

การวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ใหม่ของโมเลกุลโปรตีน
ในน้ำเสียโดยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์

ANALYSIS OF RECYCLE OF PROTEIN MOLECULE
IN WASTEWATER BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

คมเพชร บักคำวงษ์สงข

KOMPHET PACKAMWONGSANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-585-7

การวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ใหม่ของโมเลกุลโปรตีน
ในน้ำเสียโดยวิธีไฟไนต์อิลเมนต์

ANALYSIS OF RECYCLE OF PROTEIN MOLECULE
IN WASTEWATER BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

คมเพชร ปักคำวงษ์สังข์

KOMPHET PACKAMWONGSANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 43284
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974 - 648 - 585 - 7

**ANALYSIS OF RECYCLE OF PROTEIN MOLECULE
IN WASTEWATER BASED ON FINITE ELEMENT METHOD**

KOMPHEE PACKAMWONGSANG

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

2002

ISBN 974 – 648 – 585 – 7

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การนำกลับมาใช้ใหม่ของโมเลกุลโปรตีน ในน้ำเสียโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อนักศึกษา	นาย คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์
รหัสประจำตัว	41061191
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ณรงค์ เหมกรณ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายในการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า ในสารไดอิเล็กตริกน้ำผสมโปรตีนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อออกแบบเครื่องแยกโมเลกุลโปรตีนออกจากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่เพื่อทดแทนการใช้สารเคมีโดยวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่ 1 คือวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ อธิบายปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวในสารไดอิเล็กตริกออกจากอิเล็กโทรดรูปทรงต่างๆ ส่วนที่ 2 ออกแบบวงจรและอิเล็กโทรด ส่วนที่ 3 นำแบบจำลองที่ได้ประคิษฐ์ขึ้น คำนวณเปรียบเทียบกับแบบจำลองของโมเลกุลโปรตีนเพื่อหาประสิทธิภาพในการออกแบบระบบหมุนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถใช้งานได้จริง

Thesis Title	ANALYSIS OF RECYCLE OF PROTEIN MOLECULE IN WASTEWATER BASED ON FINITE ELEMENT METHOD		
Student	Komphet	Packamwongsang	
Student ID	41061191		
Degree	Master of	Engineering	
Programme	Electrical	Engineering	
Year	2002		
Thesis Advisor	Assoc. Prof.	Narong	hemmakorn
Thesis co - Advisor	Assoc. Prof.	Monthon	Leelajindrirk

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the mathematical simulation and analysis of the electric potential and electric fields in dielectric that consisting of water and protein. The mathematical simulation is used finite element method (FEM) for design the separation and recycle of protein molecules in wastewater, which can be replaced chemical method. The thesis is divided into 3 part: first part is the simulation method by using finite element method to be explained distribution of electromagnetic phenomenon from various electrodes in the dielectric. Second part is designing the circuit and electrode. Third part, comparing the simulation of evaluation with the simulation of protein molecules for actual usable and defined the efficiency of electromagnetic float system design.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ณรงค์ เหมกรณ์ และ รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ที่ช่วย
กรุณาชี้แนะแนวทางในการทำวิจัยและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ได้

ขอขอบพระคุณ ดร. สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ รองผู้อำนวยการฝ่ายสื่อสาร สำนักวิจัย
คอมพิวเตอร์และบริการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้แนว
ทางในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาฟอร์แทรนมาวิเคราะห์แบบจำลองจนสำเร็จได้และให้กำลังใจ
ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร. นวณพรรณ ณ ระนอง และ คุณ ประสิทธิ์ แผ้วบาง ภาค
วิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่
ช่วยวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงวิทยาศาสตร์โปรตีนและช่วยทดสอบคุณสมบัติของน้ำ

ขอขอบพระคุณ Computer & Communication Foundation (C&C) ที่กรุณาสนับสนุนให้
ทุนการศึกษาตลอดจนจบหลักสูตร

ขอขอบพระคุณ “มูลนิธิโทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย” ที่ช่วยสนับสนุน
ทุนการทำวิจัยในโครงการ “การศึกษาและพัฒนาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถนำกลับ
โปรตีน ยับยั้งเชื้อและชะลอการเน่าสลายจากน้ำเสียได้”

และหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์และมีคุณค่าต่อสังคมประเทศชาติ ผู้วิจัย
ขอมอบความดีนี้แด่ บิดา มารดา พร้อมทั้งครอบครัวของข้าพเจ้า และ คุณจุจตุดี นวมเสวตร ที่
ช่วยตรวจสอบและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 การดำเนินการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานของคอลลอยด์.....	4
2.1 ระบบคอลลอยด์.....	6
2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์.....	7
2.3 การเกิดประจุของอนุภาคคอลลอยด์	7
2.3.1 ความไม่บริสุทธิ์ของผลึกสาร.....	7
2.3.2 ประจุไฟฟ้าของอ็อนที่ถูกดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์.....	8
2.3.3 การละลายตัวของอ็อน.....	8
2.3.4 การแตกตัวของอ็อน	8
2.4 Electric DoubleLayer.....	9
2.5 เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์.....	11
2.6 การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์.....	12
บทที่ 3 คุณสมบัติและ โครงสร้างของ โพรตีนที่ทำให้เกิดคอลลอยด์	13
3.1 โพรตีน.....	13
3.2 คุณสมบัติของโปรตีนและกลุ่มของโปรตีนเมื่ออยู่ในน้ำ.....	13
3.3 ความแตกต่างทางเคมีและการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าฯเคมีทำลายคอลลอยด์.....	14
3.3.1 การใช้สารเคมีทำโคแอกกูเลชัน.....	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2 ปฏิกริยาของสารส้มและสารประกอบเหล็กในน้ำ.....	14
3.3.3 ใช้หลักการทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำโคแอกกูเลชัน.....	15
3.4 การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดเสถียรภาพของคอลลอยด์โปรตีน.....	17
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบเครื่องนำกลับ โมเลกุลโปรตีน.....	19
4.1 ไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร.....	19
4.2 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	19
4.3 การออกแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM).....	22
4.4 แบบจำลองและอัลกอริทึมที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	22
4.5 อัลกอริทึมของ Auto Mesh Generation.....	31
4.5.1 ความหมายของบล็อก.....	31
4.5.2 การแบ่งเป็นส่วนย่อยของแต่ละบล็อก.....	33
4.5.3 การเชื่อมต่อในแต่ละบล็อก.....	32
4.6 ผลการคำนวณของ Auto Mesh และฟังก์ชันที่ตำแหน่งของโปรแกรม.....	35
4.7 แบบจำลองที่ได้จากการคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบได้อย่างไร.....	36
4.8 การออกแบบระบบเครื่องแยกโมเลกุลโปรตีน.....	44
4.9 หลักการทำงานของระบบเครื่องแยกโปรตีน.....	49
บทที่ 5 การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง.....	50
5.1 ขั้นตอนการทดสอบ.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
6.1 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก	
-ภาคผนวก ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	67
-ภาคผนวก ข. โปรแกรมช่วยในการคำนวณและออกแบบ.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบอัตราเร็วในการตกตะกอนของสารต่างๆ.....	5
6.4 Load Schedule ของระบบถังปฏิกิริยาสนามเหล็กไฟฟ้า.....	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกของสารต่างๆในน้ำ.....	5
2.2 คอลลอยด์ชนิดลบ.....	6
2.3 ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว.....	7
2.4 การแตกตัวเป็นไอออนของ Functional group.....	8
2.5 แบบจำลองของ Electrical Double Layer	10
2.6 พฤติกรรมของอนุภาคคอลลอยด์เมื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำ.....	11
3.1 โปรตีนชนิดโกลบูลาร์ที่แสดงอำนาจการมีประจุบวกลบ	13
3.2 โครงสร้างโมเลกุลคอลลอยด์ที่เกิดจากน้ำกับซิลิกอนไดออกไซด์.....	16
3.3 ปฏิกิริยาการแขวนลอยได้ในน้ำของอนุภาคคอลลอยด์ที่มากกว่าหนึ่งโมเลกุล.....	16
3.4 เป็นพฤติกรรมของแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผล Ionic Bonding.....	17
4.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่างๆ.....	20
4.2 เอลิเมนต์แบบอย่างไรประกอบด้วยสามจุดต่อที่ไม่รู้ค่า ณ ตำแหน่งจุดต่อ.....	20
4.3 แบบจำลองการกระจายของอนุภาคคอลลอยด์ของ Stern – Gouy – Chapman.....	23
4.4 แบบจำลองการเริ่มต้นที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์จากการวางตำแหน่งอิเล็กโทรดระหว่างน้ำกับโปรตีน.....	27
4.5 เอลิเมนต์ 8-node.....	31
4.6 รูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า.....	32
4.7 กระบวนการทำงานของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	34
4.8 อัตราความเข้มข้นโดยเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น.....	36
4.9 การทดลองจริงของเครื่องแยกโปรตีน.....	37
4.10 เปลี่ยนแปลงภาพใหม่โดยใช้แบบหล่อคปิเปิด.....	38
4.11 การวางตำแหน่ง.....	39
4.12 การคำนวณโดย Auto Mesh Generation เมื่อมองด้านบนอิเล็กโทรดที่ไม่สมดุล.....	40
4.13 พฤติกรรมของศักดาไฟฟ้าที่กระจายในสารไดอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดบดง.....	40
4.14 การคำนวณของ Auto Mesh Generation.....	41
4.15 ผลการคำนวณการกระจายของศักดาไฟฟ้าในแต่ละเอลิเมนต์โดยใช้ FEMประดิษฐ์ขึ้น.....	42

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ผลการคำนวณการกระจายของศักดาไฟฟ้าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคู่ขนาน4จุด.....	43
4.17 เป็นรูปโครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องแยกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบปีเปิด.....	44
4.18 ภาพจำลองถึงปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคู่ขนาน4 จุด.....	45
4.19 รูปต้นแบบจริงของถึงปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคู่ขนาน 4 จุด.....	45
4.20 ส่วนบนของถึงที่ประกอบด้วยระบบติดตั้งวงจรควบคุมการจ่ายสนามแบบขนาน 4 จุด...	47
4.21 อิเล็กโทรดแบบกรงกระรอกที่ทำจากท่อ PVC มองจากด้านบน.....	47
4.22อิเล็กโทรดแต่ละคู่จะถูกวางเอียงกันแบบคั่นชนปลายเพื่อป้องกันการหักล้างของฟลักซ์...	48
4.23 เป็นอิเล็กโทรดอีกด้านก็จะถูกจัดวางในลักษณะเดียวกัน.....	48
4.24 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องแยกโปรตีนอัลบูมินแบบหลอดปีเปิดฯ.....	49
4.25 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน.....	49
5.1 เป็นการทดสอบโดยการวัดค่าศักดาไฟฟ้าสถานะมีไหลและไม่มีไหล.....	50
5.2 เป็นสัญญาณแรงดันทางด้านเข้าพุทขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	50
5.3 สัญญาณทางเข้าพุทขณะมีภาระน้ำ 100 มิลลิลิตร/โปรตีนอัลบูมิน 2 ม.ก.....	51
5.4 เมื่อทำการขยายและทำการวัดศักดาไฟฟ้าเล็กๆที่เกิดจากการตกคร่อมภาระน้ำกับ โปรตีน.....	51
5.5 เป็นแบบจำลองของ(Powell et al., 1986;Banet and Weaver,1991).....	52
5.6 เป็นผลตอบสนองของแรงดันในแบบจำลอง RC จากสมการ(68).....	53
5.7 เป็นผลการคำนวณแรงดันและกระแสชั่วขณะจากสมการ(68)กับ(70).....	54
5.8 การใช้ electrostatic pipette ทดสอบกับอัลบูมินที่มีน้ำหนัก 2mg/น้ำ 100 ml.ฯ.....	55
5.9 อัตราการตกตะกอนของโปรตีนเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ฯ.....	56
5.10 ก.เป็นการวางตำแหน่งตัวจ่ายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวการทดสอบในตู้ทดลอง.....	56
5.10 ข.เป็นสภาพน้ำที่จำลองขึ้นมีเลือดสัตว์ 1 ลิตรต่อน้ำ 1,000 ลิตร.....	57
5.10 ค.การใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบปีเปิดทดสอบแยก โปรตีนอัลบูมินออกจากน้ำ.....	57
5.10 ง. ใช้เวลา 30 นาทีจะสามารถมองเห็นชั้นไขมันและฟองก๊าซถูกแยกออกมาลอยเหนือน้ำเป็น ผลการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลของน้ำ.....	58
5.10 จ. ใช้เวลา 1 ชั่วโมงจะพบว่าโมเลกุลของเลือดถูกแยกออกจากน้ำและตกตะกอนลงที่ก้นบ่อ และทำให้น้ำสะอาดขึ้น.....	58
6.1 เป็นระบบบ่อน้ำบาดน้ำเสียแบบชีวะภาพ.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 แสดง Load Schedule ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวะภาพ.....	61
6.3 แสดง Load Schedule ของถังปฏิกริยาฯ 10 ตัว.....	62

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา ปัญหาและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนวิธีการ และขั้นตอนแนวทางในการดำเนินการทำวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าว เป็นลำดับหัวข้อต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัญหาที่เกิดจากกากโปรตีนที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ ยกตัวอย่างเช่น ขนาด 10^6 ถึง 10^9 มิลลิเมตร เมื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำจะเกิดปัญหาเน่าเสียอย่างรวดเร็วและยากต่อการแก้ปัญหา เป็น เพราะว่างค์ประกอบโมเลกุลขนาดเล็กๆของ โปรตีนจะแสดงคุณสมบัติเป็นประจุไฟฟ้าบวกลบ แปรตามสภาพ pH ของน้ำและก่อตัวเป็นมลพิษทางน้ำ เรียกว่าปรากฏการณ์คอลลอยด์โปรตีน และ ทำให้เกิดผลต่อเนื้อที่ซ้ำซ้อนต่อแหล่งน้ำดิบหลายอย่างเช่น เป็นแหล่งเจริญพันธ์ของจุลินทรีย์ที่ก่อ โรคทางน้ำไม่มีจับสั่นและจะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนสภาพของน้ำนํารังเกียจ เป็นเพราะว่า คุณสมบัติที่สำคัญของโมเลกุลโปรตีนจากการศึกษาพบว่า การที่คอลลอยด์โปรตีนดำรงหรือแขวนลอยในน้ำและแยกออกจากน้ำได้ยากก็เพราะว่าสัมพันธภาพของโมเลกุลโปรตีนกับโมเลกุลของน้ำจะมีความสอดคล้องเกี่ยวเนื่องกันระหว่างประจุไฟฟ้าบวกกับลบดังจะกล่าวในบทต่อไปและคุณสมบัติดังกล่าวนี้ นักวิทยาศาสตร์ให้คำจำกัดความว่า ปรากฏการณ์ใดที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า 10^6 มิลลิเมตร ก็ตามที่มีคุณสมบัติรอบๆผิวเป็นกลุ่มอนุภาคประจุบวกหรือลบจะสามารถแสดง สนามไฟฟ้าออกมารอบๆผิวถูกเรียกว่าคอลลอยด์ไม่ว่าจะอยู่ในน้ำหรืออากาศดังนั้นกากหรือโมเลกุลโปรตีนเมื่อแขวนลอยอยู่ได้ในน้ำ จึงยากต่อการแก้ปัญหาและความเข้าใจในทางวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม ดังนั้นในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากโปรตีนนี้จะเกิดปัญหามาก เช่น อุตสาหกรรมทำนํากุ้งกุลาดำ อุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับอาหารสัตว์ โรงงานแปรรูปอาหารชนิด สด โรงแช่แข็งอาหารชนิดสด โรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น ซึ่งต้องใช้น้ำชำระล้างเป็นปริมาณหลายล้านลูก บาศก์เมตรต่อวัน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นที่จะนำกลับโมเลกุลโปรตีนโดยวิธีการตกตะกอนเร็วและ นำกลับโดยอาศัยปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสถิตย์ เป็นปฏิกิริยานำกลับที่ไม่มีสารเคมี มาเกี่ยวข้อง โมเลกุลที่ตกตะกอนลงมาเป็นโปรตีนบริสุทธิ์โดยไม่จำเป็นต้องแยกสารเคมีออก เหมาะที่จะนำไปศึกษาและแปรรูปเป็นอาหารสัตว์หรือทำอย่างอื่นได้ เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายแล้ว วิธีนี้จะประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายและที่สำคัญพบว่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเสนอวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้การประมาณค่าแบบสามเหลี่ยม 2 ทิศทาง มาวิเคราะห์หาพฤติกรรมทางกายภาพของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ศักไฟฟ้ากับ ความเข้มข้นของปริมาณโปรตีนอัลบูมินที่ลดลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ที่กระจายตัวในหลอดทดลองเพื่อให้สามารถออกแบบรูปทรงของภาชนะหรือวัสดุที่ทำการแยกให้เหมาะสมสามารถนำหลักการนี้ไปใช้ได้จริงๆและจะประหยัดเวลามากที่สุดในการออกแบบ จากการนำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นจากภาษาฟอร์แทรนโดยอาศัยอัลกอริธึมทางคณิตศาสตร์เราสามารถออกแบบเครื่องแยกโปรตีนสนามไฟฟ้าสถิตย์ต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูงขั้นตอนแรกได้ทดลองเครื่องแยกโปรตีนระดับห้องปฏิบัติการ โดยการจ่ายพลังงานต่ำที่ระดับแรงดัน 150 โวลต์ดีซี กระแส 20 มิลลิแอมแปร์ และพลังงานที่ใช้ไปเท่ากับ 3 วัตต์ได้ทำการทดสอบแยกโปรตีนอัลบูมิน กับหลอดทดลองแบบปิเปต ที่มีอัตราส่วนอัลบูมินบริสุทธิ์ 98 % ในปริมาณ 2 mg./น้ำ 100 ml. เมื่อ ทำการทดลองโดยเฉลี่ยมากกว่า 20 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพในการแยกโปรตีนเพื่อนำมาศึกษาวิเคราะห์ใช้เวลาในการแยกไม่เกิน 5 นาที สามารถแยกอัลบูมิน ได้ 94.5 % ซึ่งหลักการนี้อาจจะมีประโยชน์ในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ขั้นตอนที่ 2 ข้าพเจ้าได้ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบหรือถูกเรียกว่า เครื่องแยกโปรตีนแบบถังปฏิกริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคู่ขนาน 4 จุดซึ่งได้ข้อสรุปที่น่าพอใจโดยรายละเอียดของการออกแบบจะกล่าวไว้ในการประยุกต์ใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เป็นเพราะว่ากระบวนการนำกลับโปรตีนและบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมีจะมีความยุ่งยากซับซ้อน ต้นทุนมีราคาแพง ใช้เวลานานและใช้พลังงานไฟฟ้ามาก ที่สำคัญหลังจากโปรตีนถูกแยกออกมาแล้วจะทำได้แค่ป้อนแต่ก็ต้องปรับสภาพก่อนเสมอไม่สามารถจะนำไปใช้ได้ ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นที่จะนำกลับโมเลกุลโปรตีนแบบปฏิกริยาสนามไฟฟ้าเพราะมีความรวดเร็ว ขนาดเล็กกว่าเพราะระบบทั้งหมดจะถูกออกแบบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะสามารถเรียนรู้ได้ง่ายสะดวกกับการบำรุงรักษา และโปรตีนที่ได้จะมีความบริสุทธิ์เหมาะที่จะนำไปศึกษาคุณสมบัติเพื่อแปรรูปใช้ประโยชน์ใหม่ได้ ปรากฏการณ์คอลลอยด์ของโปรตีน ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมถือว่าแก้ปัญหาได้ยาก ด้วยเหตุผลที่ว่า โมเลกุลคอลลอยด์จะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวขัดขวางการรวมตัว และคุณสมบัติสนามไฟฟ้ารอบผิวนี้อาจจะทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาวิทยานิพนธ์นี้ข้าพเจ้าจึงเน้นที่จะศึกษาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆผิว เพื่อศึกษาถึงกระบวนการแยกโมเลกุลโปรตีนและอธิบายปรากฏการณ์การรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กระดับ โมเลกุลภายใต้เครื่องมือและโปรแกรมที่ข้าพเจ้าได้ประดิษฐ์ขึ้นที่สำคัญข้าพเจ้าต้องการเรียนรู้วิธีการประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสถาบันฯและประเทศชาติอย่างสูงสุดเพื่อนำมาถึงการแก้ปัญหาอย่างถูกต้องต่อกระบวนการและขั้นตอนของการประยุกต์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าให้ถูกวิธี เพื่อช่วยแก้ปัญหาสิ่ง

แควดล้อมและกระบวนการแปรรูปจากโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับน้ำเพื่อศึกษาหาวิธีป้องกันการเกิดปัญหาน้ำเสียและมลพิษซ้ำซ้อนเพื่อให้ได้วิธีนำกลับโมเลกุลโปรตีนแบบใหม่สามารถที่จะนำมาศึกษาแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ได้อาจจะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ซึ่งปัจจุบันกำลังทวีความรุนแรงหรืออุตสาหกรรมอย่างอื่นที่มีความต้องการ

