้างเคมีโปรตีนได้ 2 ประเภทคือ แบคทีเรียแกรมบวก (Gram Positive) และแบคทีเรียแกรมลบ (Gram Negative) แต่เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบจะมีแบคทีเรียชนิด *E. coli* (*Escherichia coli*) และ *Vibrio* หลายสายพันธุ์ที่มีความสามารถทางพันธุกรรมทำให้เกิดโรคหลายชนิดทางน้ำได้ เช่น โรคระบบทางเดินอาหาร อูจาระร่วง บิด ไทฟอยด์ แผลติดเชื้อ แม้กระทั่งทำอันตรายต่อชีวิตคน โดยตรงต่อผู้สูงอายุและต่อเด็กแรกเกิดได้ ถ้ามีการบริโภคน้ำที่มีเชื้อ *E. coli* อยู่ เนื่องจากแบคทีเรียชนิด *E. coli* จัดว่าอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียแกรมลบและยากต่อการกำจัดหรือยับยั้ง เป็นเพราะว่าแบคทีเรีย *E. coli* มีการปรับเปลี่ยนสภาพและสร้างเกราะกำบังตัวเองเมื่ออยู่ในน้ำเสียหรือสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ได้ดี เพราะว่ามีอนุภาคขนาดเล็ก คือ 10^{-5} มิลลิเมตร ซึ่งหากเราทำให้โปรตีนในเซลล์แบคทีเรียเสียเสถียรภาพได้ก็เท่ากับว่าเราทำลายเซลล์แบคทีเรียด้วยเช่นกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มองเห็นความสำคัญที่จะทดลองวิจัยการนำหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มายับยั้งหรือแก้ปัญหาแบคทีเรียแกรมลบในน้ำเสีย

การยับยั้งแบคทีเรียมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่แนวทางวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบโดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถทำลายกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบนผิวหรือผนังเซลล์ของแบคทีเรีย และยังทำให้ระดับโครงสร้างของโปรตีนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์คอลลอยด์เสถียรภาพไป จะส่งผลทำให้แบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดประกอบไปด้วยโปรตีนถึง 70% ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งมีชีวิต โดยมีโปรโตพลาสซึมอยู่ภายในล้อมรอบด้วยเซลล์เมมเบรนและยังมีผนังเซลล์ห่อหุ้มอีกชั้นหนึ่ง ทำให้เซลล์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โปรโตพลาสซึมเป็นของเหลวที่มีความหนืดคล้ายไข่ขาว จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีพบว่า ประกอบด้วยน้ำ โปรตีน ลิพิด โพลีแซคคาไรด์ แร่ธาตุ นอกจากนี้ ยังมีสารที่สามารถแตกตัวเป็นประจุกระจายอยู่ทั่วไป ทำให้โปรโตพลาสซึมมีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์ชนิดโปรตีน ปรากฏการณ์คอลลอยด์ที่เกิดขึ้นรอบๆ บริเวณเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในน้ำ สืบเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนประจุบวกและลบที่ได้จากอะมิโนแอซิดและกลุ่มคาบอซิดกับโมเลกุลของสารในน้ำ เพื่อพองตัวเองหรือปรับเปลี่ยนสภาพเป็นทั้งกรดและเบสให้สามารถปรับวิธีการดำรงสภาพเข้ากับสิ่งแวดล้อม ประการที่ 2 กระบวนการเมตาบอลิซึม เป็นกระบวนการหลักที่ใช้ออกซิเจนประกอบ

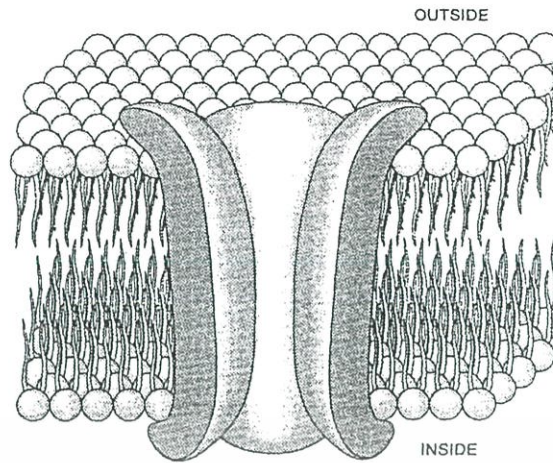
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเคมีโปรตีนเป็นตัวยึดกลาง เช่น การสืบทพันธุ์ การแบ่งเซลล์ การสร้างสปอร์ การเคลื่อนที่ การย่อย และการดูดซึมอาหาร ดังจะยกตัวอย่างรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของแบคทีเรีย



รูปที่ 5.13 โครงสร้างหลักของแบคทีเรีย *E.coli* จัดเป็นชนิดเกรมลบ มีความสามารถก่อโรคทางน้ำได้หลายชนิด

พฤติกรรมการแลกเปลี่ยนประจุบนผนังเซลล์หรือเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียจะมีความสอดคล้องและคล้ายกับปรากฏการณ์คอลลอยด์โปรตีนที่เกิดขึ้นในน้ำ ดังที่เราจะยกตัวอย่างต่อไปนี้ โปรตีนเมื่อละลายในน้ำจะเกิดปรากฏการณ์แลกเปลี่ยนประจุกับน้ำโดยกลุ่มของโปรตีนจะได้ประจุบวก,ลบจากการแตกตัวของกลุ่มอะมิโนกับกลุ่มคาบออกซิลและเปลี่ยนเป็นคอลลอยด์โปรตีนหรือที่เรียกว่า Hydrophilic Colloids ดังรูปที่ 5.14 และ 5.15



รูปที่ 5.14 โครงสร้าง 3 มิติของเซลล์โปรตีนเมื่ออยู่ในน้ำ



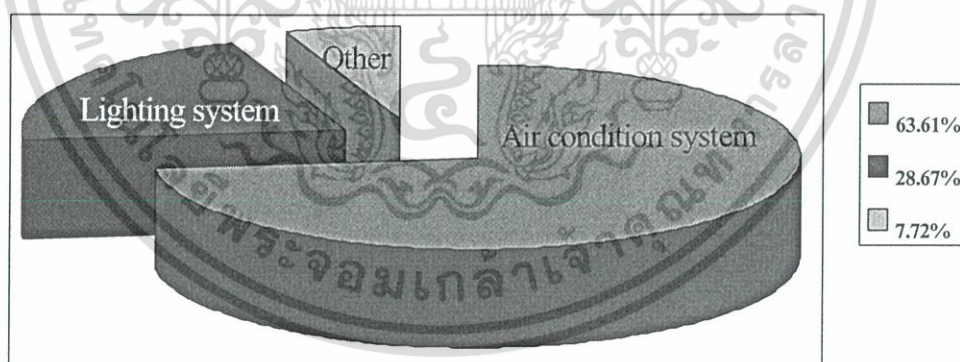
รูปที่ 5.15 โครงสร้างคอลลอยด์โปรตีนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ

แนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไปจะเกี่ยวข้องกับเชื้อแบคทีเรีย ฉะนั้นจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เราจะใช้หุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำลายเซลล์แบคทีเรีย โดยจะศึกษาในส่วนของน้ำที่จากคอลลอยด์เย็นของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ซึ่งในปัจจุบันเราจะพบว่าในแต่ละอาคารบ้านเรือนมีน้ำที่งที่งเกิดจากเครื่องปรับอากาศเป็นจำนวนมากและน้ำที่งเหล่านี้ก็ถูกปล่อยทิ้งไปโดยไม่เกิดประโยชน์ จึงนำที่งที่ศึกษาเพื่อที่งจะนำน้ำที่งเหล่านี้หมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก หรือเก็บเป็นระบบน้ำสำรองภายในอาคารก็ได้ แต่น้ำที่งเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้โดยตรง เนื่องจากผลของจุลินทรีย์และเชื้อโรคชนิดต่างๆ ตามร่างกายคนที่อยู่ภายในห้องทำงานนั้นๆ ปนเปื้อนออกมาเป็นปริมาณมาก ต้องมีการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้เสียก่อน