1.3 การดำเนินการวิจัย

เริ่มจากการศึกษาหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่ออกแบบมาจากระบบสวิตซึ่งแรงเคลื่อนที่ระดับหลอดทดลองหรือห้องปฏิบัติการเพื่อทำการออกแบบระบบใหญ่ต่อไปโดยสัมพันธ์ภาพนี้จะจ่ายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ผ่านลงไปไนอิเล็กโทรดวงแหวนและอิเล็กโทรดแบบขดลวดโซลินอยด์ในน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อเนื่องและแตกตัวได้รวดเร็วในสารตัวกลางคือน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ไปทำลายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบผิวที่เกิดจากธรรมชาติของโปรตีนที่ระดับโมเลกุลนั่นเอง ซึ่งเท่ากับว่าโมเลกุลโปรตีนรวมตัวกันได้ภายใต้สนามไฟฟ้าและรวมตัวอย่างรวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับทางเคมีและชีวภาพ หลังจากโปรตีนตกตะกอนแล้วไม่จำเป็นต้องแยกสารเคมีออก ซึ่งจะเป็นหลักการใหม่ที่นำเสนอ โดยแตกต่างจากวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

การนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มาช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกายภาพเพื่อหาศักดาไฟฟ้าที่กระจายในน้ำในหลอดทดลองปิเปตสนามไฟฟ้าสถิตย์ จะทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบที่ต้องการแยกที่มีความเร็วในการแยกโปรตีนสูง อีกทั้งจะลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ข้อมูลและข้อมูลในการออกแบบจะถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นและที่สำคัญวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถแสดงพฤติกรรมของศักดาไฟฟ้าจากโหมคของโปรแกรมกราฟฟิกได้

ในอนาคตเราอาจจะสามารถควบคุมสนามไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องแม่นยำและตรงต่อเป้าหมายมากยิ่งขึ้นถ้าได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทางหลักการของโปรแกรม

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานของคอลลอยด์

คำว่า “Colloid” มาจากภาษากรีกที่ว่า “kolla” ผสมกับคำว่า “eidos” ซึ่งหมายถึง สารละลาย คล้ายกาว (like-glue) คำว่า คอลลอยด์ (Colloid) นี้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1681 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Thomas Graham เพื่อใช้ในการแยกแยะสารบางประเภทที่มีลักษณะเป็นแบบที่ไม่มีรูปร่าง และคล้ายวุ้นหรือเจลาติน เช่น พวกแป้ง กาว agar และ jelly เป็นต้น ในปัจจุบันนี้ คำว่า คอลลอยด์ ได้ถูกนำมาใช้กับสารต่างๆ ไปที่มีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคคอลลอยด์ (Colloid Particles) เช่น โปรริน นํ้านม เป็นต้น

ในสารละลายที่แท้จริง (True Solutions) ทั่วๆ ไป เช่น สารละลายของเกลือแกง หรือนํ้าตาลในนํ้า สารละลายของกรดหรือด่างในนํ้า มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคของตัวถูกละลาย (Solute) เล็กกว่า 10A (Angstrom) แต่ในอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่แขวนลอยกระจัดกระจายอยู่ระหว่าง 10^{-7} cm (10 A°) ถึง 2×10^{-5} cm ($2,000 \text{ A}^\circ$) สำหรับระบบใดๆ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10,000 A หรือ 1μ (Micron) ขึ้นไปเราจัดเป็น Suspension

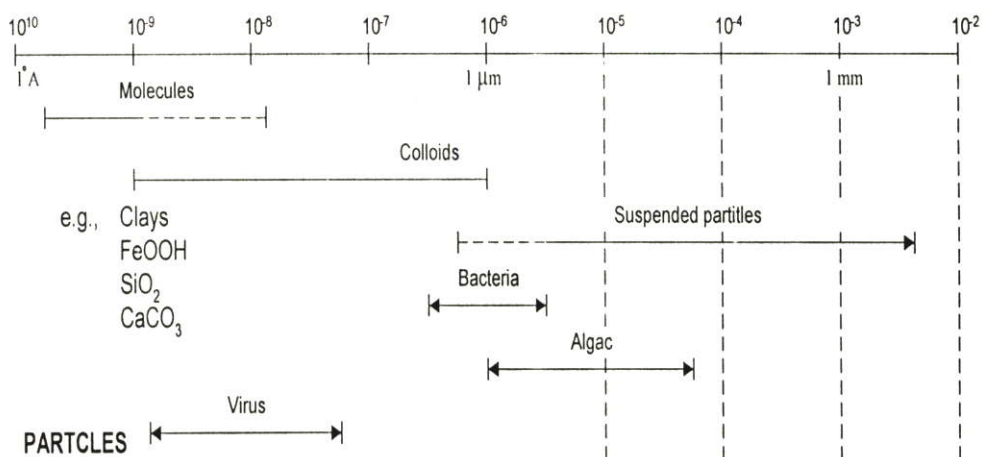
$$1 \text{ Angstrom } (^\circ\text{A}) = 10^{-7} \text{ mm.} = 10^{-8} \text{ cm.}$$

$$1 \text{ Micron } (\mu) = 10^4 \text{ }^\circ\text{A} = 10^{-4} \text{ cm.}$$

$$1 \text{ Micron } (\mu) = 10^3 \text{ millimicron } (\text{m}\mu)$$

$$1 \text{ millimicron } (\text{m}\mu) = 10 \text{ }^\circ\text{A} = 10^{-7} \text{ cm.}$$

จะเห็นได้ว่า ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์อยู่กึ่งกลางระหว่างขนาดตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลายเนื้อแท้ (True solution) กับขนาดอนุภาคที่แขวนลอย (Suspended particles) ซึ่งปัญหานี้เองที่ทำให้ระบบของคอลลอยด์ยากต่อการศึกษามากกว่าที่สังเกตุ โมเลกุลคอลลอยด์ จะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดเป็นตัวขัดขวางการรวมตัวและการอยู่อย่างไม่งคงที่ของ โมเลกุลชนิดนี้จึงเป็นอุปสรรคปัญหาต่อการทำงานอย่างรู้จริงในสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและวิศวกรรมไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 การจำแนกของสารต่างๆในน้ำ

ตารางที่ 1 .1 การเปรียบเทียบอัตราเร็วในการตกตะกอนของสารต่างๆ

สารต่างๆ	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm.)	เวลาที่ต้องการในการตก ตะกอนไกล 1 เมตร
กรวด	10	1 วินาที
ทรายหยาบ	1	10 วินาที
ทรายละเอียด	0.1	120 วินาที
ตะกอนดิน (Silt)	0.01	120 วินาที
แบคทีเรีย	0.001	192 ชั่วโมง
คอลลอยด์	0.0001	730 วัน
คอลลอยด์	0.00001	10 ปี
คอลลอยด์	0.000001	มากกว่า 20 ปี

เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ มีขนาดเล็กมาก ไม่อาจมองเห็นอนุภาคของมันได้ ถึงแม้ว่าจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาที่ยังมองไม่เห็น แต่ต้องใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Ultramicroscope จึงจะสามารถมองเห็น อนุภาคคอลลอยด์ นอกจากนี้ เรายังไม่สามารถกรองอนุภาคคอลลอยด์ด้วย

กระดาษกรองธรรมดาได้ เพราะอนุภาคคอลลอยด์สามารถลอดรูกระดาษกรองออกไปได้เหมือนกับสารละลายที่แท้จริง

การที่อนุภาคคอลลอยด์สร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมนั้น เนื่องจากมันมีขนาดเล็กมากๆ จนไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายใต้เวลาจำกัด จากการคำนวณปรากฏว่าในการตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์ขนาด 1×10^{-4} มม. เป็นระยะทางหนึ่งเมตร ต้องใช้เวลานานถึง 730 วัน ในขณะที่ทรายละเอียดขนาด 0.1 มม. ใช้เวลาเพียง 2 นาที คูตารางที่ 1.1 ประกอบ

ดังนั้นระยะเวลาในการแก้ปัญหาในระบบน้ำเสียจึงไม่เพียงพอสำหรับการตกตะกอนของคอลลอยด์ ตลอดจนเครื่องกรองน้ำก็ไม่สามารถกำจัดคอลลอยด์ได้อย่างหมดสิ้น

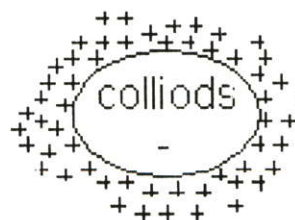
2.1 ระบบคอลลอยด์ (Colloid System)

ระบบคอลลอยด์ อาจจำแนกแบ่งตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Dispersed Phase และ Dispersing Phase ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน เรียกระบบนี้ว่า Hydrophobic แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง ระบบนี้เรียกว่า Hydrophilic

ประเภทที่เป็น Hydrophobic ได้แก่ ดินเหนียว ทอง และโลหะอื่นๆ เป็นต้น

ประเภทที่เป็น Hydrophilic ได้แก่ โปรตีน น้ำสบู่ และน้ำผงซักฟอก เป็นต้น

คอลลอยด์ทั้งสองประเภทนี้ ชนิด Hydrophobic สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่า ส่วน Hydrophilic จะแยกออกจากน้ำได้ยาก เหตุผลต่างๆ คือ คอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) จะชอบน้ำ มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะจับกลุ่มกัน เพราะโมเลกุลของน้ำเสมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันมิให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกับน้ำ ประกอบด้วย H_2O รูปภาพที่ 2.2 ประกอบ



รูปที่ 2.2 คอลลอยด์ชนิดลบ[6]

จากรูปที่ 2.2 แสดงคอลลอยด์ชนิดลบมีโมเลกุลชนิดบวกของน้ำล้อมรอบได้เคยมีการทดลองโดยใช้แรงเหวี่ยงในการแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ โดยต้องใช้แรงเหวี่ยงถึงแสนเท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก (เท่ากับ 100,000 เท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก)

2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

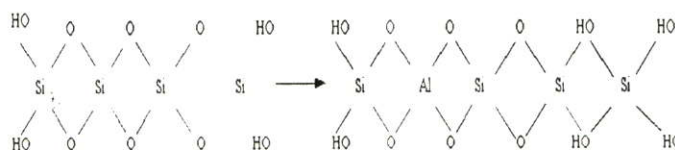
สิ่งที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีความแตกต่างจากตะกอนแขวนลอย อะตอม และโมเลกุลขนาดเล็ก คือ ขนาด ซึ่งได้กล่าวไปแล้ว และอีกอย่างหนึ่งก็คือ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์อาจมีประจุบวก หรือ ประจุลบก็ได้แต่ที่มักพบโดยทั่วไปก็คือ อนุภาคลบ และจะเป็นอนุภาคแบบไฮโดรโฟบิก (อนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ) ตัวอย่างของอนุภาคประจุลบในน้ำคือ ความขุ่นในน้ำผิวดิน ซึ่งส่วนมากเป็นอนุภาคของดินเหนียวชนิดต่างๆ อนุภาคประจุบวกมักเป็นอินทรีย์สาร ซึ่งเป็นอนุภาคแบบไฮโดรฟิลิก การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำ โดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ อนุภาคคอลลอยด์ได้ประจุไฟฟ้ามาจากหลายทางดังต่อไปนี้

2.3 การเกิดประจุของอนุภาคคอลลอยด์

เกิดจากหลายสาเหตุ ดังต่อไปนี้คือ

2.3.1 ความไม่บริสุทธิ์ของผลึกสาร

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์อาจได้มาจากการแลกเปลี่ยนอะตอมของผลึกอนุภาคกับอะตอมภายนอกซึ่งมีประจุไฟฟ้าไม่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ Al^{3+} แลกเปลี่ยนกับ Si^{4+} ซึ่งอยู่ในโครงสร้างผลึกของดินเหนียว จากรูปที่ 2.3 ทำให้อนุภาคดินเหนียวมีประจุน้อยลงจึงแสดงอำนาจของประจุลบ ประจุลบของความขุ่นในน้ำผิวดินมีกำเนิดดังที่เพิ่งกล่าวไปเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.3 ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว

จากรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายอัตราการเกิดประจุไฟฟ้าได้ ดังนี้ ในสภาพปกติอะตอมย่อยแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นกลาง (Neutral) นั่น คือ มีประจุไฟฟ้าบวกเท่ากับประจุไฟฟ้าลบหรือ

ประจุไฟฟ้ารวมเท่ากับศูนย์ ประจุเหล่านี้จะออกแรงดึงดูดกันเองภายใน จึงไม่มีอำนาจไฟฟ้าส่งออกมาภายนอก เมื่อมีการเสียดสีหรือแลกเปลี่ยนโมเลกุลต่างชนิดกัน จะทำให้อิเล็กตรอนจากวัตถุชนิดหนึ่งหลุดไปอยู่บนวัตถุอีกชนิดหนึ่ง ทำให้วัตถุที่รับอิเล็กตรอนมีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอน วัตถุชนิดนั้นจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ส่วนวัตถุที่เสียอิเล็กตรอนไป ย่อมมีจำนวนโปรตอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอน จึงแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกทางไฟฟ้า

2.3.2 ประจุไฟฟ้าของไอออนที่ถูกดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์

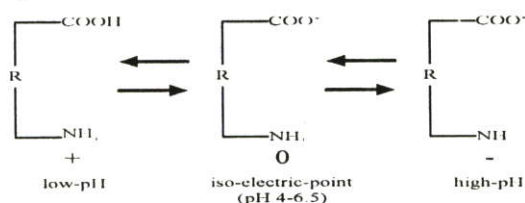
ฟองก๊าซละอองน้ำหรืออนุภาคคอลลอยด์อีกหลายชนิดได้ประจุไฟฟ้าบนผิว เนื่องจากมันสามารถเลือกดูดไอออน (ที่มีประจุไฟฟ้าลบหรือบวกก็ได้) บางชนิดมาติดผิวได้ ไอออนที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า Peptizing Ions อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำ มักชอบดูดไอออนลบมากกว่าไอออนบวก เพราะไอออนบวกจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ ทำให้ไอออนบวกไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้แบบชิดเท่ากับไอออนลบ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางการจับตัวระหว่างไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์ด้วยเหตุผลดังกล่าวอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำจึงมักมีประจุลบมากกว่าประจุบวกทางไฟฟ้าเสมอ

2.3.3 การละลายตัวของไอออน (Ion Dissolution)

อนุภาคคอลลอยด์บางชนิดจะมีประจุไฟฟ้าถ้าไอออนต่างชนิดที่ประกอบกันเป็นอนุภาคละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน

2.3.4 การแตกตัวเป็นไอออนของ (Functional Group)

อนุภาคคอลลอยด์จำนวนมากได้ประจุไฟฟ้าเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของ Functional Group บนผิวอนุภาค ยกตัวอย่างเช่น โปรตีน ได้ประจุไฟฟ้ามาจากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่อะมิโน (Amino Group) หรือ หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ซึ่งขึ้นอยู่กับพีเอช (pH) ของน้ำ เมื่อน้ำมีพีเอชต่ำ โปรตีนจะมีประจุบวกและจะมีประจุลบที่พีเอชสูง โปรตีนอาจไม่มีประจุไฟฟ้าเลยที่ระดับพีเอชระหว่างค่าสูงและต่ำ ระดับพีเอชนี้เรียกว่า Iso – electric – point ดังรูปที่ 2.4



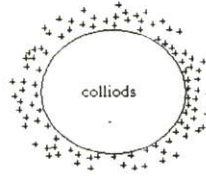
รูปที่ 2.4 การแตกตัวของ Functional Group[12]

2.4 Electric Double Layer

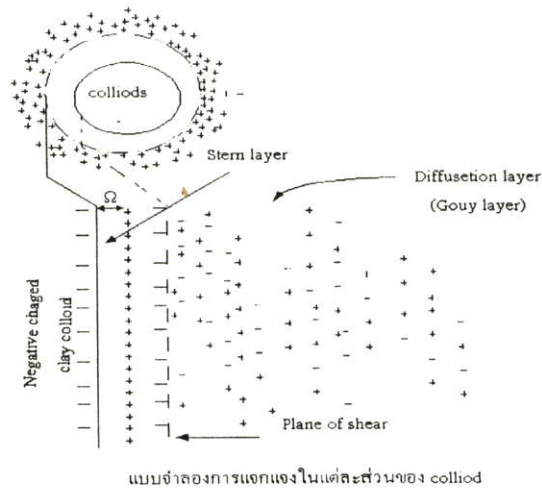
ความแตกต่างระหว่างคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิก และแบบไฮโดรฟิลิก คือ เสถียรภาพ (Stability) ของคอลลอยด์ แบบแรกเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างอออนชนิดเดียวกัน ส่วนเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบหลังเกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักและเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ห่อหุ้มอนุภาค (Particle Solvation) ความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญมากต่อกลไกในการทำลายเสถียรภาพ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์คือ Electric Double Layer Theory ซึ่งผู้คิดสร้างคือ Helmholtz และพัฒนาให้สมบูรณ์ขึ้นโดย Gouy – Chapman - Stern ขอให้พิจารณาอนุภาคดินเหนียว ซึ่งมีประจุลบเป็นตัวอย่างประกอบคำอธิบาย เนื่องจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์สามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้อออนประจุบวก (ประจุตรงกันข้าม) ที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาได้ จึงทำให้อออนประจุบวกมาแออัดกันอยู่ใกล้ผิวอนุภาคคอลลอยด์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก.) อออนบวกนี้เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของอออนบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์ และลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาค ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างไกลออกไป (ดูรูปที่ 2.5 ข.) ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้การกระจายตัวของอออนบวกและลบเป็นไปตามปกติตามทฤษฎี Double Layer เชื่อว่าอออนบวกชั้นในสุดที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เพราะอออนบวกมักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของอออนที่อยู่ใกล้ที่สุด (ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอออน) คล้ายมีเปลือกทรงกลมบางๆ ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ ∞ กั้นขวางอยู่ เปลือกหรือชั้นบางๆ นี้เรียกว่า Stern Layer และถือว่าเป็นชั้นในของทฤษฎีนี้ ศักย์ไฟฟ้าที่เปลือกนี้มีค่าเท่ากับ Stern Potential ส่วนเปลือกชั้นนอกมีชื่อเรียกว่า Diffuse Layer (ชั้นกระจาย) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์) ศักย์ไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ หรือ Nernst Potential ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่จุดอื่นซึ่งไม่ใช่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ทั้งนี้ โดยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้เรียกว่า Zeta Potential (Z_p) หมายถึงศักย์ไฟฟ้าที่ผิว(หรือเปลือก) นอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมอนุภาคคอลลอยด์ ผิววนอกสุดนี้เรียกว่า Plane of Shear (ดังรูปที่ 2.5 ค.) ตำแหน่งที่แน่นอนของ Plane of Shear ไม่เป็นที่ทราบแน่นอน เชื่อกันว่าอยู่นอกชั้น Stern Layer แต่ยังอยู่ใน Diffuse Layer อย่างแน่นอน บทบาทของ Zeta Potential (Z_p) จะมีมากกว่าศักย์ไฟฟ้าตัวอื่นๆ เนื่องจากซีตาโพเทนเชียล ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์ได้ ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง จะมีแรงผลักระหว่าง

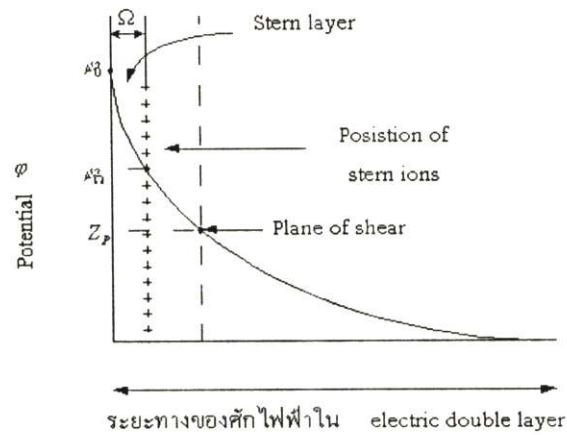
อนุภาคสูงมาก และจะมีค่าซีตาโพเทนเชียลสูงด้วย ซึ่งจะตรงกันข้ามกับระบบคอลลอยด์ที่มีค่าซีตาโพเทนเชียลต่ำจะทำให้สามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย



(ก)



(ข)

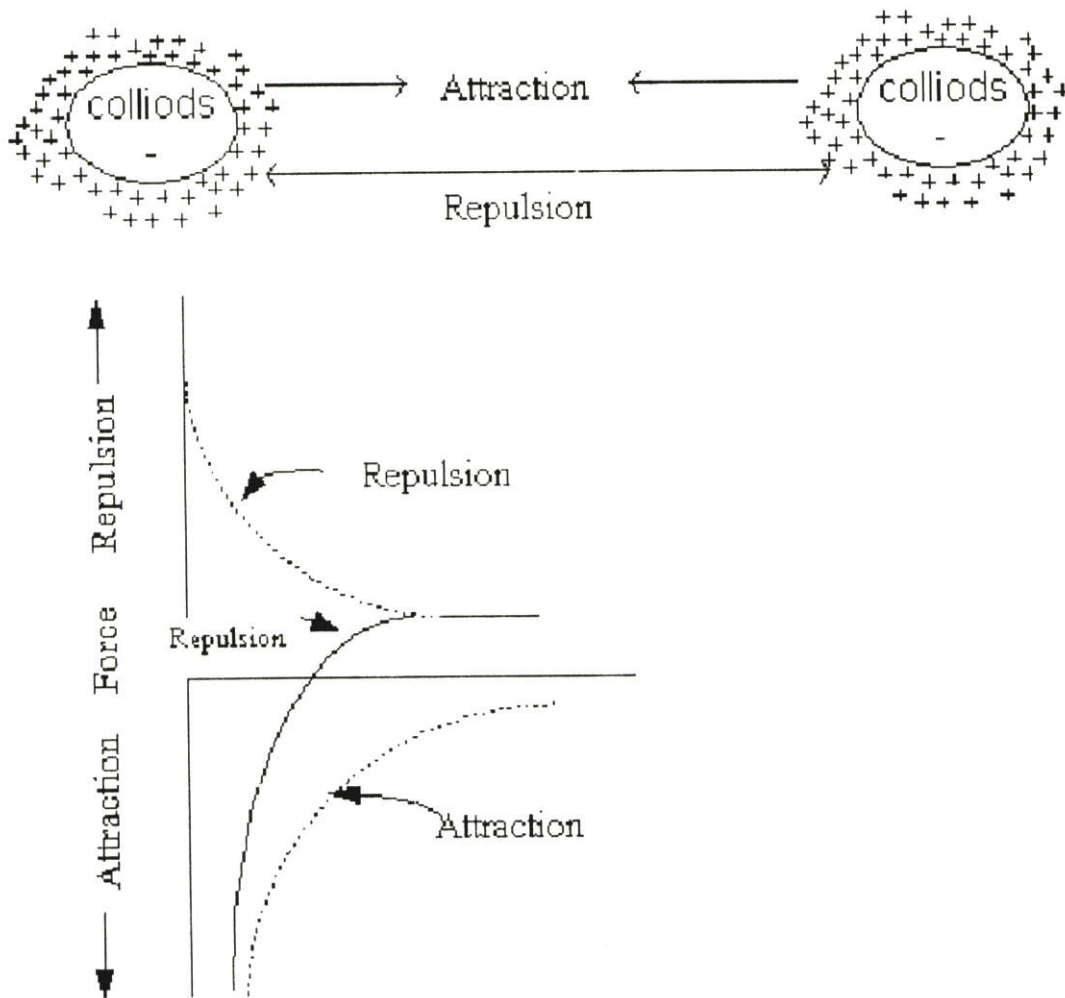


(ค)