คอลลอยด์เย็นเป็นอุปกรณ์หลักอันหนึ่งของระบบเครื่องปรับอากาศ ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์ร่วมตัวเอกสเดียวที่จัดอยู่ในวงจรการหมุนเวียนของอากาศ และอากาศที่หมุนเวียนกลับมาจากภายในห้องนั้นจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีฝุ่นละอองและกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากร่างกายคนและสัตว์ที่อยู่ภายในห้อง สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการระเหย เนื่องจากมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อระบบหมุนเวียนอากาศในลักษณะการพา เช่น มีการไอและจามของผู้ป่วยหรือการระเหยจากไอน้ำในร่างกาย จะส่งผลให้มีเชื้อโรคมามากที่สุด เช่น แบคทีเรียและเชื้อราปนเปื้อนมาในระบบหมุนเวียน ในขณะที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ไอน้ำในอากาศจะถูกแยกออกโดยอัตโนมัติ ขณะที่อากาศหมุนเวียนจากภายในห้องกลับมากกระทบความเย็นที่คอยล์เย็น ไอน้ำในอากาศจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำทิ้งที่บริเวณผิวและครีบบของคอยล์เย็นที่มีมลพิษปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์เล็กๆ และถูกระบายออกทางท่อน้ำทิ้ง บางสถานที่จะถูกรวมลงในท่อน้ำทิ้งของระบบตึกหรืออาคารสูง ส่งผลให้เกิดมลพิษซ้ำซ้อนกับระบบสิ่งแวดล้อมได้

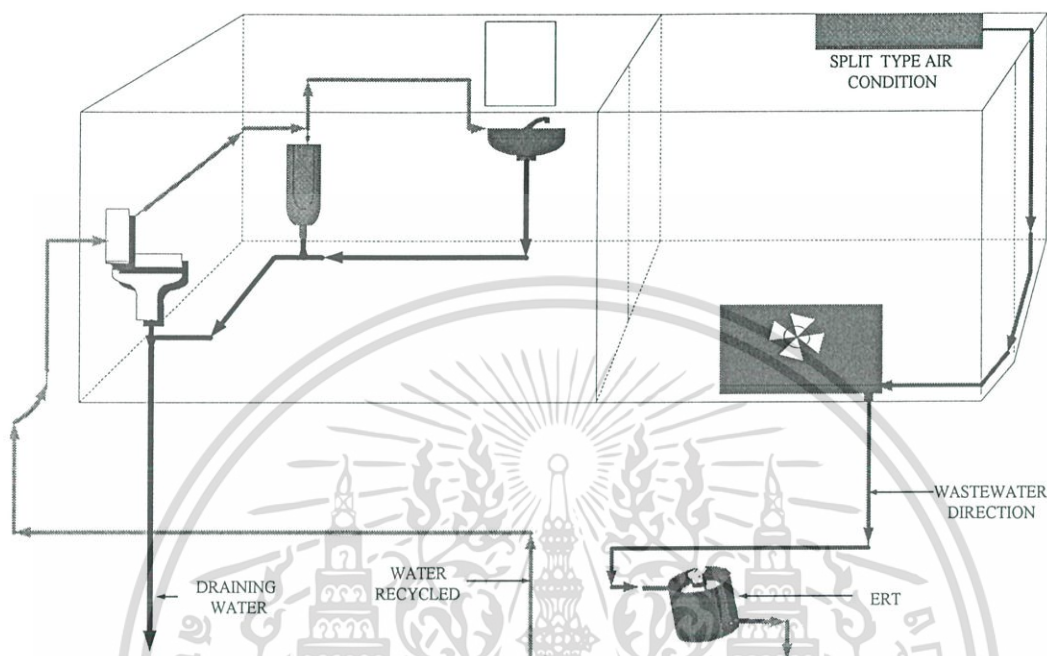
จากการศึกษาผู้วิจัยพบว่าปริมาณน้ำทิ้งเหล่านี้จะมีเป็นปริมาณมาก ในขณะที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนหลายๆเครื่องพร้อมกัน จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำจะพบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อโรคและเป็นอันตรายถ้าปล่อยน้ำทิ้งเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำดิบตามธรรมชาติ โดยไม่มีการบำบัดที่ถูกต้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดว่าถ้าหากนำเอาหลักการของปฏิกิริยาสนามไฟฟ้าไปศึกษาและทำความเข้าใจความสะอาดมลพิษที่เกิดจากจุลินทรีย์ เพื่อสกัดเก็บเป็นระบบน้ำสำรองใช้หมุนเวียนใหม่ได้ก็น่าจะเป็นผลดี



รูปที่ 5.16 สัดส่วนการใช้พลังงานในอาคาร ตัวอย่างสำรวจในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [ที่มา: กองแผนงาน สจล.]

จากการสำรวจพบว่าสัดส่วนการใช้พลังงานจาก 4 อาคารภายใน สจล. นั้น จะใช้พลังงานในส่วนของระบบปรับอากาศมากที่สุดในช่วงเวลาทำงาน รองลงมาก็เป็นระบบแสงสว่าง และใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านอื่นเล็กน้อย ซึ่งหากลองนำภาชนะมารองรับน้ำทิ้งจากระบบปรับอากาศเหล่านี้ก็จะพบว่ามันเป็นปริมาณมากในแต่ละวัน จึงน่าจะนำน้ำทิ้งเหล่านี้มาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้



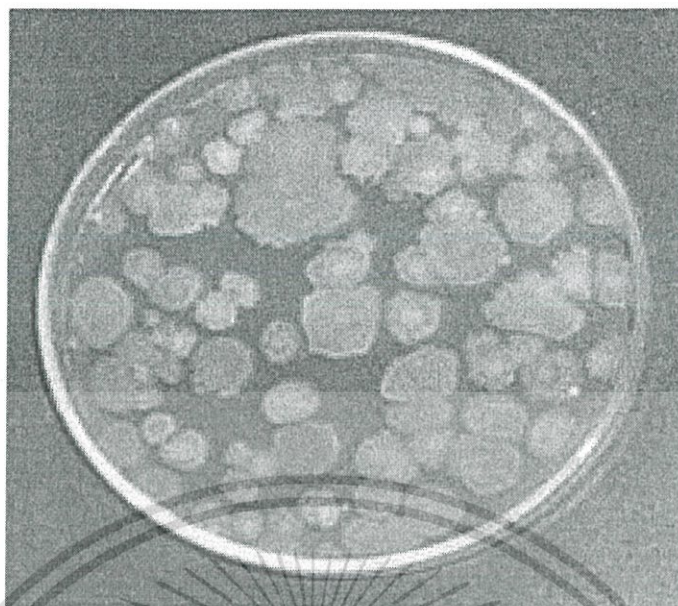
รูปที่ 5.17 การหมุนเวียนน้ำทิ้งจากคอยล์เย็นของเครื่องปรับอากาศในอาคารกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

จากรูปที่ 5.17 แสดงหลักการนำน้ำจากอาคาร เพื่อการหมุนเวียนน้ำทิ้งจากคอยล์เย็นกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดย ERT คือ ถึงปฏิบัติการสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ผู้วิจัยได้ทดลองทำในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการสูมตัวอย่างน้ำจากอาคารเรียนรวมและโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ รวม 4 อาคารด้วยกัน ผลปรากฏว่าเมื่อนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อนก่อนผ่านหลักการของทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จะมีเชื้อปนเปื้อนอยู่มาก ดังในรูปที่ 5.18 (ก) และ 5.19 (ก) ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.6

เมื่อผ่านหลักการของทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะพบว่าเชื้อลดลงในปริมาณที่น่าพอใจ คืออยู่ในระดับมาตรฐานที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำสาธารณะทั่วไปได้ ดังผลในรูปที่ 5.18 (ข) และ 5.19 (ข) ตารางที่ 5.6