รูปที่ 2.5 แบบจำลองของ Electrical Double Layer[2]

2.5 เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ ถ้าคอลลอยด์สามารถแขวนลอยคอลลอยด์ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนก่อนภายในเวลาระยะเวลาสั้นเรียกว่ามีเสถียรภาพ แต่ถ้าทำให้อนุภาค-คอลลอยด์ตกตะกอนหรือแยกออกจากน้ำได้ นั่นคือเสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายจะไม่สามารถดำรงคอลลอยด์ในน้ำได้ ด้วยเหตุนี้เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดูด(Attraction)และแรงผลัก(Repulsion) ระหว่างอนุภาค โดยธรรมชาติแรงผลักจะมากกว่าแรงดูดเสมอจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ สามารถแสดงได้โดยแบบจำลองของ Vander Waals Force ดังรูปที่2.6



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของอนุภาคคอลลอยด์เมื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำ[1]

2.6 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักและแรงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลักเกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนแรงดูด Vander Waals Force ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและโมเลกุลแรงผลักซึ่งมากกว่าแรงดูดทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ถ้าแรงดูดสูงกว่าแรงผลักของอนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบเดิม สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

2.6.1 โดยการลดความหนาแน่นชั้นกระจาย(Diffuse Layer)

2.6.2 โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์(Adsorption Charge Neutralization)

2.6.3 โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์

2.6.4 โดยการใช้สารโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม(Polymer Bridging)

แต่ทั้ง 4 วิธีนี้มีข้อจำกัดในเวลาและค่าใช้จ่ายอีกทั้งต้องอาศัยความชำนาญโดยเฉพาะจึงทำให้ระบบการแยกค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนดังจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้และสิ่งที่เห็นความแตกต่างระหว่างงานปัจจุบันและงานวิจัยนี้คือข้าพเจ้าใช้หลักของอิเล็กทรอนิกส์จะควบคุมดูแลง่ายและมีขนาดเล็กกว่าหลายเท่า

บทที่ 3

คุณสมบัติและโครงสร้างของโปรตีนที่ทำให้เกิดคอลลอยด์

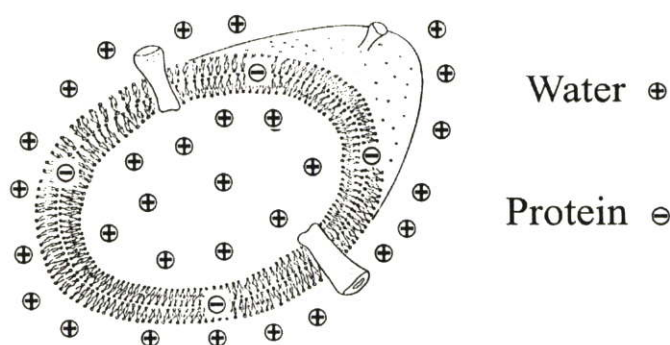
3.1 โปรตีน

โปรตีนเป็นชีวโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มาก มักมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 10,000 หน่วยภายในโมเลกุลประกอบไปด้วยเปปไทด์และจะจับด้วยพันธะเปปไทด์ หรือพันธะเอไมด์ในเรื่องของโปรตีนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะ ส่วนประกอบที่แสดงตัวเป็นกลางและแสดงตัวเป็นสนามไฟฟ้าขนาดเล็กๆคุณสมบัติการนำ, การพาเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระตุ้นจากตัวมันเองและจากภายนอก

3.2 คุณสมบัติของโปรตีนและกลุ่มโปรตีนเมื่ออยู่ในน้ำ

องค์ประกอบของโปรตีนและน้ำเลือดที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะมีองค์ประกอบของโครงสร้างที่เกิดจากพลาสมาหรือซีรัม ซึ่งมีสารชีวโมเลกุลทุกชนิดที่แสดงอำนาจเป็นประจุบวกลบ เช่น โปรตีน, ลิพิด, เกลือแร่ และฮอโรโมน อย่างเช่น โปรตีนจะได้ประจุบวกลบจากกรดอะมิโนและคาร์บอกซิล ส่วนเกลือแร่จะได้ประจุบวกลบจากแคลเซียม, โซเดียม, โพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งคอลลอยด์โปรตีนเหล่านี้จะมีการแตกตัวเป็นปรากฏการณ์คอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ดังรูปที่ 2.4

เมื่อคอลลอยด์โปรตีนแขวนลอยในน้ำอนุภาคของเลือดและโปรตีนนี้จึงถูกเรียกว่า โกลบูลาร์โปรตีน (Globular protein) จะม้วนตัวเป็นก้อนกลมเมื่อแขวนลอยในน้ำเอาส่วนที่มีประจุจับโมเลกุลของน้ำ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โปรตีนชนิดโกลบูลาร์ที่แสดงอำนาจการมีประจุบวกลบ ซึ่งประจุบวกจะถูกโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ [16]

จากรูปที่ 3.1 โมเลกุลระหว่างน้ำกับโปรตีนจะ จับคู่ห่อหุ้มอยู่เสมือนฟิล์มบางๆป้องกันการรวมตัวตกตะกอน ดังนั้นถ้าระดับโมเลกุลเล็กๆ ที่มีขนาด 10^{-6} ถึง 10^{-9} มิลลิเมตร คอลลอยด์โปรตีนจะสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นานหลายปี

3.3 ความแตกต่างทางเคมีและการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำลายอนุภาคคอลลอยด์

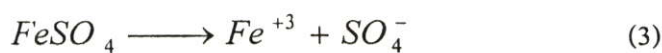
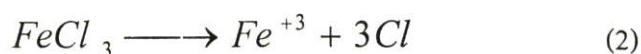
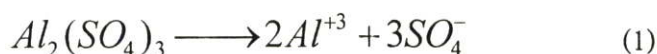
ความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาเคมีกับการใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่งานวิจัยนี้ ในการทำให้เกิดขบวนการโคแอกกูเลชันของอนุภาคคอลลอยด์ (หรือการทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันได้นั้นสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้

3.3.1 การใช้สารเคมีทำโคแอกกูเลชัน

โคแอกกูเลชันหรือนิยมเรียกอีกอย่างว่า “โคแอกกูแลนท์” ที่นิยมมากในปัจจุบันได้แก่สารส้ม (Alum) และสารประกอบเหล็กมีสูตรโมเลกุลเป็น $Al_2(SO_4)_3 \cdot X \cdot H_2O$ ส่วนสารประกอบเหล็กที่นิยมใช้กันได้แก่ $FeCl_3$ และ $FeSO$ ในประเทศไทยสารส้มเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆได้ง่ายในราคาพอสมควร

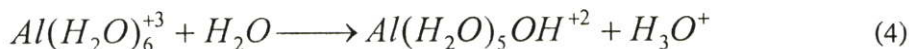
3.3.2 ปฏิกิริยาของสารส้มและสารประกอบเหล็กในน้ำ

เมื่อสารส้ม,เฟออลิคลอไรด์และเฟอร์สซันเฟต ละลายน้ำจะมีการแตกตัวของอิออนบวกและลบดังนี้

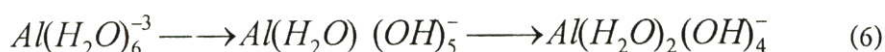
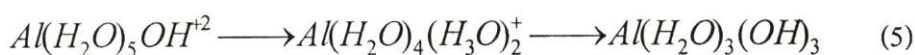


จากสมการทั้งสามสมการ อาจทำให้เข้าใจผิดถึงสถานะของอิออนบวกซึ่งเป็นของโลหะอะลูมิเนียมเหล็ก ทั้งนี้เพราะอิออนของโลหะทุกชนิดจะอยู่ร่วมกับน้ำและไม่สามารถดำรงอยู่ในรูปอิสระได้ ยกตัวอย่าง อิออน ของอะลูมิเนียม และเหล็กจะอยู่ร่วมกับน้ำ 6 โมเลกุลดังนั้นการเขียนที่ถูกต้องจึงควรจะเป็น $Al(H_2O)_6^{+3}$ และ $Fe(H_2O)_6^{+3}$ ตามลำดับ อิออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำ เรียกว่า Aqua metal Ion โมเลกุลเรียกว่า Ligand อนึ่งเพื่อความสะดวกในการเขียนบางครั้งมักตัดโมเลกุลของน้ำออกโดยถือว่าเป็นที่รู้โดยทั่วไปอยู่แล้ว ดังนั้น $Al(H_2O)_6^{+3}$ และ $Fe(H_2O)_6^{+3}$ จึงเหลือเพียง Al^{+3} และ Fe^{+3}

เนื่องจาก Al^{+3} และ Fe^{+3} มีอำนาจเป็นกรดซึ่งสามารถให้ H^+ จึงพร้อมจะไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) ให้เป็นไอออนต่างๆของอะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งมี O^- เป็น Ligand ขอให้ดูการแตกตัวของสารส้ม(เป็นสารประกอบเหล็กแตกตัวในลักษณะคล้ายคลึงกันจึงไม่จำเป็นต้องกล่าวซ้ำ



สมการข้างบนนี้ เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งนำหนึ่งโมเลกุลของ $Al(H_2O)_6^{+3}$ แทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) หนึ่งหมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ต่อไปอีก ทำให้โมเลกุลน้ำถูกแทนที่เพิ่มขึ้น “ประจุบวกจะลดลงเรื่อยๆ” จนหมดและกลายเป็นประจุลบ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีลำดับดังนี้

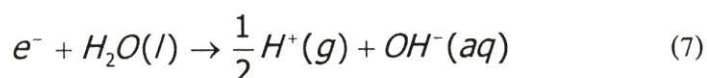


ไอออนคอมเพล็กซ์ที่ฟังกกล่าวไปทั้งหมดนี้ เป็นไอออนที่มีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียวและเรียกว่า Monomeric Hydroxo Complex สารดังกล่าว สามารถทำปฏิกิริยา และรวมกันจนกลายเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่มีอะลูมิเนียมมากกว่า หนึ่งอะตอมซึ่งเรียกว่า Polymeric Hydroxo เช่น



3.3.3 การใช้หลักการทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำโคแอกกูเลชัน

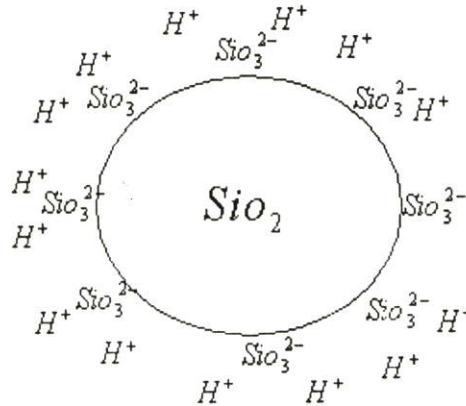
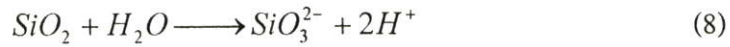
จะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่ออกแบบมาจากระบบสวิทซ์แรงเคลื่อนสูงผ่านลงไปไนอิเล็กโทรดทำจากทองแดงในน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อเนื่องและแตกตัวได้รวดเร็วในสารตัวกลางคือน้ำซึ่งจะส่งผลให้ไปทำลายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบผิวคอลลอยด์ซึ่งเท่ากับว่ากลุ่มอนุภาคคอลลอยด์จะสามารถรวมตัวกันภายใต้สนามไฟฟ้าและรวมตัวกันตกตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับทางเคมีหรือชีวภาพดังจะอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



สมการที่(7) เมื่อมีอิเล็กตรอน(e^-)หนึ่งโมเลกุลทำปฏิกิริยากับน้ำทางด้านซ้ายมือจะเกิดปฏิกิริยาทางซ้ายขวามือคือเกิดไฮโดรเจนอยู่ในสถานะก๊าซ $1/2H^+(g)$ และจะทำให้เกิดปรากฏการณ์

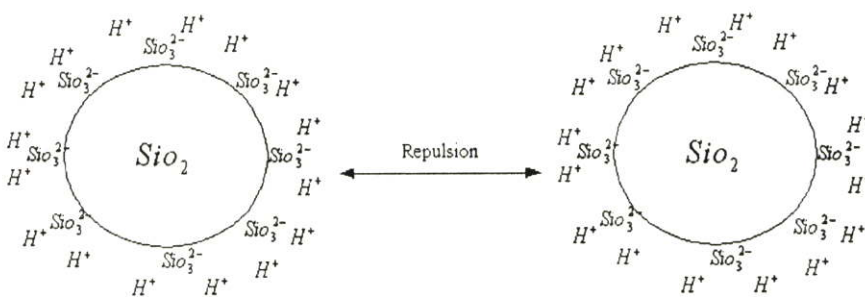
ไฮโดรไลซิส $\text{OH}^-(\text{aq})$ ที่อยู่ในสถานะสารละลายที่แสดงอำนาจเป็นประจุลบเปรียบเสมือนมีอิเล็คตรอนอีกตัวและสามารถแตกตัวขึ้นในน้ำได้อีกหนึ่งครั้ง

ดังจะยกตัวอย่างการแตกตัวของอิเล็คตรอนที่ทำให้โมเลกุลของโลหะหนักที่เป็นคอลลอยด์ชนิดลบคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ สูตรทางเคมีคือ SiO_2 เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ H_2O จะได้เป็นสมการที่ (8) และรูปที่ 3.2



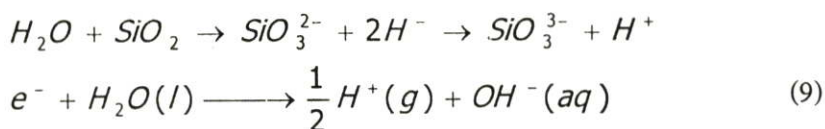
รูปที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลคอลลอยด์ที่เกิดจากน้ำกับซิลิกอนไดออกไซด์

และสมมุติให้มีโมเลกุลชนิดเดียวกันเกิดเพิ่มขึ้น อีกหนึ่งโมเลกุลเราจะพบว่า ระหว่างโมเลกุลจะมีการผลักกันและทำให้สามารถที่แขวนลอยในน้ำได้จะอธิบายได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ปรากฏการณ์ที่อนุภาคคอลลอยด์มากกว่าหนึ่งโมเลกุลแขวนลอยได้ในน้ำ

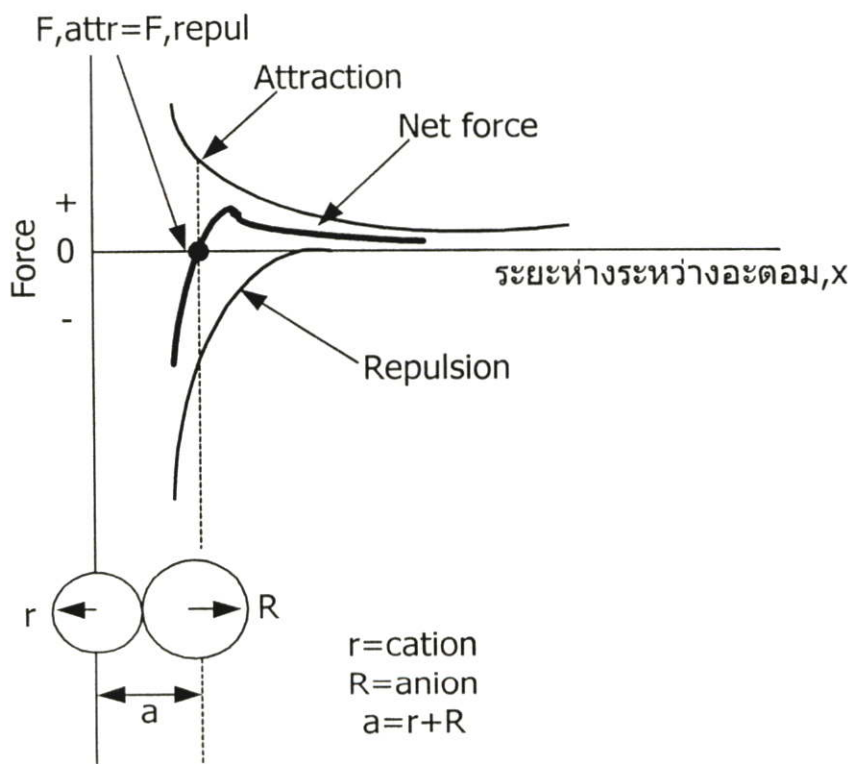
เพราะว่าเกิดฟิล์มบางๆของน้ำล้อมรอบอยู่และจะทำให้เกิดแรงผลักกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้หลักการของสนามไฟฟ้าแบบสถิตย์เข้าไปลดความหนาของชั้น กระจายโดยอาศัยปฏิกิริยาของอิเล็คตรอนดังสมการ(9)



จากสมการที่(9) สมการส่วนบนเกิดจากโมเลกุลน้ำและซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วส่วนปฏิกิริยาที่จากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนจำนวน 1 โมเลกุลเข้าไปสลายไฮโดรเจนที่มีจำนวน 1/2 ไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่มีลักษณะเป็นแก๊สและแตกตัวเป็น ไฮโดรไลซิสอีกจำนวน 1 โมเลกุลเป็นของเหลวที่แสดงพาหะเป็นประจุลบซึ่งโมเลกุลดังกล่าวจะทำให้คุณสมบัติของน้ำและตัวกลาง หรือซิลิกอนไดออกไซด์เข้าไปทำลายฟิล์มบางของคอลลอยด์ชนิดนี้ได้

3.4 การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดเสถียรภาพของคอลลอยด์โปรตีน

เนื่องจากคุณสมบัติของโมเลกุลโปรตีนเมื่อแขวนลอยได้ในน้ำจะแสดงพฤติกรรมเป็นปรากฏการณ์คอลลอยด์จะมีคุณสมบัติเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดเล็กๆดังที่กล่าวมาและอุปสรรคดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เป็นพฤติกรรมของแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผล Ionic Bonding[2]

แรงไฟฟ้าสถิตหรือแรง Culomb เกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่มีประจุไฟฟ้าบวก(Cation) กับอะตอมที่มีประจุไฟฟ้าลบ(Anion) จากรูปที่ 3.4 เมื่อ ประจุบวกกับประจุลบเข้าใกล้กันเป็นระยะ X จะเกิดแรงสองชนิดคือ

3.4.1 แรงดูด (F, attractive) ระหว่างนิวเคลียสของอะตอมกับอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนเป็นบวกของอีกอะตอมหนึ่ง

3.4.2 แรงผลัก(F,repulsive) ระหว่างกลุ่มอิเล็กตรอนของทั้งสองอะตอมเป็นลบดังนั้นที่ระยะ X ต่างๆจะเกิดแรงลัพธ์(F,net)เท่ากับผลบวกของแรงดึงดูดและแรงผลักซึ่งมีทิศตรงกันข้ามดังสมการที่ (10)

$$F_{net} = F_{attractive} + F_{repulsive} \quad (10)$$

เมื่อระยะ a แรง

$$F_{attr} = -F_{repul} \quad (11)$$

เพราะฉะนั้น a = ระยะห่างระหว่างอะตอมขณะสมดุล

$$F_{attr} = \frac{-(z_1 e)(z_2 e)}{4\pi\epsilon_0 X^2} = \frac{-z_1 z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 X^2} \quad (12)$$

เมื่อ $Z_1, Z_2 =$ จำนวนอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิด ionic
ดังนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นรอบผิวจะเท่ากับ

$$F_{repul} = \frac{-n_b}{a^{n+1}} = \gamma \quad (13)$$

เมื่อ b,n เป็นค่าคงที่; n=7

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการออกแบบเครื่องนำกลับโมเลกุลโปรตีน

4.1 ไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร

ในการที่จะแก้ปัญหาใดแก้ปัญหาหนึ่ง และปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง(exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆกันตามตำแหน่งต่างๆบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่จะประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่า โดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้(finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (element) ซึ่งมีขนาดต่างๆกันดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.1