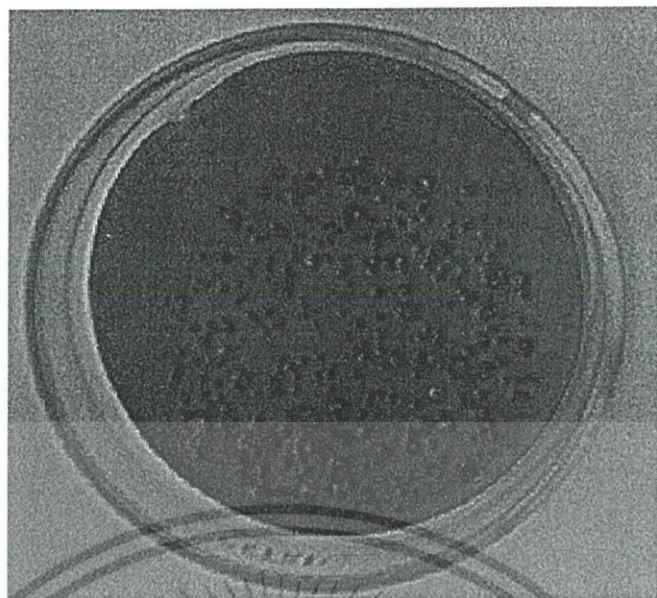
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 5.18 ผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการในการประยุกต์ใช้หลักการของทูลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วขั้วเชื่อมแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งจากคอลล์เย็นของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (ก) การขั้วขั้วเชื่อมแบคทีเรียทั่วไปก่อนผ่านเครื่อง, (ข) หลังผ่านเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 5.19 การขั้วยั้งเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (ก) ก่อนผ่านเครื่อง, (ข) หลังผ่านเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

Water samples	Qty. (ml)	Time (min)	O/P Voltage (V)	pH	Temp (° C)	Total viable count (CFU/ml)		Total coliform bacteria (CFU/ml)	
						Before	After	Before	After
Bldg. A	100	10	1,000	6.7	27	630	12	20	0
Bldg. B	100	10	1,000	6.8	27	870	< 30	< 20	0
Bldg. C	100	10	1,000	6.8	27	360	32.3	30	0
Bldg. D	100	10	1,000	6.7	27	180	< 30	24	0

จากตารางที่ 5.6 เป็นผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากอาคาร 4 หลังภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังพบว่าหลังการทดสอบแล้วมีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในความเป็นจริงหากสามารถนำน้ำทิ้งเหล่านี้ไปใช้งานได้จริงก็จะทำให้ประหยัดพลังงานและเป็นการประหยัดทรัพยากรน้ำอีกด้วย

5.4 สรุป

จากผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า การใช้สนามไฟฟ้าจากหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปทำลายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆอนุภาคคอลลอยด์โปรตีนนั้น ส่งผลให้โมเลกุลของโปรตีนสูญเสียเสถียรภาพทำให้รวมตัวตกตะกอนได้ภายในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ตามสมมุติฐานการวิจัยที่ผู้วิจัยได้ตั้งขึ้นก่อนที่จะทำการวิจัย โดยพบว่า ภายใน 1 ชั่วโมง น้ำทิ้งที่มีส่วนผสมของโมเลกุลโปรตีนที่ผ่านหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าบีโอดีเฉลี่ยลดลงเหลือ 6 mg./l ค่าซีโอดีเฉลี่ยลดลงเท่ากับศูนย์ อุณหภูมิเฉลี่ย 28.2° C และ pH เฉลี่ยเท่ากับ 7.7 ซึ่งค่าที่ได้ทั้งหมดนี้เป็นค่าที่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ที่สำคัญมีการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยไม่เกิน 60 วัตต์

ส่วนในเรื่องข้อเสียหรือข้อจำกัดของตัวหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น อย่างแรกก็คือในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผู้วิจัยใช้ทองแดงเพราะมีราคาถูกและหาได้ง่าย แต่หากต้องการให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ใช้ทองคำขาวหรือพลาสติกนุ่มน่าจะดีกว่า ประการที่สอง หากบ่อบำบัดน้ำทิ้งอยู่ที่ที่มีกระแสลมรุนแรงก็มีการกระเพื่อมของน้ำค่อนข้างสูงอาจมีผลทำให้การตกตะกอนของโมเลกุลโปรตีนช้าลง ประการที่สาม ในขณะนี้ยังไม่มีทดลองในบ่อบำบัดน้ำเสียจริงๆ (ภาคสนาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นข้อมูลที่ได้อาจไม่ชัดเจนนัก และอาจต้องเพิ่มต้นทุนในการจัดเก็บไขมัน หากใช้กับโรงงานที่มีเลือดสัตว์เกี่ยวข้อง

แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยก็หวังเพียงให้งานวิจัยนี้ได้มีโอกาสพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้จริงทั้งในภาคอุตสาหกรรมและชุมชน เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาหน้าเสียที่เกิดจากการปนเปื้อนของโมเลกุลโปรตีน ซึ่งมีต้นทุนต่ำ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำทิ้ง ทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในโรงงานอุตสาหกรรมลดลง ผลพลอยได้ก็คือช่วยให้ประเทศชาติได้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าสารเคมีจากต่างประเทศที่มีต้นทุนสูงมากในปัจจุบันด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] William H. Hayt, jr. "Engineering electromagnetics".
- [2] Matthew N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, Inc., Florida, pp. 431-463,1992.
- [3] Robert J. Hunter, "Foundation of Colloid Science", Oxford Sci. Pub., Sydney, vol. 1, 1986.
- [4] Rudolf F. Graf,"The modern power supply and battery charger circuit encyclopedia", TAB Books blue ridge summit, PA, USA., 1992, pp 84 - 100.
- [5] Martin A. Plonus, "Applied electromagnetics", Professor of Electrical Engineering and Computer Science, Northwestern University, McGraw - Hill, Inc., 1978, pp 132 - 135.
- [6] John R. Reitz, Frederick J. Milford, Robert W. Christy, "Foundations of Electromagnetic theory", Fourth Edition, Addison - Wesley Pub. Co., USA., 1993, pp 97 - 99.
- [7] Constantine A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", Arizona State University, John Wiley & Sons Inc., Canada,1989, pp 42 - 51.
- [8] คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ อุดมชัย จินะดิษฐ์ อิศราวุธ สีดาदान "การตกตะกอนโปรตีนในน้ำเสียโดยใช้วงจรทวีแรงดันแบบครึ่งคลื่น" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2539
- [9] คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ ณรงค์ เหมกรรณ์ มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์ "วิธีการนำโปรตีนจากเศษอาหารชนิดสดที่ตกค้างในนาถ่วงกลับมาใช้ใหม่ด้วยหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540
- [10] ปราณี พันธุมสินชัย "มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น" สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย พิมพ์ที่โรงพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์ 2542 หน้า 30-43
- [11] นवलพรรณ ณ ระนอง มงคล เพ็ญสายใจ "น้ำและการบำบัดน้ำเสีย" ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ จัดพิมพ์โดยโครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542 หน้า 74 - 163
- [12] สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม "คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเบื้องต้นสำหรับ โรงงาน ปรังมันต์ดัดแปรและปรังมันต์สำเร็จรูป" พิมพ์ที่โรงพิมพ์สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี 2541 หน้า 6-1 ถึง 6-26
- [13] ดร.สำรวย สังข์สะอาด "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2528 หน้า 37-50, 120-134
- [14] ศ.ดร. เกษม จันทร์แก้ว "เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม" โครงการสหวิทยาการบัณฑิตศึกษา สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2541 หน้า 485 - 624