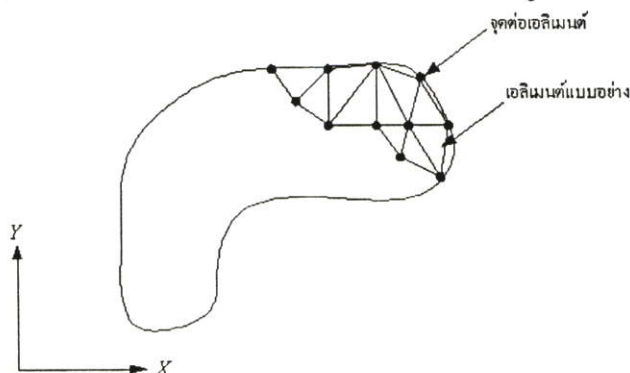
วิธีดังกล่าวซึ่งบ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับของแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐาน ที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมาจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้นจากนั้นจึงนำสมการที่สร้างขึ้นมานั้นมาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางด้านกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบกันรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าวซึ่งจะทำให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นนอกจากนั้นความแม่นยำของผลเฉลยจะต้องขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเอลิเมนต์รวมถึงการสมมุติฐานของฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation function) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์ นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมุติให้อยู่ในหลายรูปแบบ

อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง (linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (nodes) ของเอลิเมนต์

4.2 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟในเอลิเมนต์

วิธีการไฟในเอลิเมนต์ประกอบไปด้วยขั้นตอนใหญ่ๆทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้
ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆดังแสดงในรูปที่ 4.1 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกัน



รูปที่ 4.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation function) เช่นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.2 เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 โดยจุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของจุดต่อของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่ติดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าตัวแปรอะไรก็ได้ที่เราต้องการหา เช่น ต้องการหาค่าที่เกิดขึ้น ณ จุดต่อนั้นๆ



รูปที่ 4.2 เอลิเมนต์แบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งจุดต่อ

หาความหนาแน่นของกระแส ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายใน และตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (14)$$

โดยที่ $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

สมการ (14) สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)} \end{aligned} \quad (15)$$

โดยที่ $[N]$ คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ สัญลักษณ์ $[]$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวอน $\{ \}$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการเอลิเมนต์ (element equation) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังรูปที่ 4.2 อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (16)$$

จากสมการ (16) เขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (17)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่า เป็นหัวใจสำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ (17) ปัจจุบันที่นิยมสามารถประมาณได้ 3 วิธีจาก[17]

- ก. วิธีการโดยตรง (direct approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (variational approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations)

$$\sum(\text{elementequations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (18)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในสมการที่ (18) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่ติดต่อกัน (nodal unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของศักดา ณ ตำแหน่งโครงสร้างนั้นๆ หรือค่าของสนามแม่เหล็ก ณ จุดต่อต่างๆ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่นเมื่อรู้ค่าของศักดาไฟฟ้า เราก็หาค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความเข้มได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้งหมด นี้ จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นตอน โดยมีหัวใจสำคัญคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 เท่านั้นเอง

เหตุผลของงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การประมาณที่เรียกว่าไฟไนต์ในเอลิเมนต์ (finite element method) หรือที่นิยมเรียกกันว่า FEM ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนเช่นใดก็ได้โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่าและหลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีผลต่างสืบเนื่อง กล่าวคือเริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ขนาดต่างกัน โดยเอลิเมนต์ต่างๆนี้โดยเอลิเมนต์ต่างๆนี้อาจอยู่ในรูปสามเหลี่ยมและปัจจุบันการประมาณค่าภายในจะนิยมแบบสามเหลี่ยมเป็นเพราะว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจำนวนมากๆสามารถสร้างขึ้นโดยง่ายและมีข้อดีหลายอย่างเวลารูปร่างวัตถุที่ซับซ้อนการเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมจะกระทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่าดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้การประมาณค่าแบบสามเหลี่ยม 2-ทิศทาง

4.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)ช่วยในการออกวิเคราะห์ข้อมูล

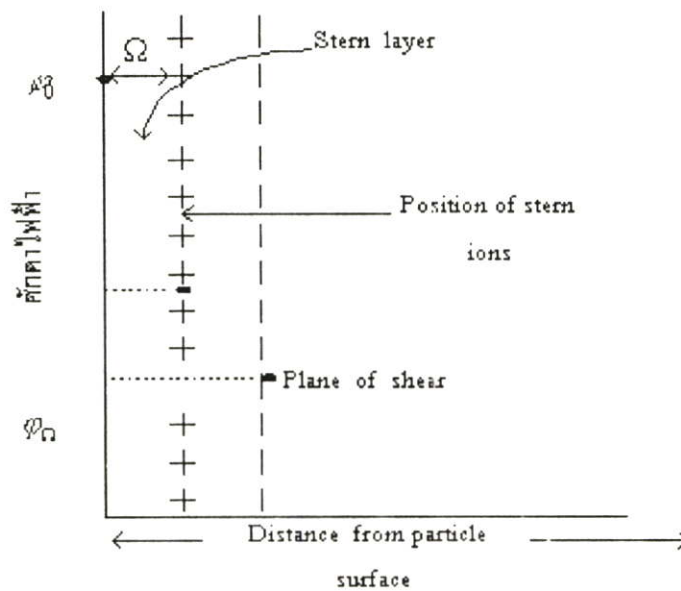
จากการศึกษาพบว่าถ้าจะต้องการที่จะทำให้โมเลกุลของอนุภาคคอลลอยด์ เกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางคุณสมบัติ ของสนามไฟฟ้าแบบอ่อนๆที่เกิดจากกลุ่มสารที่สามารถแรกเปลี่ยนโมเลกุลกับน้ำที่เป็นสาร ไดอิเล็กทริกตัวกลางขัดขวางการรวมตัวดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จะอาศัยแบบจำลอง Double layer เป็นตัวอธิบายได้

4.4 แบบจำลองและอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมาณค่าเริ่มต้นในการออกแบบ

การอธิบายถึงพฤติกรรมของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงผลักรวมและแรงดูดระหว่างอนุภาค ถ้าแรงดูด (Attraction) มากกว่าแรงผลักรวมหมายถึง คอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพแต่ถ้าแรงผลักรวม (Repulsion) มากกว่าแรงดูดแสดงว่าอนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ แต่โดยธรรมชาติแล้ว อนุภาคคอลลอยด์ จะมีแรงผลักรวมระหว่างอนุภาคมากกว่าแรงดูดเสมอ ดังรูปที่ 2.6

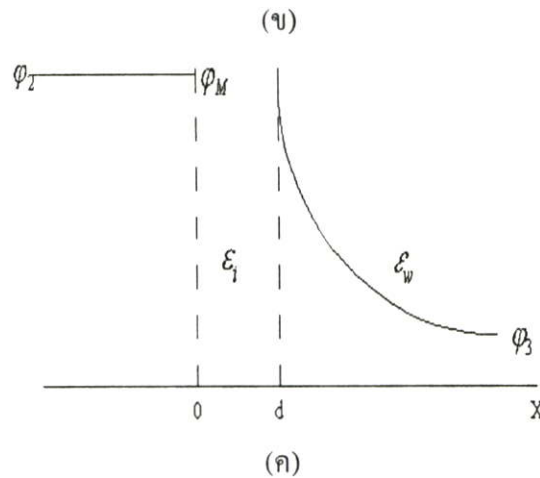
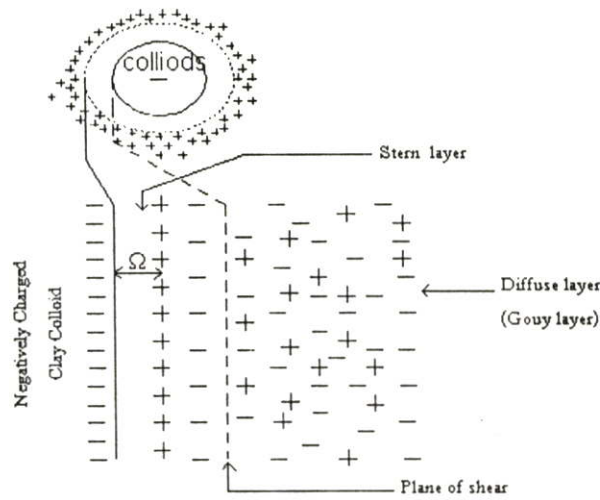
คั้งนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเพื่อจะนำหลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้และใช้ไฟไนต์พยากรณ์หลักทางกายภาพของการทำลายสนามไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้นเพื่อเก็บข้อมูลศึกษาเพื่อหาจุดที่ดีและประหยัดเวลามากที่สุดโดยเริ่มจาก ทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางสนามไฟฟ้า คือ Electric Double layer Theory ซึ่งผู้คิดคือ Helmboltz โดยพัฒนาให้สมบูรณ์ คือ Gouy และ Chapman ในปี ค.ศ. 1910-1913 โดยได้จำกัดขอบเขต ประจุไฟฟ้า และศักดาไฟฟ้าที่มีการกระจายตัวใน

แถบของชั้นกระจาย (Distribution Electric double layer) ด้วยการแก้ปัญหาสมการทางไฟฟ้าและทางสถิติ ของเทอโมไดนามิกส์ และผลที่ได้จะอ้างอิง แบบจำลองของ Gouy -Chapman



(ก)

รูปที่ 4.3 แบบจำลองการกระจายของประจุที่มาปิดล้อมอนุภาคคอลลอยด์ของ Stern-Gouy-Chapman



รูปที่ 4.3 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.3 เป็นโครงสร้างที่อธิบายส่วนต่างๆของอนุภาคคอลลอยด์ 1 อนุภาค โดยใช้สารละลายดินเหนียวของ Stern และจากรูปที่ 4.3 (ค) ก็สามารถจำลอง model อธิบายได้โดย Gouy – Chapman เขาได้กล่าวไว้ว่า “การเปลี่ยนแปลงจาก ϕ_2 และ ϕ_3 ของรูปที่ ผ่านพื้นผิวซึ่งเกิดขึ้นในระยะที่จำกัด และสมมติว่า ϕ_2 ยังคงที่อยู่จนเกือบเป็นเส้นตรงที่ระหว่างพื้นผิว ในรูปที่ 4.4 ซึ่งการสมมตินี้มีความน่าเชื่อถือได้ที่สามารถใช้กับโลหะได้ และศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบ $x = 0$ คือ $\phi^M = \phi_2$ ส่วน $x > 0$ อาจกำหนดด้วยสมการปัวร์ซอง

ในการแก้ปัญหาที่มี อยู่ เช่น (Alamson 1967; Overbeek 1952)และได้แก้ไข(Grahame 1947) ซึ่งเรียกว่าสมการ Poisson – Boltzmann ซึ่งเป็นสมการหนึ่งในหลายสมการที่สำคัญของ Statistical Physics

$$\text{div}D = \text{div}\epsilon E = \rho \quad (19)$$

เมื่อ D เป็นเวกเตอร์ของ Dielectric displacement และ ρ เป็นความหนาแน่นของประจุบริเวณนั้น (คือจำนวนของประจุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) จะได้

$$E = -grad\phi \quad (20)$$

รูปที่ 4.3 (ค) การกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่ระหว่างพื้นผิวของ metal – electrolyte ซึ่งช่วงระหว่าง $x = 0$ และ $x = d$ จะสมมติว่าไม่มีประจุใดๆ และมีค่า Permittivity เป็น ϵ_r ซึ่งแตกต่างจาก ϵ_w และอาจจะเป็นฟังก์ชันของทิศทาง การกำหนดตำแหน่งของชั้น ϵ นั้นจะใส่ค่าของแต่ละเฟสในแถบด้านใน $0 \leq x \leq d$ และจะพิจารณาภายหลัง

เมื่อเราเริ่มต้นพิจารณา ช่วง $x > d$ จะได้จากสมการที่ (17) และ (16)

$$div(\epsilon grad\phi) = -\rho \quad (21)$$

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

$$divgrad\phi = \nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\epsilon_o\epsilon_r} \quad (22)$$

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 $\epsilon_r = \epsilon_w/\epsilon_o$

ในช่วงที่ $x > d$ นั้น อีออนจะได้รับอิทธิพลจากศักย์ไฟฟ้าของสนามไฟฟ้าสถิตย์ในบริเวณนั้น ซึ่งถ้าพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ มีการสะสมของกลุ่มประจุบวกและลบจะสามารถกำหนดด้วยสมการ Boltzman จะได้ว่า

$$n_i = n_i^0 = \exp(-\omega_i / kT) \quad (23)$$

เมื่อ ω_i คืองานที่ทำการนำไอออนชนิด i ขึ้นจากสารละลายที่ $\phi = \phi_3$ ไปยังตำแหน่ง ใน double layer ที่ศักย์ไฟฟ้าเป็น ϕ และ n_i^0 เป็นกลุ่มสารประกอบชนิด i ซึ่งการประมาณเริ่มแรกจะสมมุติว่า

$$\omega_i = z_i e(\phi - \phi_3) = z_i e\varphi \quad (24)$$

เมื่อ

$$\varphi = \phi - \phi_3 \quad (25)$$

ความหมายก็คือว่า เฉพาะงานที่ใช้ในการนำไอออนเข้าใกล้พื้นผิวเป็นงานทางไฟฟ้าหรือไอออนเคลื่อนที่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า ซึ่งจะไม่สนใจพลังงานหรือผลกระทบใดๆรอบๆไอออนหรือการสร้าง hole ในตัวทำละลาย หรือชั้นกระจายของไอออนอื่น ซึ่งการกำหนดที่ทำได้ง่ายที่สุดคือการกำหนด เป็น ประจุนิจุดและปริมาตรความหนาแน่นของประจุ ρ กำหนดด้วย

$$\rho = \sum_i n_i z_i e \quad (26)$$

เมื่อผลรวมแสดงชนิดของไอออนทั้งหมดของไอออนทั้งหมด และวาเลนซ์ z_i อาจเป็นค่าบวกหรือลบก็ได้ จากสมการ (4) ถึง (8) สมมติให้ ϕ_3 มีค่าคงที่จะได้ว่า

$$\nabla^2 \phi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \sum_i n_i^0 z_i e \cdot \exp(-z_i e \phi / kT) \quad (27)$$

สมการที่ (23) นี้ เป็นสมการ Poisson-Boltzman ที่อ้างอิงมาตั้งแต่แรกซึ่งเป็นสมการหนึ่งจากสมการที่สำคัญทั้งหมดซึ่งเราพบว่ามันเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ electrode process , ปฏิกริยาออสลอยด์, การส่งถ่ายโมเลกุลผ่านเมมเบรนเป็นต้นและจากสมการ(27) นี้จะถูกประมาณค่าจาก Debye-Huckel ถ้าพลังงานไฟฟ้าเทียบกับพลังงานความร้อนแล้วน้อยกว่าก็คือ $|z_i e \phi| \leq kT$ ก็จะมีความเป็นไปได้ที่จะขยาย exponential ในสมการที่ (27) โดยไม่ต้องสนใจทั้งหมดแต่เฉพาะสองเทอมแรกจะได้ว่า

$$\nabla^2 \phi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \left(\sum_i z_i e n_i^0 - \sum_i z_i^2 e^2 n_i^0 \phi / kT \right) \quad (28)$$

ผลรวมเทอมแรกจะต้องเป็น ศูนย์ เพื่อรักษาสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าในกลุ่มของสารละลาย ดังนั้น

$$\nabla^2 \phi = \left(\frac{\sum_i z_i^2 e^2 n_i^0}{\epsilon_0 \epsilon_r kT} \right) \phi \quad (29)$$

$$\nabla^2 \phi = K^2 \phi$$

เมื่อ

$$K = \left(\frac{e^2 \sum_i n_i^0 z_i^2}{\epsilon kT} \right)^{1/2} \quad (30)$$

การสมมติ ϕ ให้มีค่าน้อยมากๆซึ่งจะทำให้สมการง่ายลง เรียกว่า " การประมาณค่าของ Debye- Huckel " ซึ่งทั้งสองคนนี้ใช้กับสมการ (25) อยู่ในรูป $\phi = \text{const.} (\exp(-KX))$ เมื่อ $\phi = \phi_{x=d} \exp(K(X-d))$ ค่า K [ซึ่งมีระยะทางเป็น(length⁻¹)] ซึ่งเรียกว่า " Debye-Huckel Parameter " ซึ่งจะแสดงส่วนเด่นในทฤษฎีของ Double layer ออกมาและขอบเขต Double layer

สมการที่ (33) เป็นสมการของปัวร์ซอง (Poisson's equation) ที่พุดถึงน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ โดยถือว่าเป็นเอกพันธ์ (Non-homogeneous) และ ขอบเขตที่ต้องการรู้ค่ามีหน่วยเป็น V/m^2 ดังนั้นจาก (1) จะใช้การประมาณค่าแบบผันตรง

$$F(V_{ap}) = \int \left[\frac{1}{2} \left\{ \left(\epsilon \frac{\partial V_{ap}}{\partial x} \right)^2 + \left(\epsilon \frac{\partial V_{ap}}{\partial y} \right)^2 \right\} - \rho V_{ap} \right] dx dy = 0 \quad (34)$$

และสามารถเขียน ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[S]_{3 \times 3}^{(e)} \{V_{ap}\}_{3 \times 1}^{(e)} = \{q\}_{3 \times 1}^{(e)} \quad (35)$$

$[S]$ = เมตริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์
 $\{V_{ap}\}$ = เมตริกซ์ศักดาไฟฟ้าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้นๆ
 $\{q\}$ = เมตริกซ์ภาระของตัวกลางในแต่ละเอลิเมนต์นั้นๆ

$$S_{ij} = \int_{vi} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \epsilon \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \epsilon \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy, \dots, i, j = 1, 2, \dots, M \quad (36)$$

$$q_i = - \int_{vi} \rho N_i dx dy, \dots, i, j = 1, 2, \dots, M \quad (37)$$

เราใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 2 ทิศทาง เพื่อทำการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ ซึ่งฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมสามารถกำหนดได้เป็น

$$N_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (38)$$

$$N_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (39)$$

$$N_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (40)$$

และอนุพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างจะเป็น :

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} = \frac{y_2 - y_3}{2\Delta} \quad \frac{\partial N_1}{\partial y} = \frac{x_3 - x_2}{2\Delta} \quad (41)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial x} = \frac{y_3 - y_1}{2\Delta} \quad \frac{\partial N_2}{\partial y} = \frac{x_1 - x_3}{2\Delta} \quad (42)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial x} = \frac{y_1 - y_2}{2\Delta} \quad \frac{\partial N_3}{\partial y} = \frac{x_2 - x_1}{2\Delta} \quad (43)$$

เมื่อ Δ คือ พื้นที่ของเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม ทำการแทนค่า partial derivatives ในรูปเมตริกซ์ทั่วไป จะได้

$$[s] = \int \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} dv \quad (44)$$

$$q_i = \int_{v_i} \begin{bmatrix} \rho N_1 \\ \rho N_2 \\ \rho N_3 \end{bmatrix} dv \quad (45)$$

ทำการคูณทั้งสองด้านด้วย 2Δ และ เมื่อ ε มีค่าคงที่ตลอดทั้งโดเมน จึงหารด้วย ε ทั้งสองด้าน จะได้ว่า

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

$$\left[\begin{array}{l} (y_3 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1) \\ (y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1) \\ (y_1 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_2 - x_1) \end{array} \right] dv \quad (46)$$

ผลการอินทิเกรตที่ได้จะตรงกัน

$$[S] = \frac{1}{4\Delta} \left[\begin{array}{l} (y_3 - y_2)(y_3 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_3 - x_2)(y_3 - y_2)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \\ (y_3 - y_1)(y_3 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_3 - x_2)(y_3 - y_1)(y_3 - y_1) + (x_1 - x_3)(x_1 - x_3) \\ (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_3 - x_2)(y_1 - y_2)(y_3 - y_1) + (x_2 - x_1)(x_1 - x_3) \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} (y_3 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1) \\ (y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1) \\ (y_1 - y_2)(y_1 - y_2) + (x_2 - x_1)(x_2 - x_1) \end{array} \right] dv \quad (47)$$

$$q_i = \frac{\rho\Delta}{3\epsilon} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial N_i V_i}{\partial x} = -\frac{y_2 - y_3}{2\Delta} V_1 - \frac{y_3 - y_1}{2\Delta} V_2 - \frac{y_1 - y_2}{2\Delta} V_3 \quad (49)$$

และ

$$E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial N_i V_i}{\partial y} = \frac{x_3 - x_2}{2\Delta} V_1 - \frac{x_1 - x_3}{2\Delta} V_2 - \frac{x_2 - x_1}{2\Delta} V_3 \quad (50)$$

การนำสมการแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบกัน เพื่อหาผลลัพธ์ของศักดาไฟฟ้า จะใช้การประมาณแบบ Iteration method (วิธีทวนซ้ำ) [4] ดังนั้นจึงได้

$$\phi_K = -\frac{1}{C_{KK}} \sum_{i=1, i \neq K} \Phi_i C_{Ki} + \frac{1}{\epsilon C_{KK}} \sum T_{Ki} \quad (51)$$

4.5 อัลกอริทึมของ Auto Mesh Generation

การที่ไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถทำการคำนวณได้เร็วและแม่นยำได้นั้นจะต้องอาศัยการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขได้ตรงและใกล้เคียงกับแบบจำลองนั้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็วงานวิจัยนี้จึงได้ใช้หลักการของการกำหนดขอบเขตโดยใช้วิธีของ Auto Mesh Generation โดยสามารถแบ่งขั้นตอนเบื้องต้นเกี่ยวกับ mesh generation ได้ดังนี้

- แบ่งบริเวณที่จะแก้ปัญหาออกเป็นบล็อกสี่เหลี่ยม 2-3 บล็อก
- แล้วแบ่งแต่ละบล็อกออกเป็นเอลิเมนต์
- เชื่อมต่อแต่ละบล็อกเข้าด้วยกัน

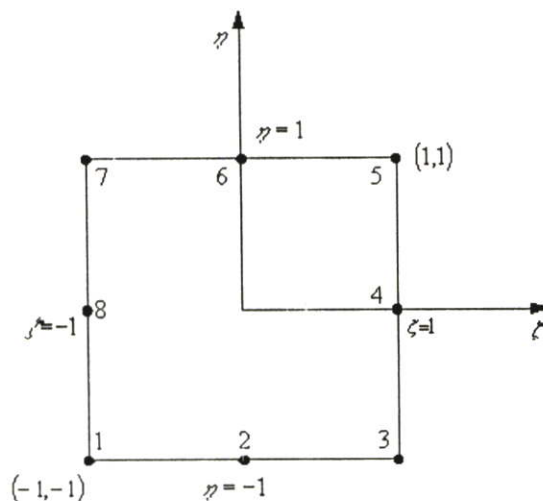
แต่ละขั้นตอนได้อธิบายดังนี้

4.5.1 ความหมายของบล็อก

บริเวณที่ต้องการแก้ปัญหาถูกแบ่งเป็นบล็อกสี่เหลี่ยม ซึ่งโดเมนย่อยที่มีพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น (σ, μ, ϵ) ต้องแทนด้วยบล็อกที่แยกไว้ ซึ่งข้อมูลเริ่มต้น (input data) จะถูกเป็นบล็อกแบบเรขาคณิตที่คงที่และจุดต่อที่จุดทั้งแปดจะบอกถึงความหมายแต่ละบล็อกดังรูปที่ 4.5 ในแต่ละบล็อกจะถูกแทนด้วยเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 8-node ที่มีพารามิเตอร์เหมือนกันด้วยระบบจุดต่อแบบธรรมชาติ (natural coordinate system) (ζ, η) จึงทำให้จุดต่อ x และ y แทนได้เป็น

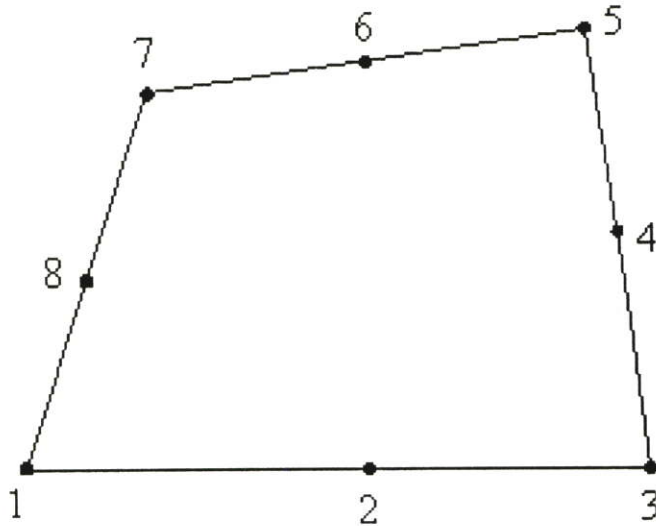
$$x(\zeta, \eta) = \sum_{i=1}^8 \alpha_i(\zeta, \eta) x_i \quad (52)$$

$$y(\zeta, \eta) = \sum_{i=1}^8 \alpha_i(\zeta, \eta) y_i \quad (53)$$



รูปที่ 4.5 เอลิเมนต์ 8-node

ที่ $\alpha_i(\zeta, \eta)$ คือฟังก์ชันรูปร่าง(shape function) ร่วมกับโนด i และ (x_i, y_i) เป็นจุด coordinate ของโนด i ที่กำหนดขอบเขตของบล็อกรูปสี่เหลี่ยมที่แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

ฟังก์ชันรูปร่างถูกแสดงในเทอมของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่มีพารามิเตอร์เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งกำหนดได้ด้วย

$$\varepsilon_i = \frac{1}{4}(1 + \zeta \zeta_i)(1 + \eta \eta_i)(\zeta \zeta_i + \eta \eta_i + 1), \quad i=1,3,5 \quad (54)$$

สำหรับโนดที่อยู่มุมจะได้

$$\alpha_i = \frac{1}{2}\zeta_i^2(1 + \zeta \zeta_i)(1 - \eta^2) + \frac{1}{2}\eta_i^2(1 + \eta \eta_i)(1 - \zeta^2), \quad i=2,4,6,8 \quad (55)$$

สำหรับโนดตรงกลางของแต่ละด้าน สังเกตคุณสมบัติของฟังก์ชันรูปร่างดังต่อไปนี้

(1) โหนดเหล่านี้มีเงื่อนไขที่ยอมรับได้

$$\sum_{i=1}^8 \alpha_i(\zeta, \eta) = 1 \quad (56)$$

$$\alpha_i(\zeta_j, \eta_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (57)$$

(2) โหนดเหล่านี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมตามด้านของเอลิเมนต์ $(\zeta = \pm 1, \eta \pm 1)$

4.5.2 การแบ่งเป็นส่วนย่อยของแต่ละบล็อก

ในแต่ละบล็อก เรากำหนด $N \text{ DIV } X$ และ $N \text{ DIV } Y$ จำนวนของการแบ่งย่อยในเอลิเมนต์เป็นการทำในทิศ ζ และทิศ $\eta(\zeta, \eta \text{ direction})$ ตามลำดับ ดังนั้นการกำหนดองค์ประกอบของน้ำหนัก $(W_\zeta)_i$ และ $(W_\eta)_i$ สำหรับแบ่ง mesh ภายในบล็อก ในการกำหนด

$N \text{ DIV } X, N \text{ DIV } Y, W_\zeta$ และ W_η จะต้องมั่นใจว่า การแบ่งย่อยเป็นไปตามเส้นระหว่างบล็อก สำหรับ บล็อกที่อยู่ติดกัน เราเริ่มให้ค่า ζ และ η เป็น -1 ดังนั้น natural coordinates จึงเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับสมการที่ (56) และ (57)

$$\zeta_i = \zeta_i + \frac{2(W_\zeta)_i}{W_\zeta^T \cdot F} \quad (58)$$

$$\eta_i = \eta_i + \frac{2(W_\eta)_i}{W_\eta^T \cdot F} \quad (59)$$

เมื่อ สมการที่(58) และ(59) บอกองค์ประกอบของน้ำหนักแนวแกน X และ Y

$$W_\zeta^T = \sum_{j=1}^{NDIVX} (W_\zeta)_j \quad (60)$$

$$W_\eta^T = \sum_{j=1}^{NDIVY} (W_\eta)_j \quad (61)$$

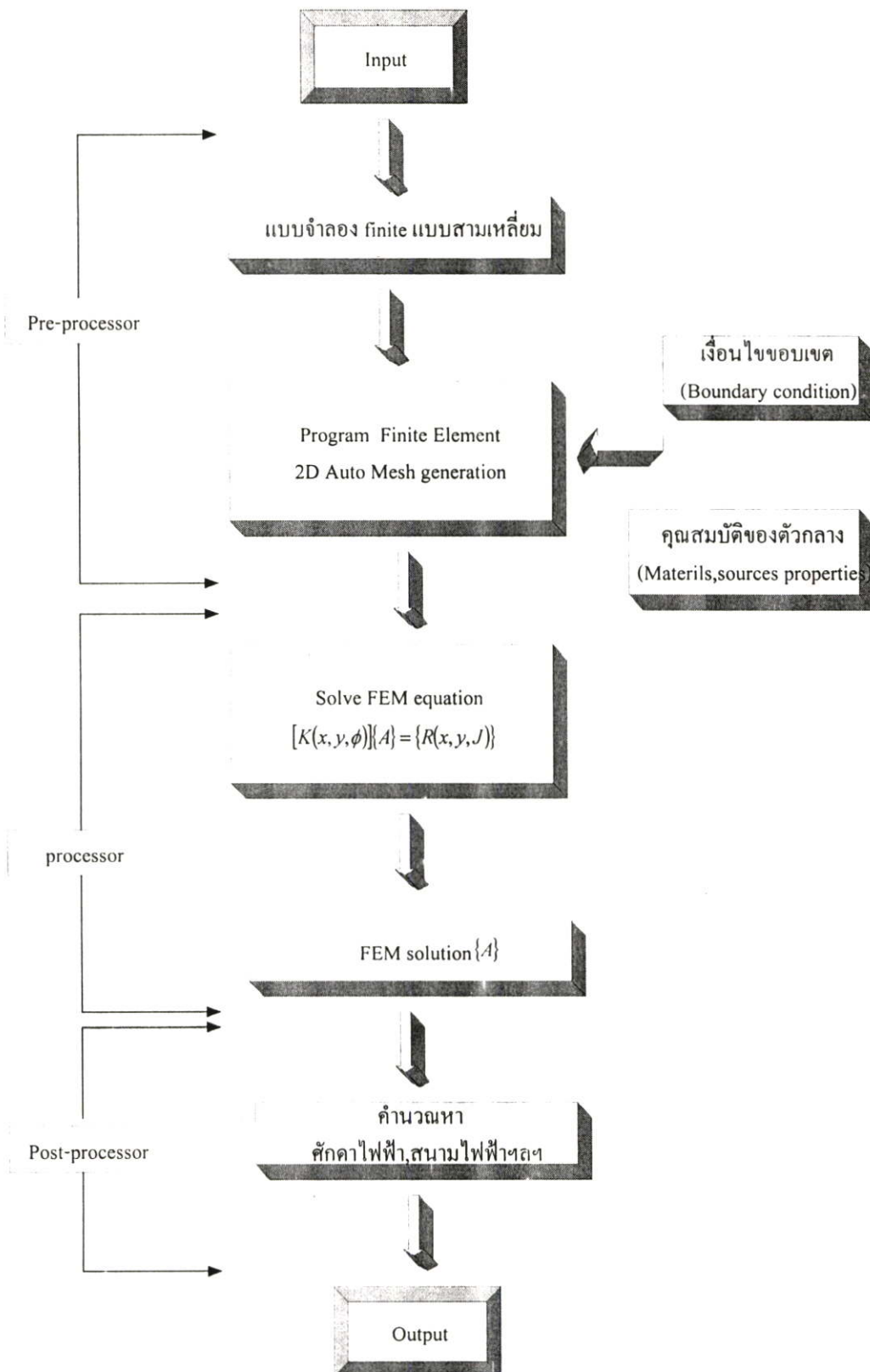
และ

$$F = \begin{cases} 1, & \text{for linear....element} \\ 2, & \text{for quadratic....element} \end{cases}$$

ชนิดของเอลิเมนต์ที่ยอมรับได้มีสามชนิด คือ (ก) เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม linear 4- node (ข) เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม linear 3- node (ค) เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม 8-node ที่มีพารามิเตอร์เท่ากัน

4.5.3 การเชื่อมต่อในแต่ละบล็อก

หลังจากการแบ่งแต่ละบล็อกและจำนวนจุด โหนดของมันแล้วก็จำเป็นต้องทำการเชื่อมต่อบล็อกและมีจำนวนของโหนดแต่ละ โหนด ให้เป็นแบบเดียวกันโดยทำการเปรียบเทียบจุดตัดของ โหนดทั้งหมดและกำหนดตัวเลขเหมือนกันให้กับ โหนด ทั้งหมดให้มี coordinates เดียวกันนั่นคือ เราเปรียบเทียบ coordinates ของ โหนด 1 กับ โหนด อื่นๆทั้งหมดจากนั้นก็เปรียบเทียบ โหนดที่ 2 กับ โหนดอื่นๆจนกระทั่ง โหนด ทั้งหมดถูกกำจัดหมดไป[8]และตัวอย่างโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวกข. กระบวนการคำนวณหาจำนวนเอลิเมนต์ที่ซับซ้อนจะสามารถแสดงได้ดังรูป4.7 และผลการกำหนดเอลิเมนต์ที่มีความยุ่งยากจะแสดงได้ ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.16



รูปที่ 4.7 กระบวนการทำงานของโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 ทิศทาง

4.6 ผลการคำนวณของ Auto Mesh และพิกัดการชี้ตำแหน่งของโปรแกรม

```
NODAL      NE      NVAR
106        138      1
```

NODAL COORDINATES & SOLUTIONS [106] :

```
1 .50000E+00 .00000E+00 .15000E+03
2 .40000E+00 .20000E+00 .78564E+02
3 .50000E+00 .20000E+00 .83387E+02
4 .60000E+00 .20000E+00 .78368E+02
5 .30000E+00 .40000E+00 .56376E+02
6 .50000E+00 .40000E+00 .60552E+02
.
.
.
106 .10000E+01 .70000E+01 .35015E-01
```

ELEMENT NODAL CONNECTIONS [138] :

```
1  1  3  2
2  1  4  3
3  3  5  2
.
.
.
138 103 106 105
```

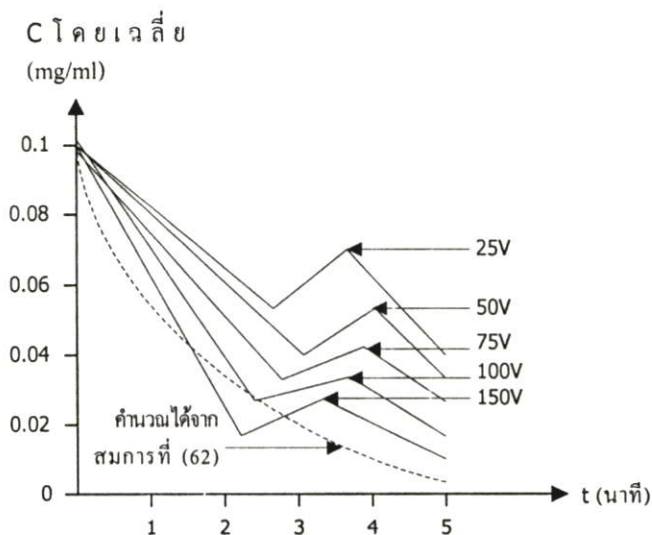
$R =$ ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) และ $T =$ อุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 37°C , F คือ ค่าคงที่ของ Faraday $= 9.649 \times 10^4 \text{ C/mol}$, V_{ap} คือแรงดันที่จ่ายให้กับระบบ ; $C_0/C_\infty =$ อัตราความเข้มข้นที่ระยะห่างจากจุดทดสอบไปถึงอนันต์, $\phi_k =$ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละอิเล็กโทรด. จากสมการที่(32) ถึง(52)เราสามารถนำมาสร้างโปรแกรม FEM ที่เขียนจากภาษา Fortran คำนวณ

4.7 แบบจำลองที่ได้จากการคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบได้อย่างไร

การสร้างแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อกำหนดศักดาไฟฟ้าให้กับรูปทรงของอิเล็กโทรดของเครื่องแยกโปรตีนนั้นจะมีข้อกำหนดรูปทรงมาเกี่ยวข้องในขณะที่ระบบของวงจรไม่สามารถที่ทำการวัดได้ไม่แน่นอนดังนั้นพารามิเตอร์จึงมีโอกาศผิดพลาดสูงและถ้าปรับสนามไฟฟ้าแรงมากเกินไปจะทำให้เกิดระบบเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติการได้ดังนั้นเลยกำหนดรายละเอียดของการอธิบายและความแตกต่างระหว่าง(62) กับ(51)

$$\frac{C_o}{C_x} = \sum_{i=1, i \neq k} EXP \left(-\frac{ZF}{RT} \Phi_k \right) \quad (62)$$

สมการที่(62)เป็นแบบจำลองของ Gouy และChapman ในปี ค.ศ. 1910-1913 ดังรูปที่ 4.8ที่แสดงอยู่ในรูปของเส้นประที่กล่าวถึงความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในภาวะจำกัดและมีตัวทำละลายคือน้ำ(C_o/C_α)ที่ลดลงเมื่อมีศักดาไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 อัตราความเข้มข้นโดยเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกับสมการ(62)

พฤติกรรมของความเข้มข้นโปรตีนชนิดอัลบูมินต่ำสุดจะแปรผันกับระดับแรงดันที่จ่ายให้ในระดับต่างๆซึ่งเป็นผลจากการวัดด้วย Spectrophotometer ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับการคำนวณในสมการที่(62)แต่ในภาวะที่จำกัดนี้จะไม่สามารถบอกได้ว่าสนามไฟฟ้ากระจายตัวในสารไดอิเล็กทริกระหว่างน้ำกับโปรตีนได้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นตัวช่วยอธิบายเพื่อให้ทราบถึงปรากฏการณ์ของศักดาไฟฟ้าที่แพร่กระจายในสารตัวกลางคือน้ำกับโปรตีน โดยอาศัยขบวนการทางโปรแกรมที่กล่าวมาตั้งแต่สมการที่(33) ถึง(61)เป็นตัวกำหนดพฤติกรรม

เมื่อเราต้องการทราบการกระจายของศักดาไฟฟ้าจากการทดลองจริงว่าไปในทิศทางไหน อย่างไรงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างรูปแบบทดลองจริงเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



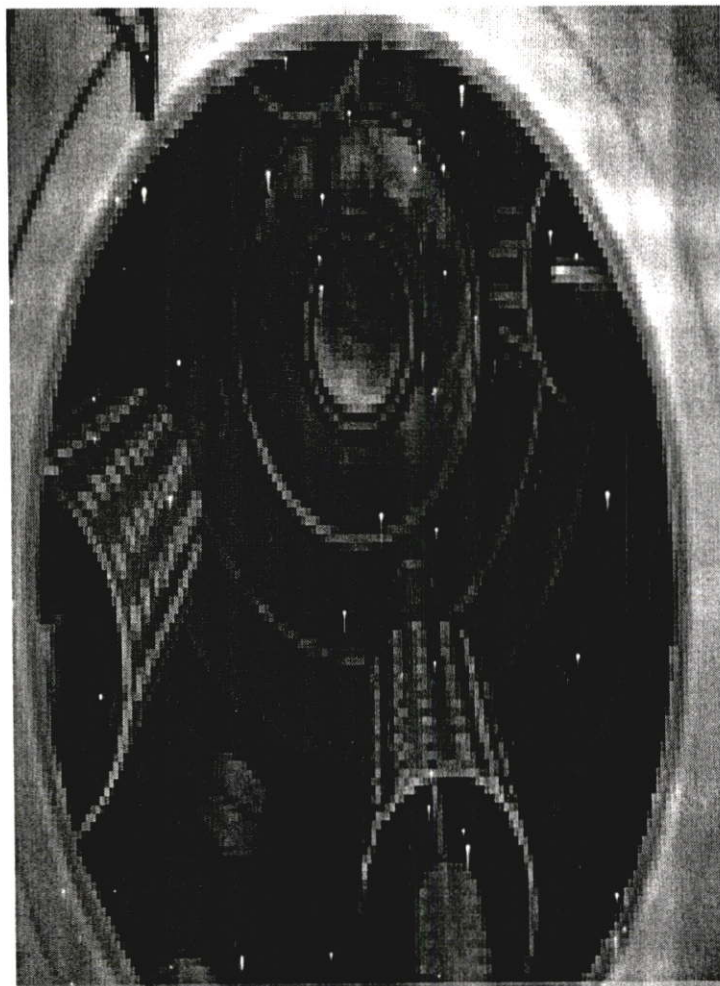
รูปที่ 4.9 การทดลองจริงของเครื่องแยกโปรตีนในน้ำเสียที่มีส่วนผสมของโปรตีนกับน้ำใช้อิเล็กทรอนิกส์รูปทรงวงแหวนเมื่อมองด้านบนความต่างศักไฟฟ้าเท่ากับ 500 โวลต์ในรัศมี 30 ซม.ม.

จากรูปที่ 4.9 ในขณะที่ทดลองไม่สามารถวัดศักดาไฟฟ้าที่แพร่กระจายในทิศทางใดและไกลกี่เซนติเมตรในวงจำกัด 1 เมตรแต่แบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 จะประมาณได้



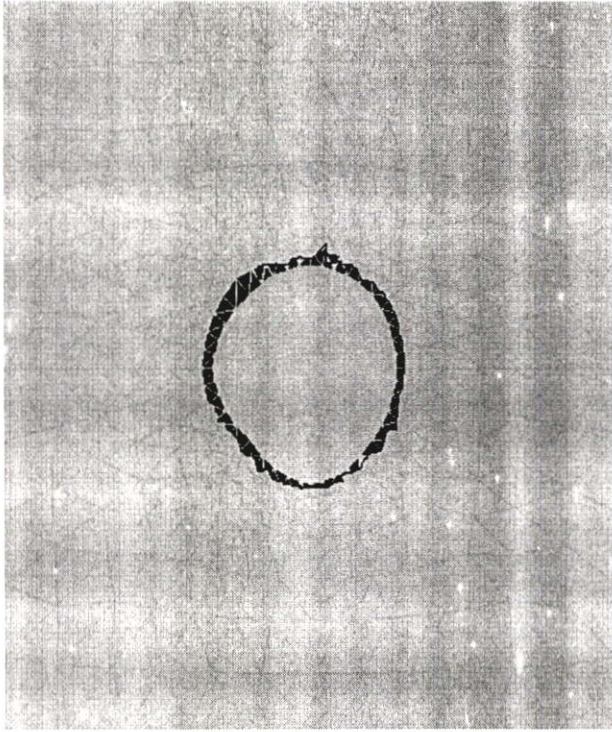
รูปที่ 4.10 เปลี่ยนเป็นสถานะใหม่โดยใช้แบบหลอดปิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 150 โวลต์

การกระจายของศักย์ไฟฟ้าและตำแหน่งของอิเล็กโทรดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.11 การวางตำแหน่งของอิเล็กโทรดรูปทรงกรงกระรอกแบบคู่ขนาน 4 จุดในขณะที่มีศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 100 โวลต์รัศมีการกระจายตัวในอากาศ 80 ซม.