- [15] รศ.ดร. คาวัลย์ ฉิมภู "ชีวเคมี เล่ม 1 โมเลกุลชีวภาพ" ภาควิชาชีวเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 2538 พิมพ์ที่ หจก. สำนักพิมพ์ประกายพริก กรุงเทพฯ หน้า 40 - 49
- [16] มนตรี จุฬาวัดนทล และคณะ "ชีวเคมี" ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 2542 หน้า 89 - 110
- [17] เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต "แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ" สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539 หน้า 115 - 134
- [18] สมบูรณ์ มาลานนท์ สมคิด วิริยประสิทธิ์ชัย "แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง" โครงการตำราเรียน Physics center พิมพ์ที่ หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ หน้า 9 - 91
- [19] สาโรจน์ ศิริสันสนียกุล ประวิทย์ วงศ์คงคาเทพ "วิศวกรรมเคมีชีวภาพพื้นฐาน" สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538 หน้า 26 - 34
- [20] คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์ "การวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ใหม่ของโมเลกุลโปรตีนในน้ำเสียโดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์" วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สจล. 2545 หน้า 19 - 30
- [21] คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์ สมชาย เชื้อเพชร "ชุดทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กตรอน" วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2538 หน้า 7 - 13
- [22] เกียรติศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ "การกำจัดน้ำเสีย" มิตรนราการพิมพ์ กรุงเทพมหานคร 2537
- [23] กิรติ ชยะกุลศิริ กฤษดา ปรีชนชน "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" โครงการตำราเรียน Physics center หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ หน้า 7-40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. คุณฤดี นวมเสวตร คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์ ณรงค์ เหมกรณ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ "การพัฒนาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถยับยั้งเชื้อโรคชะลอการเน่าสลายและนำกลับโปรตีนชนิดสดที่ตกค้างในน้ำเสียได้" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2541
2. คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์ คุณฤดี นวมเสวตร สุทธิชัย นพนาถิพงษ์ นवलพรรณ ณ ระนอง ณรงค์ เหมกรณ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ "การบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์และนำกลับสารตกค้างกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีตกตะกอนเร็วของหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า" การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ในสหสวรรค์ใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2543
3. คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์ คุณฤดี นวมเสวตร สุทธิชัย นพนาถิพงษ์ นवलพรรณ ณ ระนอง ณรงค์ เหมกรณ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ "การแยกอัลบูมินแนวใหม่เพื่องานตรวจวินิจฉัยโรคจากปัสสาวะแบบอเล็กโตรสแตติกส์วงแหวน" การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ในสหสวรรค์ใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2543
4. คุณฤดี นวมเสวตร คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์ สุทธิชัย นพนาถิพงษ์ ณรงค์ เหมกรณ์ นवलพรรณ ณ ระนอง ประสิทธิ์ แผ้วบาง มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ "การศึกษาและออกแบบระบบหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอเล็กโตรควงแหวนคู่ขนาน 4 จุด นำกลับสารตกค้างจากน้ำเสียของโรงงานฆ่าสัตว์กลับมาใช้ใหม่" การประชุมวิชาการประจำปีระดับชาติ ครั้งที่ 12 (สวสท'43) สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 2543
5. D. Nuamsawade, K. Packamwongsang, N. Hemmakorn, S. Nopnakeepong, M. Leelajindakraierk, N. Naranong, P. Pawebang, S. Prawitwong, W. Chuapong, " The study of the Reused of Draining Water from Evaporator of the Split Type Air Conditions by Using Electromagnetic Reaction Tank to Remove Bacteria" First Regional Conference on Energy Towards a Clean Environment (RCETCE), The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Chaing Mai, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. มาตรฐานน้ำทิ้ง

มาตรฐานน้ำทิ้งนี้ได้คัดลอกมาเพียงบางส่วนของที่เกี่ยวข้องกับการทดลองในงานวิจัยเท่านั้น ซึ่งเป็นการคัดลอกมาจาก "ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 ว่าด้วยเรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน" ดังนี้

1. น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องคุณสมบัติคือ ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0
2. สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
4. สีต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
5. กลิ่นต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

อีกส่วนหนึ่งเป็นประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบาย ออกจากโรงงานให้มีค่าแตกต่างจากที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