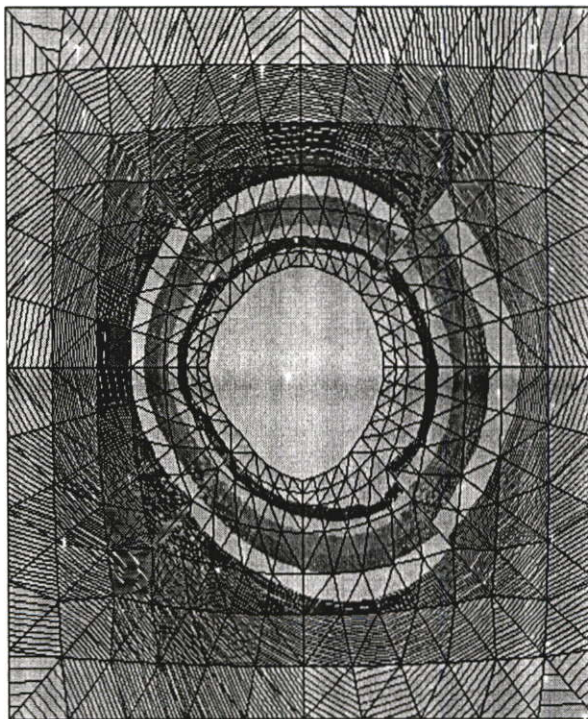
จากรูปที่ 4.11 การกระจายของศักดาไฟฟ้าและตำแหน่งของอิเล็กโทรดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



FINITE
ELEMENT
MODEL

MODEL CONSISTS OF
352 NODES
560 TRIANGLES

รูปที่ 4.12 การคำนวณ โดยวิธีของAuto Mesh Generationเมื่อมองด้านบนอิเล็กโทรดที่ไม่สมดุล



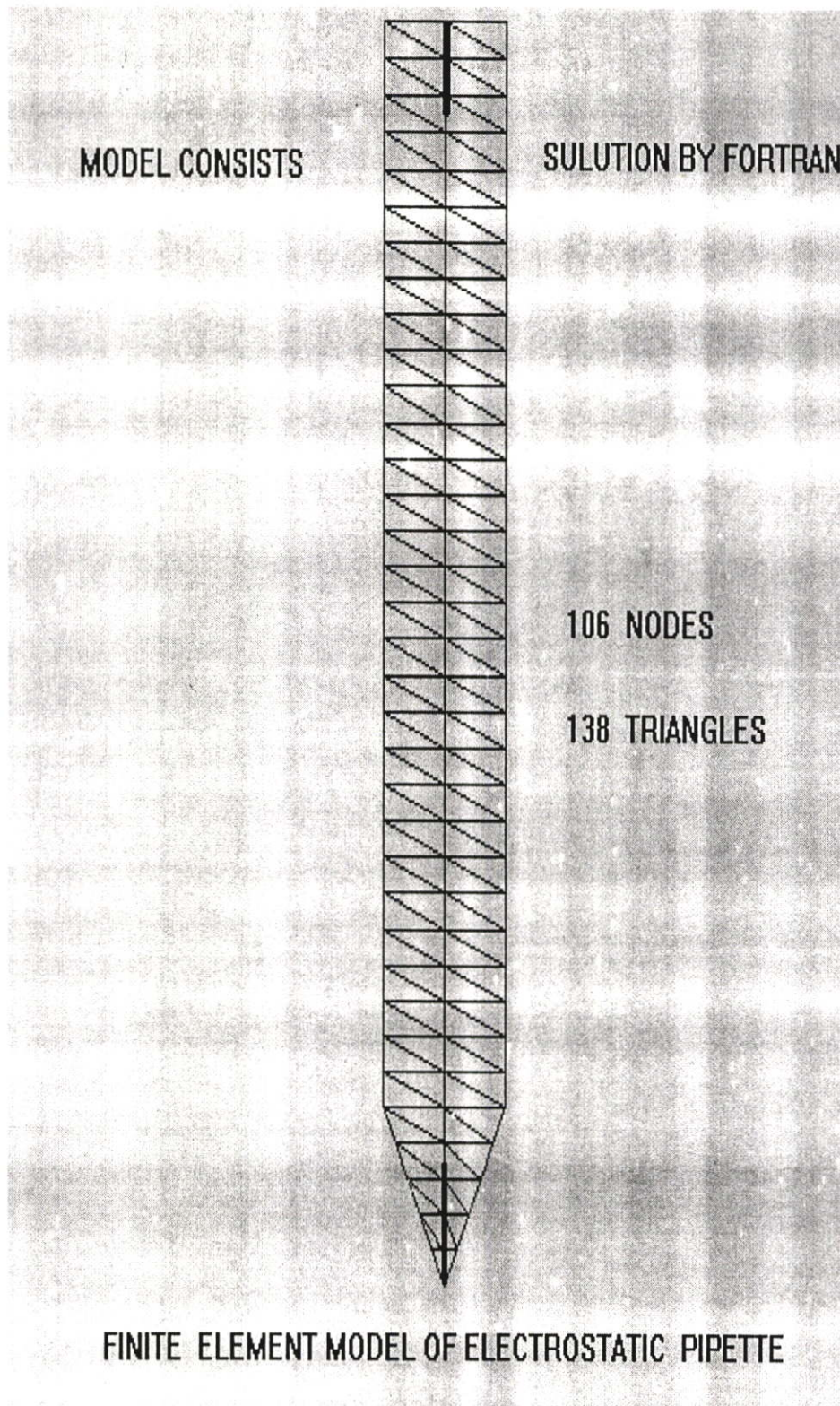
SOLUTION (TOP VIEW
POTENTIAL OF THE
POTENTIAL DISTRIBUTION)

COLOR CONTOUR LEVELS

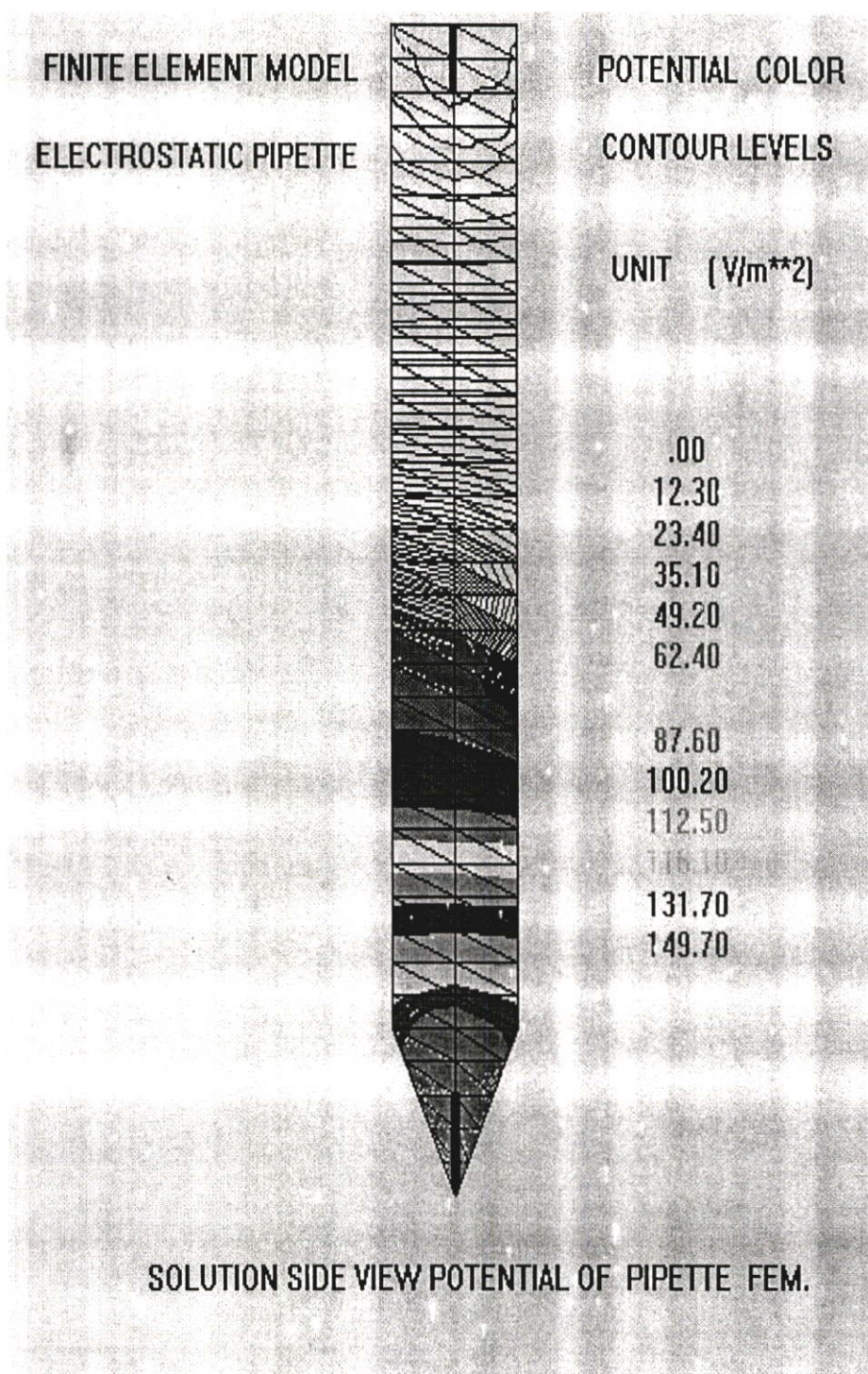
294.00
312.00
329.00
346.00
363.00
380.00

414.00
431.00
448.00
465.00
482.00
499.00

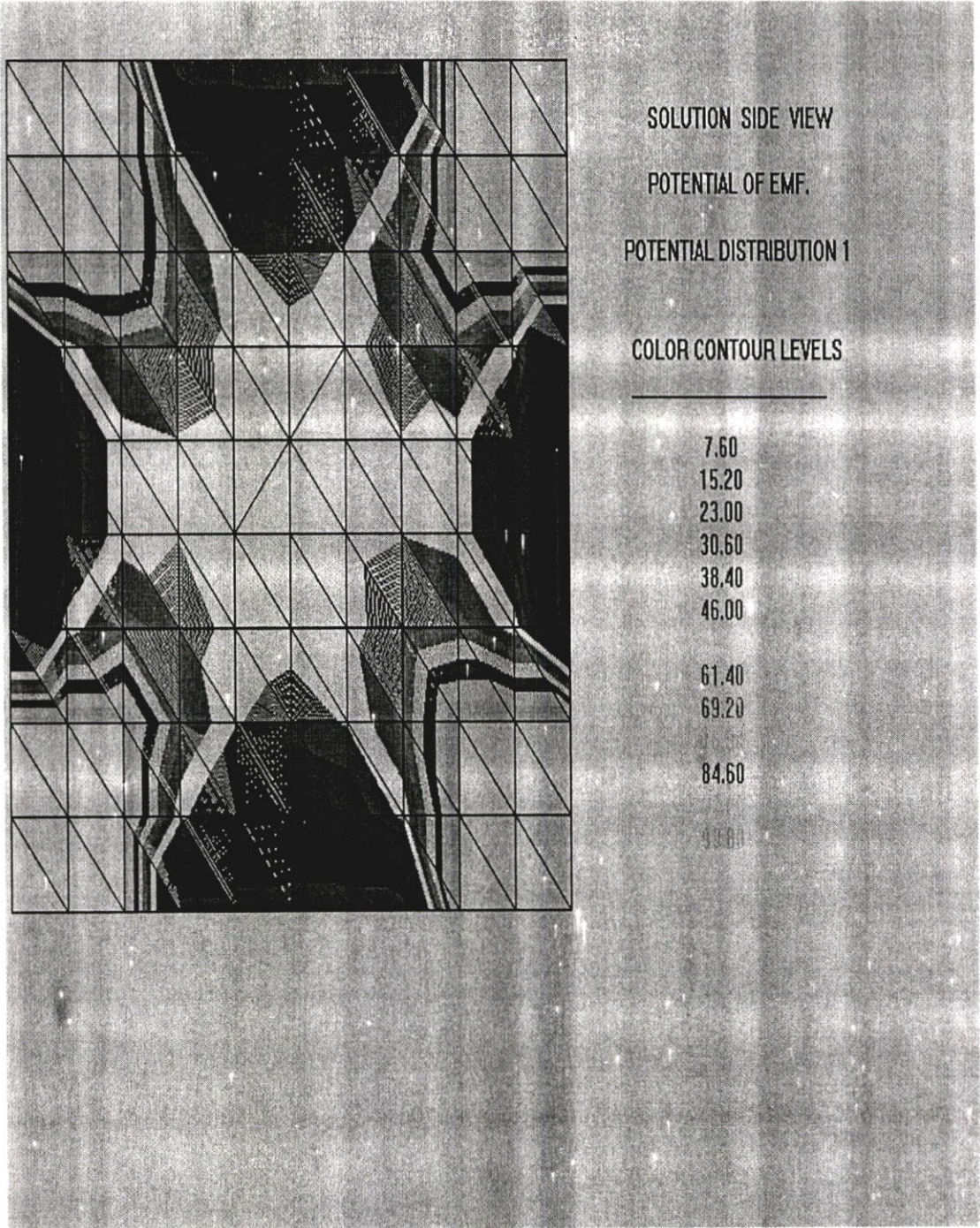
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมของศักดาไฟฟ้าที่กระจายในสารไดอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดที่บิดงอ



รูปที่ 4.14 การคำนวณของ Auto Mesh Generation



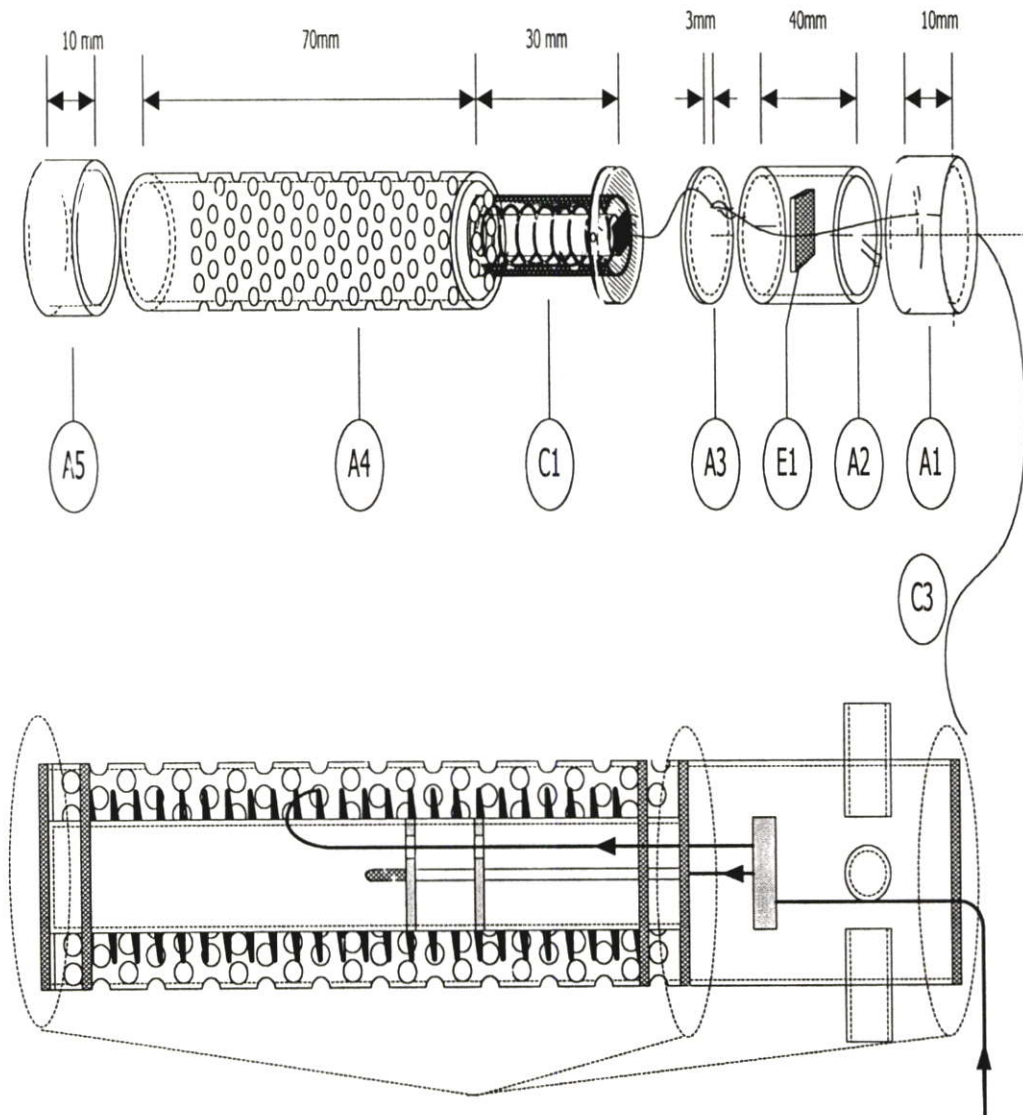
รูปที่ 4.15 ผลการคำนวณการกระจายของศักดาไฟฟ้าในแต่ละเอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม FEM ที่ประดิษฐ์ขึ้น



รูปที่ 4.16 ผลการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าแบบการวางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคู่ขนาน 4 จุด

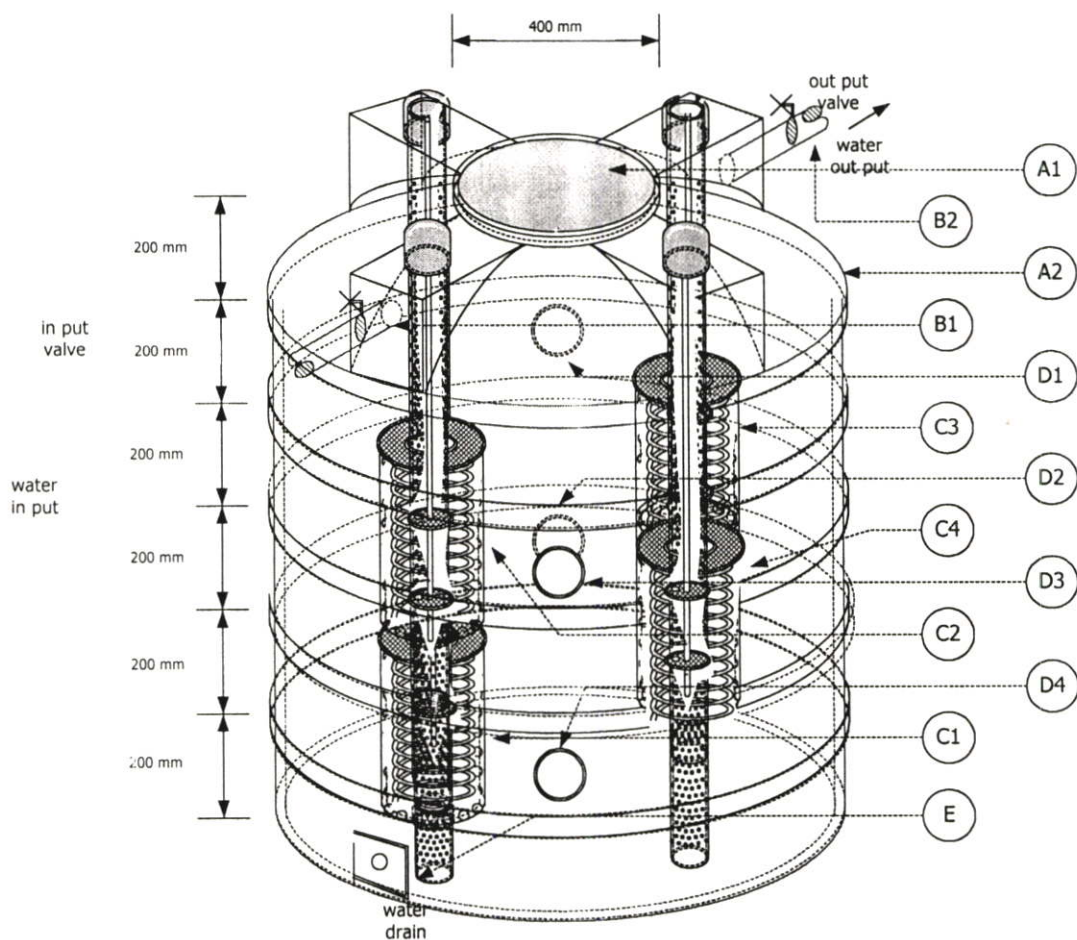
4.8 การออกแบบระบบเครื่องแยกโมเลกุลโปรตีน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบเครื่องแยกโมเลกุลซึ่งได้เริ่มต้นจากระดับห้องปฏิบัติการที่มีระดับแรงดันต่ำที่ระดับพลังงาน 3 วัตต์แรงดันเอาท์พุท 150 โวลต์ เพื่อต้องการหาอัตราการแยกในช่วงที่ดีที่สุดหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเครื่องแยกโมเลกุลโปรตีนสนามไฟฟ้าแบบหลอดปิดที่มีระดับพลังงานต่ำดังรูปที่ 4.17 และถึงแยกโมเลกุลโปรตีนแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคู่ขนาน 4 จุดที่สามารถบรรจุน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตรดังแสดงในรูปที่ 4.17



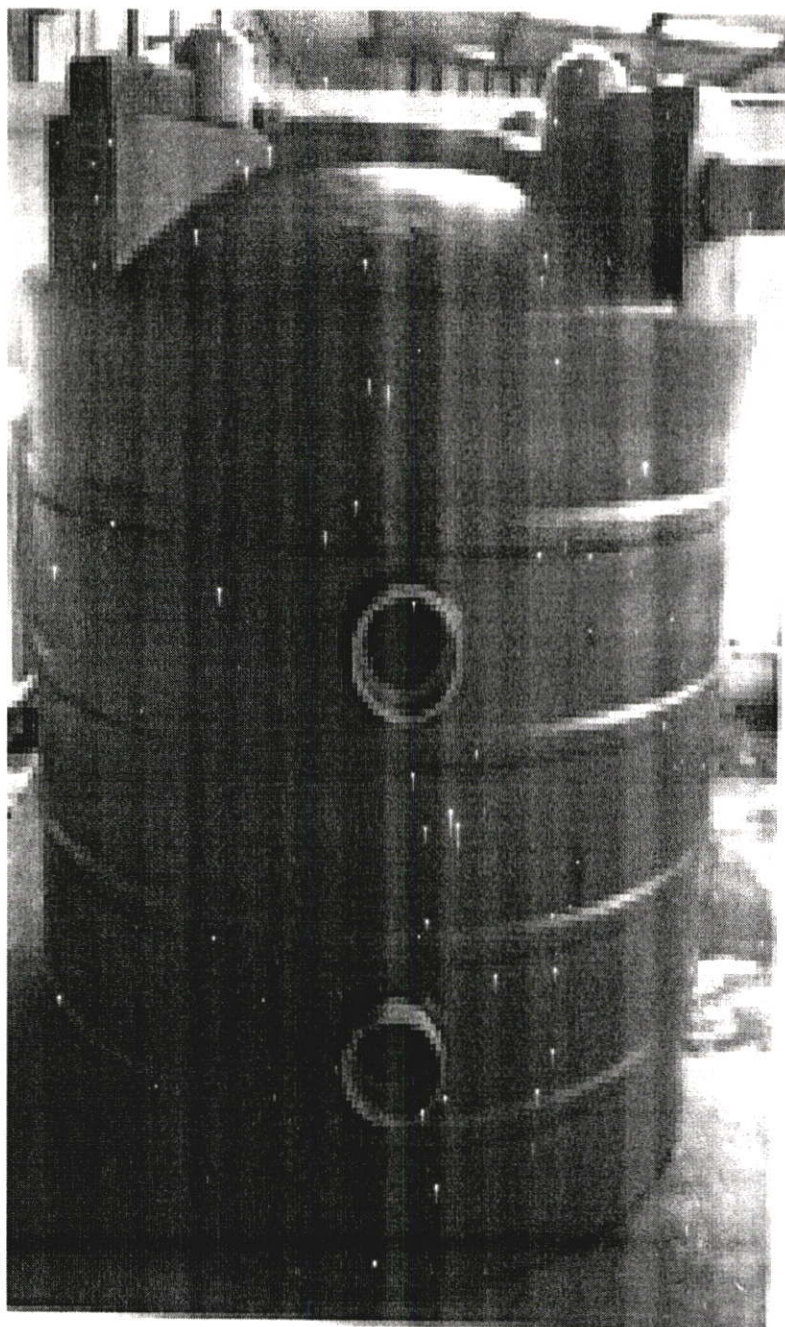
รูปที่ 4.17 รูปโครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องแยกปิเปตสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.17 ,A1 เป็นฝาครอบส่วนหัว A2 ส่วนของจุดเชื่อมต่อจากวงจรควบคุมและสายส่งสนามไฟฟ้าจะทำด้วย PVC , E1 เป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นทำจากทองแดง, A3 เป็นฝาปิดท้ายส่วนหัว , C1 เป็นหลอดปิเปตบรรจุน้ำได้ 100 ml และข้างในจะมีอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนทำจากทองแดงจำนวน 1 ชุด, A4 เป็นท่อ PVC แบบใสและเจาะให้เป็นรูพรุนเพื่อป้องกันสนามเหนี่ยวนำกับผู้ใช้ ,A5 ฝาปิดท้าย, C3 เป็นสายส่ง



รูปที่ 4.18 ภาพจำลอง ถึงปฏิบัติการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคู่ขนาน 4 จุด

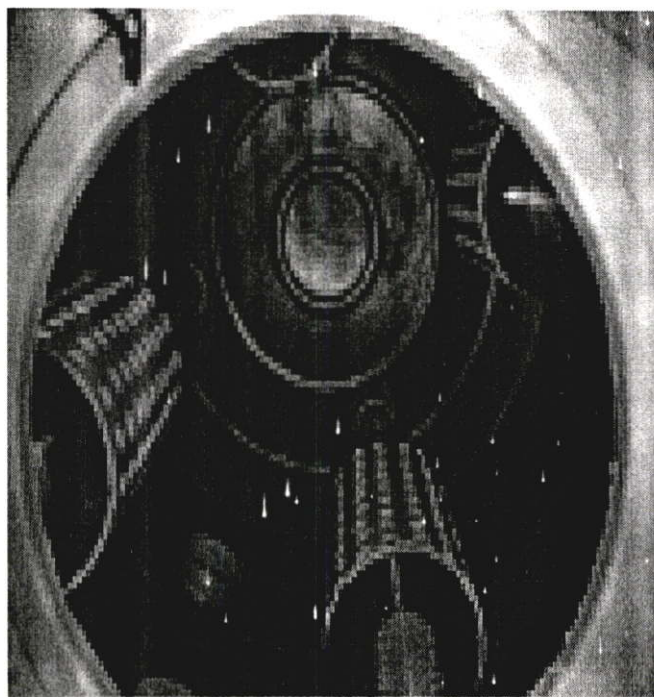
A1 เป็นฝาปิดถัง ,A2 ตัวถังทำจากถังพลาสติกแบบโพลีเอทิลีน,B1 เป็นท่อส่งน้ำเสียเข้า B2 เป็นท่อส่งน้ำดีออก, D1 เป็นตัวตรวจสอบระดับน้ำและยังสามารถดูการทำงานด้านหน้า ,D2 ดูการทำงานด้านหลัง,C3 เป็นชุดอิเล็กทรอนิกส์ชุดที่ 1 ทำจากท่อ PVC ทึบรัศมี 8 นิ้ว ยาว 16 นิ้วข้างในจะมีขดลวดอิเล็กทรอนิกส์แบบโซลินอยด์ 8 รอบพร้อมกับหัวจ่ายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทรงระบอทำจากทองแดงรัศมี 8 มิลลิเมตร ยาว 10 เซนติเมตรถูกปิดล้อมด้วยท่อ PVC รัศมี 2 นิ้วและเจาะรูพรุนเพื่อให้สนามแม่เหล็กทำงานในทิศทางเสริมกัน ,C2 เป็นชุดอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.19 เป็นรูปต้นแบบจริงภายนอกถึงปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคู่ขนาน 4 จุด



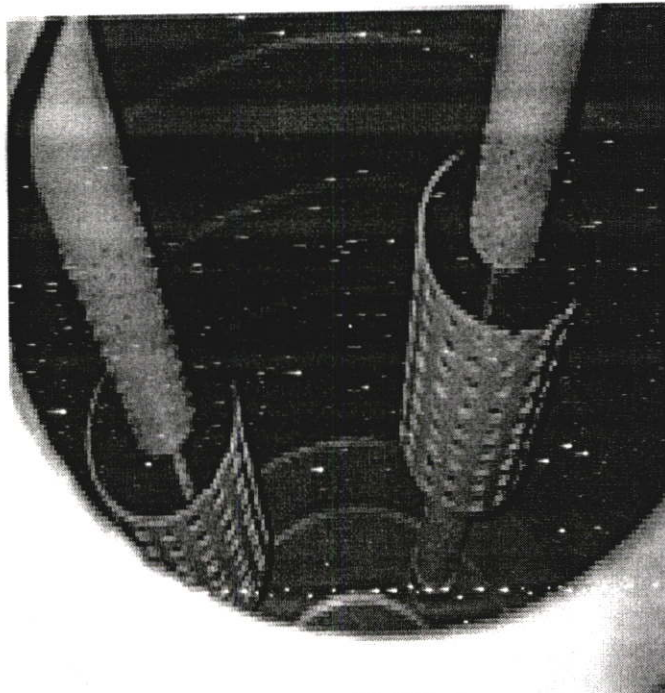
รูปที่4.20 ส่วนบนของถังที่ประกอบด้วยระบบวงจรควบคุมการจ่ายสนามแบบขนานแรงดัน4 จุด



รูปที่4.21 อิเล็กโทรดแบบกรงกระรอกที่ทำจากท่อPVC มองจากด้านบน

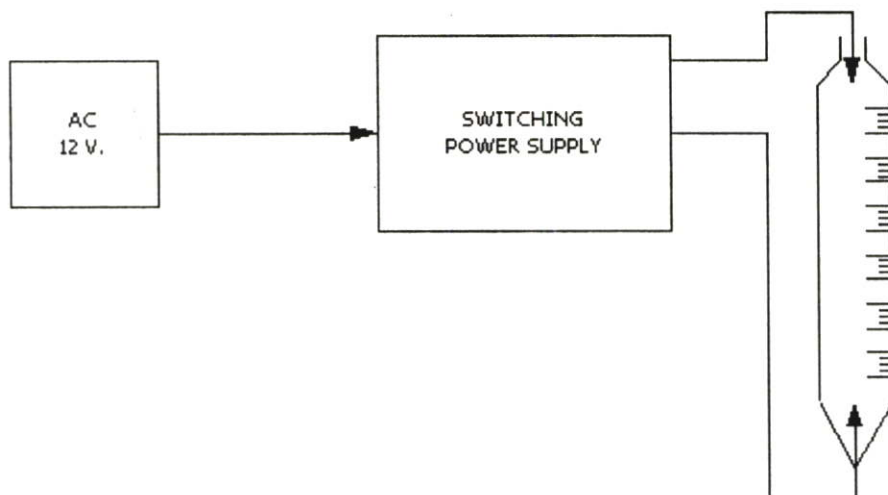


รูปที่ 4.22 อิเล็กโทรดแต่ละคู่จะถูกวางเรียงกันแบบต้นต่อปลายเพื่อป้องกันการหักล้างของฟลักซ์



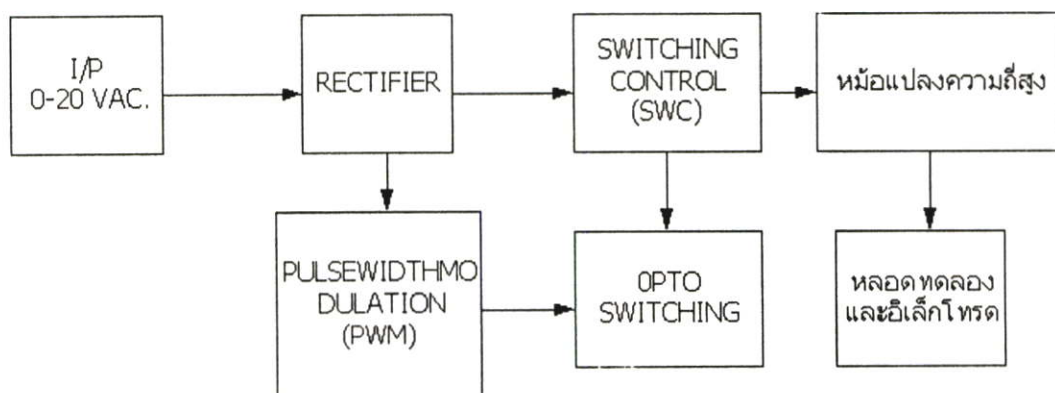
รูปที่ 4.23 เป็นอิเล็กโทรดอีกด้านก็จะถูกจัดวางในลักษณะเดียวกัน

4.9 หลักการทำงานของระบบเครื่องแยกโมเลกุลโปรตีน



รูปที่ 4.24 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องแยกโปรตีนอัลบูมินแบบหลอดปิเปตสนามไฟฟ้าสถิตย์

จากรูปที่ 4.20 เมื่อเราผ่านแรงดัน 0 ถึง 20 โวลต์ เอซี กระแสไม่เกิน 20 มิลลิแอมแปร์ภาค RECTIFIER จะทำหน้าที่สร้างแรงดันที่ 12 โวลต์ ดีซี เพื่อจ่ายให้กับระบบ PWM และ SWC ส่วน OPTO SW. เป็นตัวกำหนดความถี่ เพื่อส่งไปยัง SWC ผลิตความถี่สูงให้กับหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งในหม้อแปลงจะมีความถี่ที่ถูกกำหนดโดยไดโอดซึ่งจะเป็นตัวกำหนดสัญญาณไฟดีซีแบบบวก 150-1,000 โวลต์เพื่อจ่ายให้กับอิเล็กโทรดในหลอดปิเปตทำให้เกิดปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่อิเล็กโทรดและสามารถดูดซับโมเลกุลโปรตีนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้



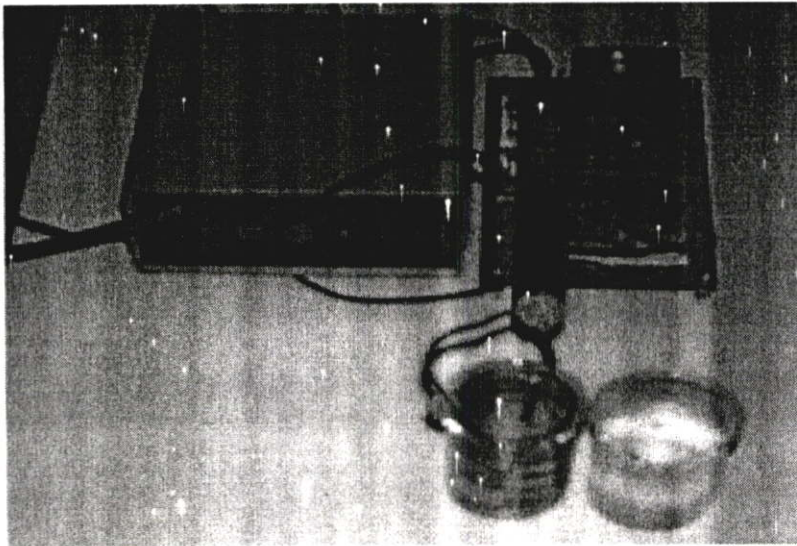
รูปที่ 4.25 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

บทที่ 5

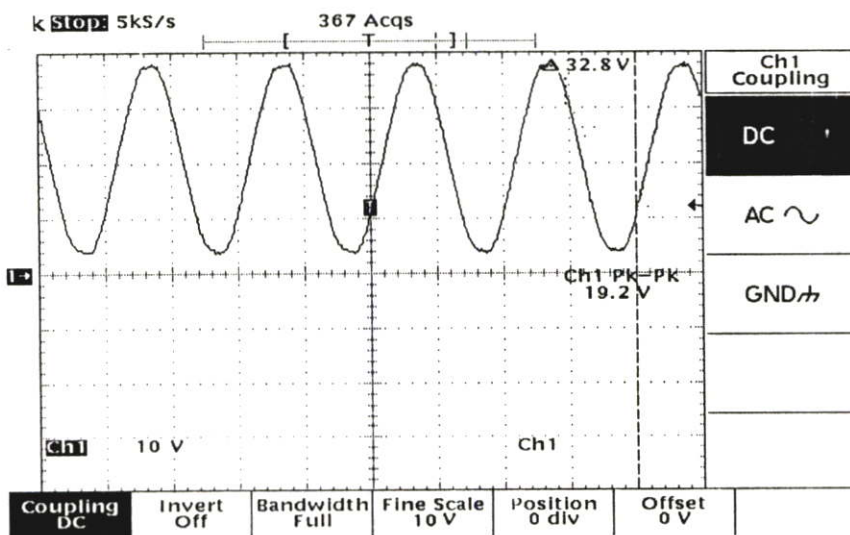
การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง

5.1 ขั้นตอนการทดสอบ

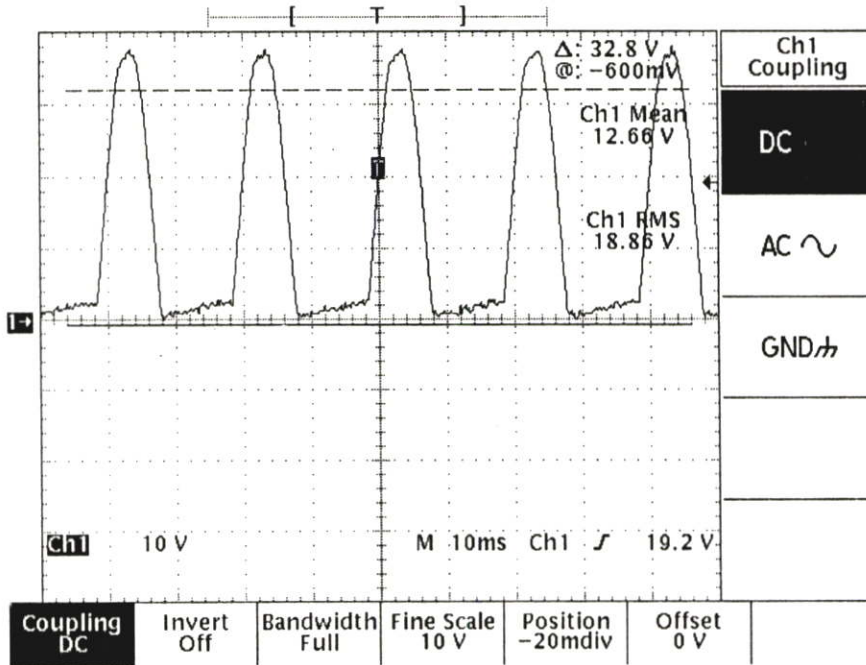
ขั้นตอนที่ 1 ทำการทดสอบการทำงานของระบบระดับห้องปฏิบัติการเพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของกระแสและแรงดันในสภาวะ ของผลตอบสนองของกระแสกระตุ้น



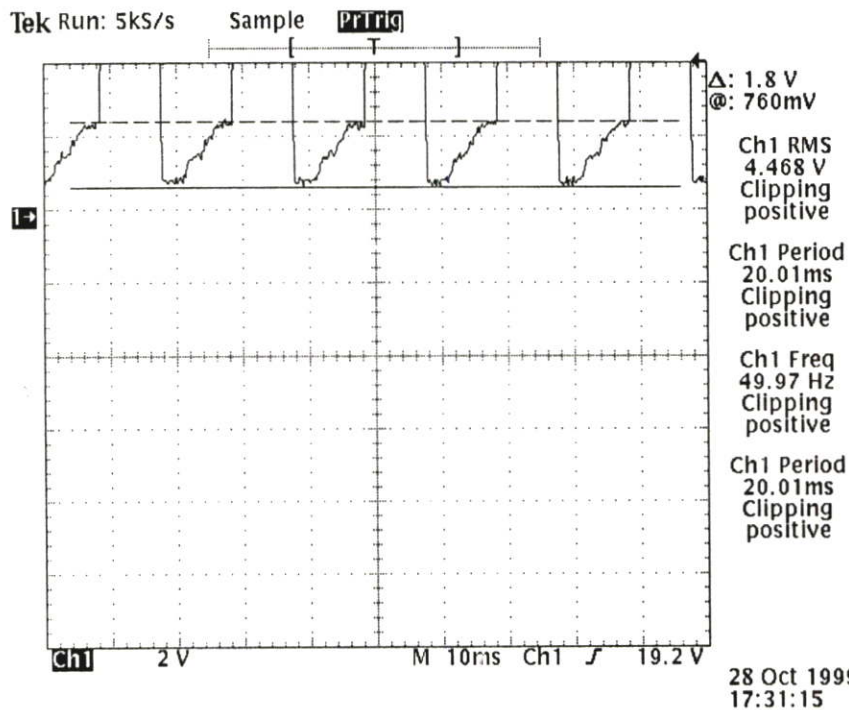
รูปที่ 5.1 เป็นการทดสอบโดยการวัดค่าศักดาไฟฟ้าสภาวะมีโหลดและไม่มีโหลด



รูปที่ 5.2 เป็นสัญญาณแรงดันทางด้านเอาพุทขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า

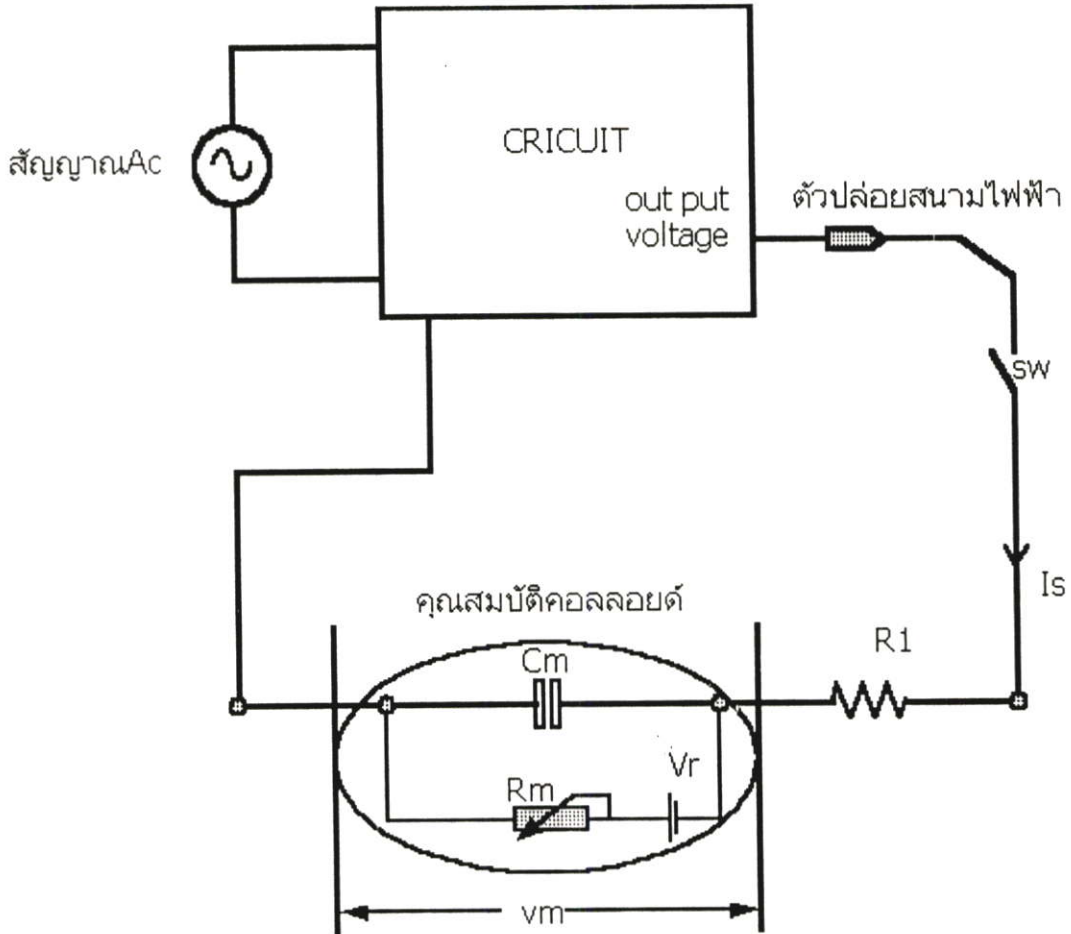


รูปที่ 5.3 สัญญาณทางเอาต์พุตขณะมีภาระน้ำ 100 มิลลิลิตร / โปรตีนอัลบูมินผง 2 มิลลิกรัม