1. ค่าบีโอดี ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามบัญชีท้ายกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 คือ
 - 1.1 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสัตว์ ประเภทการฆ่าสัตว์
 - 1.2 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเมล็ดพืช หรือหัวพืช ประเภทการทำแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารจากแป้ง อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง
 - (2) โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารสัตว์ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง
 - (3) โรงงานหมัก ช้ำແລະ ອບ ປັນหรือบด ฟอก ขัดและแต่ง แต่งสำเร็จ อัดให้เป็นลายนูน หรือเคลือบสีหนังสัตว์
 - (4) โรงงานผลิตเชื้อหรือกระดาษอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง
 - (5) โรงงานห้องเย็น
2. ค่าซีไอดี ไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามบัญชีท้ายกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 คือ
- 2.1 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารสัตว์ ประเภทการทำอาหารผสมหรืออาหารสำเร็จรูปสำหรับเลี้ยงสัตว์
 - 2.2 โรงงานหมัก ช้ำແລະ ອບ ປັນหรือบด ฟอก ขัดและแต่งสำเร็จ อัดให้เป็นลายนูน หรือเคลือบสีหนังสัตว์
 - 2.3 โรงงานผลิตเชื้อ หรือกระดาษอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

ประกาศ ณ วันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2540

นายเทียร เมฆานนท์ชัย

อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ภาคผนวก ค.

การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบทั่วไปกับระบบ ทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบทั่วไป

1. มีราคาสูง ใช้พื้นที่ขนาดใหญ่
2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง
3. ต้องมีการฝึกผู้ที่จะควบคุมระบบและมีค่าซ่อมบำรุงระบบ
4. ต้องมีระบบดูแลความปลอดภัยเป็นพิเศษเพื่อป้องกันการระเบิด
5. ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการนำกลับและเก็บก๊าซไว้เพื่อใช้ประโยชน์
6. มีปัญหาเรื่องกลิ่น

ระบบทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1. มีขนาดเล็ก
2. ต้นทุนต่ำ
3. ไม่ต้องใช้กระบวนการหลายขั้นตอน
4. ไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่น
5. ประหยัดพลังงาน เพราะทั้งระบบใช้พลังงานไม่เกิน 60 วัตต์เท่านั้น
6. ใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้อย
7. ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการควบคุม

ประวัติผู้เขียน

นางสาว คุณฤดี นวมเสวตร เกิดเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ. 2514 ที่ อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ปีการศึกษา 2537

ปี พ.ศ. 2537 ทำงานในตำแหน่ง Sales Engineer ที่บริษัท Confide Technology Co., Ltd.

ปี พ.ศ. 2540 ทำงานในตำแหน่ง Sales Engineer ที่บริษัท Econlite Manufacturing (Thailand) Co., Ltd. และเป็นอาจารย์พิเศษที่โรงเรียนเทคโนโลยีบางกะปิ กรุงเทพฯ ควบคู่ไปด้วย

ปี พ.ศ. 2542-2543 ได้รับทุนวิจัยจากมูลนิธิโทร เพื่อการวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย เป็นระยะเวลา 1 ปี โดยเป็นนักวิจัยในโครงการ "การพัฒนาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถขยับยังเชื้อโรคชะลอการเน่าสลายและนำกลับโปรตีนชนิดสดที่ตกค้างในน้ำเสียได้" โดยมี ผศ. ดร. สุทธิชัย นพนาดีพงษ์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ร่วมกับ ผศ. ดร. นवलพรรณ ณ ระนอง ภาควิชาชีววิทยา สจล. เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย ซึ่งในระหว่างที่ได้รับทุนวิจัยนั้นได้ส่งผลงานทางวิชาการร่วมตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการหลายครั้ง และทำงานประชุมวิชาการประจำปีระดับชาติ ครั้งที่ 12 สวสท.' 43 (EEAT 2000) ซึ่งจัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย ได้รับการคัดเลือกให้เป็นผลงานวิชาการที่ดีที่สุดในงาน และเป็นผลงานวิชาการเดียวที่ได้รับในปีนั้น ดังใบประกาศนียบัตรที่แนบมาด้วยนี้

ปี พ.ศ. 2543-2544 ทำงานในตำแหน่งลูกจ้างชั่วคราว กองวิเคราะห์แผนงานและโครงการวิจัย สภาวิจัยแห่งชาติ