รูปที่ 5.4 เมื่อทำการขยายและทำการวัดศักดาไฟฟ้าเล็กๆที่เกิดจากการดกคร่อมภาระน้ำกับโปรตีน

จากรูปที่ 5.4 เป็นพฤติกรรมที่มีความสอดคล้องกันกับทฤษฎีส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าสู่เซลล์ ซึ่งมีชีวิตเล็กๆของ(Powell et al.,1998; Banett and Weaver,1991) โดยจะอาศัยแบบจำลองนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นกับผลการวิจัยนี้เพื่อช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 5.5 เป็นแบบจำลองของ(Powell et al., 1986; Banet and Weaver, 1991)

จากรูปที่ 5.5 จาก[2] เมื่อตัวแปรทั้งหมดนี้จะสามารถแสดงได้ดังนี้

R_m เป็นความต้านทานของเซลล์เมมเบรนมีหน่วยเป็น $[k\Omega - cm^2]$ และ

$$R_m = 2\pi ar_m \quad (63)$$

r_m เป็นความต้านทานภายในของเซลล์มีหน่วยเป็น $[k\Omega - cm]$

a เป็นรัศมีของเซลล์ $[cm]$

$$C_M = \frac{C_m}{2\pi a} \quad (64)$$

C_M เป็น ค่าความจุของเซลล์ต่อหน่วยพื้นที่ที่ทำการทดลองมีหน่วยเป็น $[\mu F / cm^2]$

C_m เป็น ค่าความจุของเซลล์ต่อหน่วยพื้นที่ที่ทำการทดลองมีหน่วยเป็น $[\mu F / cm]$

ในแบบจำลองจากรูปที่ 5.5 พลังงานไฟฟ้าที่ส่งผ่านเซลล์เมมเบรนในชั้นต้นจะถูกขับเคลื่อนด้วยปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามาจะขับเคลื่อนด้วยแรงทางกลจะแสดงได้ดังนี้

$$\Delta E = \Delta E_M + \Delta E_E + \Delta E_0 \quad (65)$$

เมื่อ ΔE_M คือแรงหรือพลังงานกลและ ΔE_E คือพลังงานทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ΔE_0 เป็นค่าคงที่ที่สามารถกำหนดได้ดังนั้นจะได้

$$\Delta E_M = 2\pi g r - \pi \Gamma r^2 \quad (66)$$

เมื่อ Γ เป็นความหนาแน่นของพลังงานที่พื้นผิวระหว่างเซลล์กับน้ำและ g คือพลังงานรอบอนุภาค r เป็นรัศมีของเซลล์

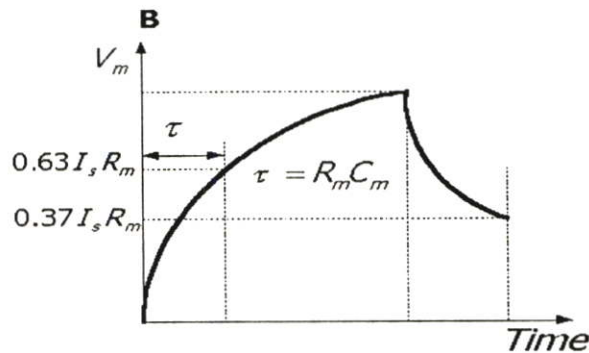
$$\Delta E_E = -\frac{\pi(\epsilon_w - \epsilon_i)U}{h^2} \int_{r_{\min}}^r \alpha^2 r dr, \text{ เมื่อ } \alpha(r) = \left[1 + \frac{\pi r k_p(r)}{2 h k_e}\right]^{-1} \quad (67)$$

เมื่อ ϵ_w เป็นค่า dielectric ของน้ำ $= 80\epsilon_0$ และ ϵ_i เป็นค่า dielectric ของเซลล์ $= 2.1\epsilon_0$

h = ค่าความหนาของโมเลกุล U เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระทั้งหมด K_c คือสภาพการนำของภาชนะที่บรรจุที่ใช้ทดสอบโดยมาตรฐาน $= 0.98 \Omega / m$, K_p คือสภาพการนำของภาชนะที่บรรจุที่ใช้ทดสอบใน Function ของรัศมีอนุภาค r จากแบบจำลองที่ 5.5 ถ้ากำหนดให้ I_s เป็นกระแสกระตุ้นที่ไหลผ่านเซลล์เล็กๆที่เป็นวงจร RC จะพบว่า

$$V_m = I_s R_s \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] \quad (68)$$

เมื่อ V_m เป็นแรงดันที่ขาร์จในเซลล์ [mV], I_s เป็นกระแสกระตุ้นต่อหน่วยพื้นที่ [$\mu A / cm^2$] และ R_m เป็นความต้านทานของเซลล์เวลาต่อพื้นที่ [$K\Omega - cm^2$] t เป็นเวลากระตุ้น [ms] เมื่อ $\tau = RC$ เป็น time constant [ms] และ C_m เป็นค่าความจุของเซลล์ต่อหน่วยพื้นที่ที่ทำการทดลองมีหน่วยเป็น [$\mu F / cm^2$]



รูปที่ 5.6 เป็นผลตอบสนองของแรงดันในแบบจำลอง RC จากสมการที่(68)

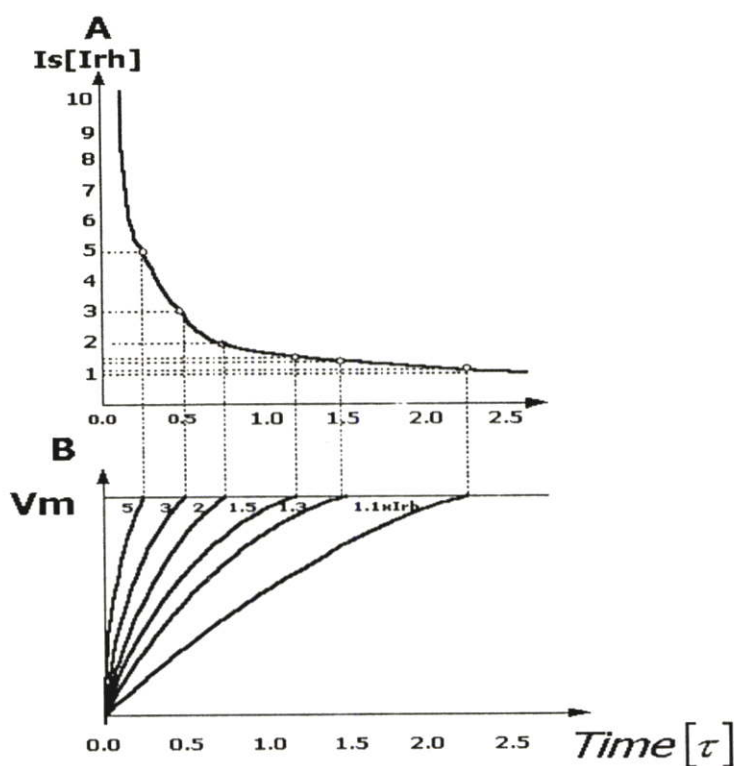
จากสมการที่(65)ถ้าใช้หลักการของเรวินินส์เราจะพบว่า $V_m = \Delta V_m$ เมื่อต้องการหากระแสกระตุ้น

$$I_s = \frac{\Delta V_m}{R_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (69)$$

จากสมการที่(66)ถ้าต้องการหากระแสกระตุ้นเล็กๆที่ส่งผ่านเซลล์ที่มีศักดาไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นสามารถหาได้โดยหลักการของ rheobasic current เนื่องจากการจำลองของพฤติกรรมของกระแสจะสะดวกขึ้นและ rheobasic current จะได้ดังนี้ $I_{rh} = \Delta_{th} / R_m$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_s = \frac{I_{rh}}{\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (70)$$

และจากสมการที่(65)และ(67)สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



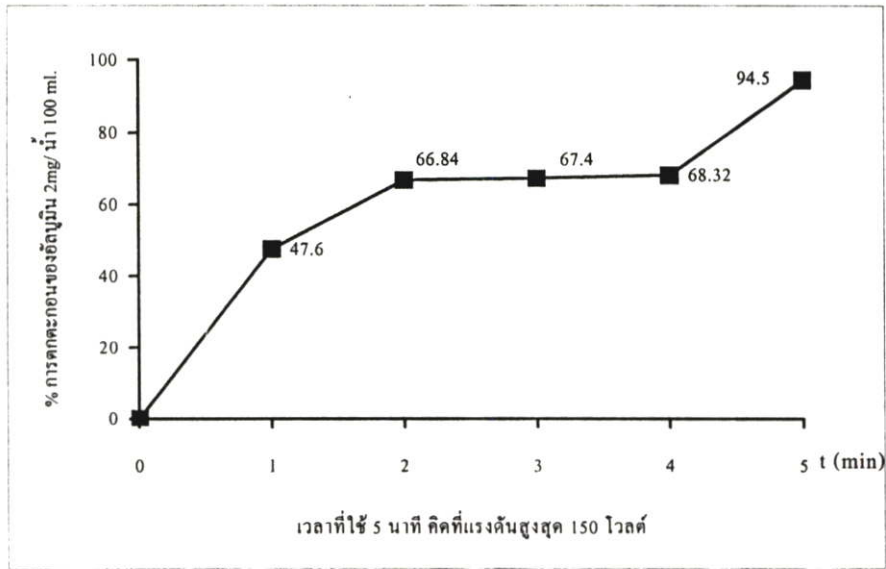
รูปที่ 5.7 เป็นผลการคำนวณแรงดันและกระแสชั่วขณะจากสมการ(68)กับ(70)

ขั้นตอนที่ 2 ได้นำเครื่องต้นแบบคือหลอด ปีเปิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทดสอบหาอัตราความเร็วในการแยกอัลบูมินออกจากน้ำและหาความ sensitivity ของเครื่อง โดยนำโปรตีนอัลบูมินที่มีความบริสุทธิ์ 98% ปริมาณ 2 มิลลิกรัมผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร และผ่านสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 25 โวลต์ ถึง 150 โวลต์ ใช้เวลาทดสอบ 5 นาที แล้วนำน้ำที่ได้โดยการสูมออกมาครั้งละ 1 มิลลิลิตร

มาทำการวัดการดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตที่มีช่วงความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ทำซ้ำ 20 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยเทียบกับผลการทดสอบซึ่งจะได้ดังรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10

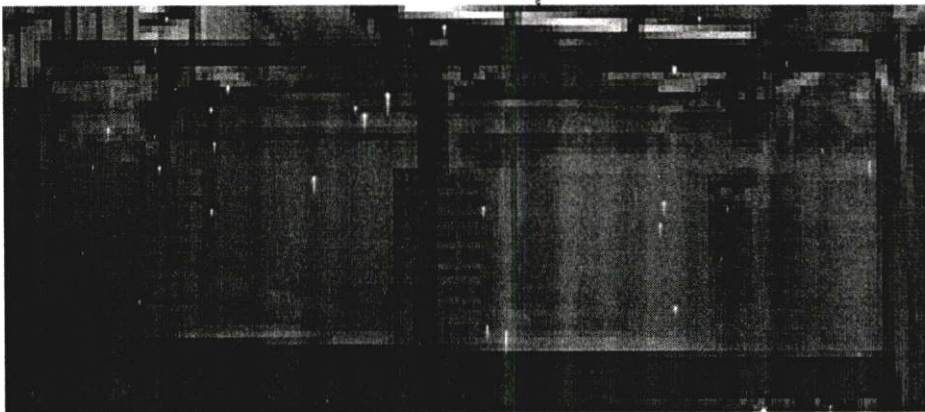


รูปที่ 5.8 การใช้ electrostatic pipette ทดสอบกับอัลบูมินที่มีน้ำหนัก 2 mg./น้ำ 100 ml. อ่านค่าได้จากหลอดเท่ากับ 2 ml. ที่เวลา 5 นาที

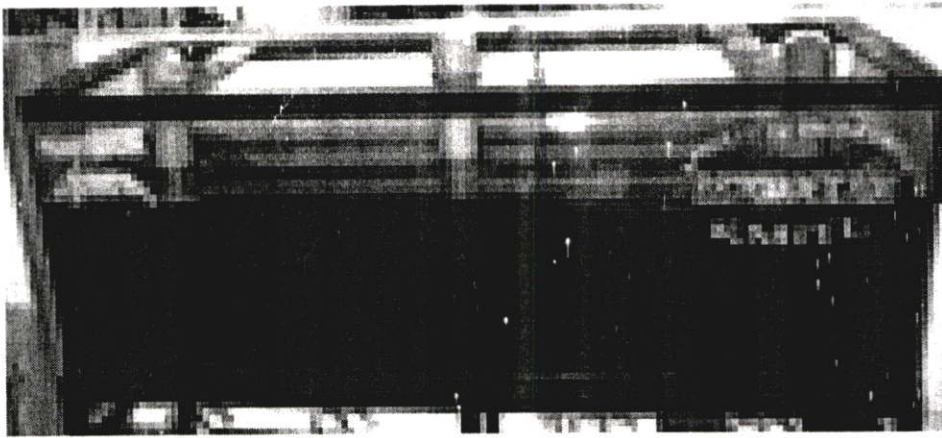


รูปที่ 5.9 อัตราการตกตะกอนของโปรตีนเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 5 นาที โดยคัด ที่น้ำหนักโปรตีน 2 mg./ น้ำ 100ml.และระดับแรงดัน 150 โวลต์

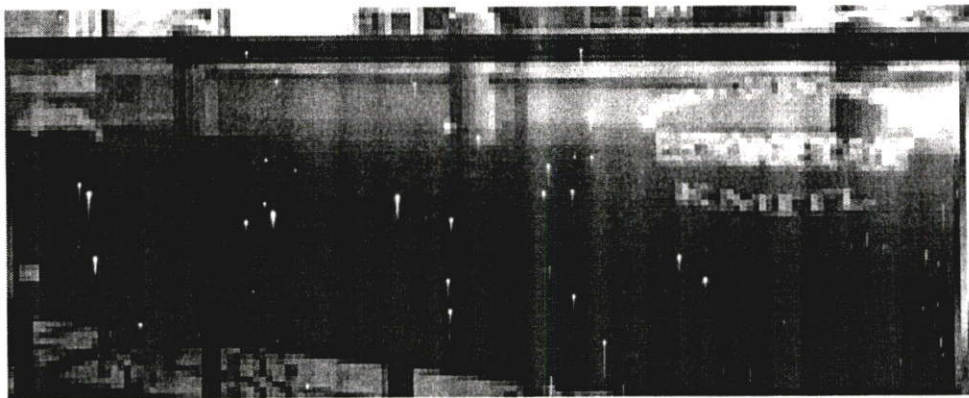
ขั้นตอนที่ 3 ได้นำเครื่องต้นแบบที่มีขนาดพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงขึ้น โดยมีสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 300 โวลต์ ถึง 1000 โวลต์ และมีการบรรจุน้ำเสียที่มีส่วนผสมเลือด 1 ต่อ น้ำ 100 ลิตร โดยกระบวนการทดสอบ 1 ชั่วโมงจะสามารถดูได้จากรูปที่ 5.10 ก-จ.



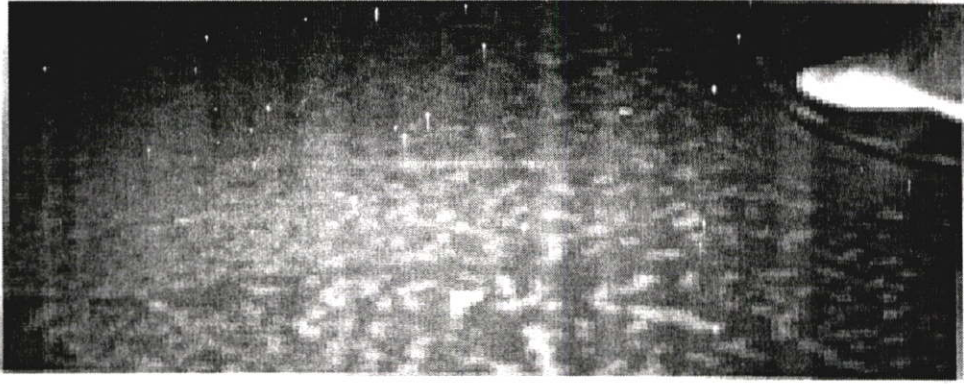
รูปที่ 5.10 ก. เป็นการวางตำแหน่งตัวจ่ายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการทดสอบในตู้ทดลอง



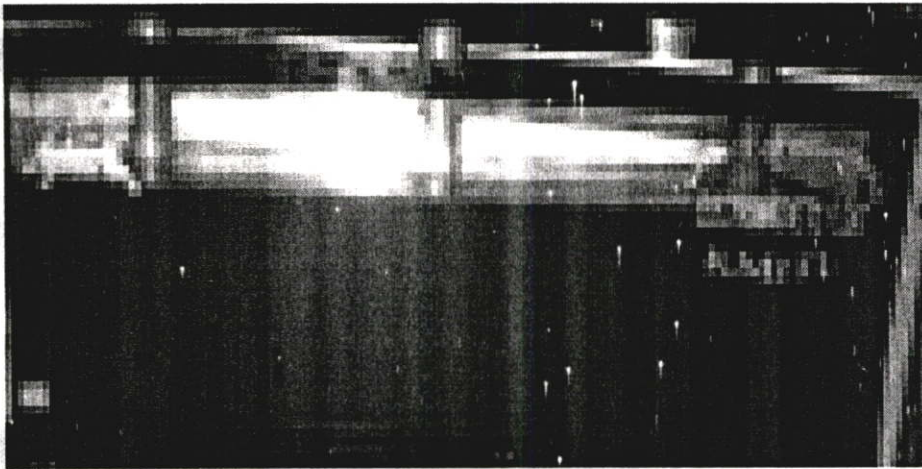
รูปที่ 5.10 ข. เป็นสภาพน้ำที่จำลองขึ้นมีเลือดสัตว์ 1 ลิตรต่อน้ำ 1,000 ลิตร



รูปที่ 5.10 ค. ใช้เวลา 20 นาที จะพบว่าโมเลกุลเลือดเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนพร้อมตกตะกอน



รูปที่ 5.10 ง. ใช้เวลา 30 นาทีจะสามารถมองเห็นชั้นไขมันและฟองก๊าซถูกแยกออกมาลอยเหนือ น้ำเป็นผลการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 5.10 จ. ใช้เวลา 1 ชั่วโมงจะพบว่าโมเลกุลของเลือดถูกแยกออกจากน้ำและตกตะกอนลงก้น บ่อและทำให้น้ำสะอาดขึ้น

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ข้อดี การนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM)มาช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกายภาพเพื่อหาค่าใช้ไฟฟ้าที่กระจายในน้ำในหลอดปิเปตสนามไฟฟ้าสถิตย์ จะช่วยให้การทำวิจัยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบที่ต้องการตรวจที่มีความเร็วในการแยกโปรตีนสูงดังรูปที่ 5.8 จะเป็นปริมาณอัลบูมินที่ต่ำมากอยู่ระหว่าง 2 ถึง 8 mg. งานวิจัยนี้อาจจะมีข้อดีต่อระบบงานตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ซึ่งการตรวจหาโปรตีนแบบธรรมดาทุกวิธีจะไม่สามารถตรวจพบได้ปัจจุบันทางการแพทย์จะใช้วิธีปริมาณวิเคราะห์หาค่าแต่กระบวนการจะซับซ้อนและใช้เวลานานเมื่อเปรียบเทียบกับหลอดปิเปตสนามไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้โมเลกุลโปรตีนรวมตัวอย่างรวดเร็วไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ดังรูปที่ 5.1 โดยใช้เวลาทั้งหมดไม่เกิน 5 นาที ที่ระดับแรงดันสูงสุด 150 โวลต์ ดีซี จากปริมาณอัลบูมินบริสุทธิ์ 2 mg./ น้ำ 100 ml. และการประยุกต์การนำไปใช้งานจริงทางอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ก็มีโอกาสเป็นไปได้ดังกล่าวไว้ขั้นตอนการทดลองที่ 2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

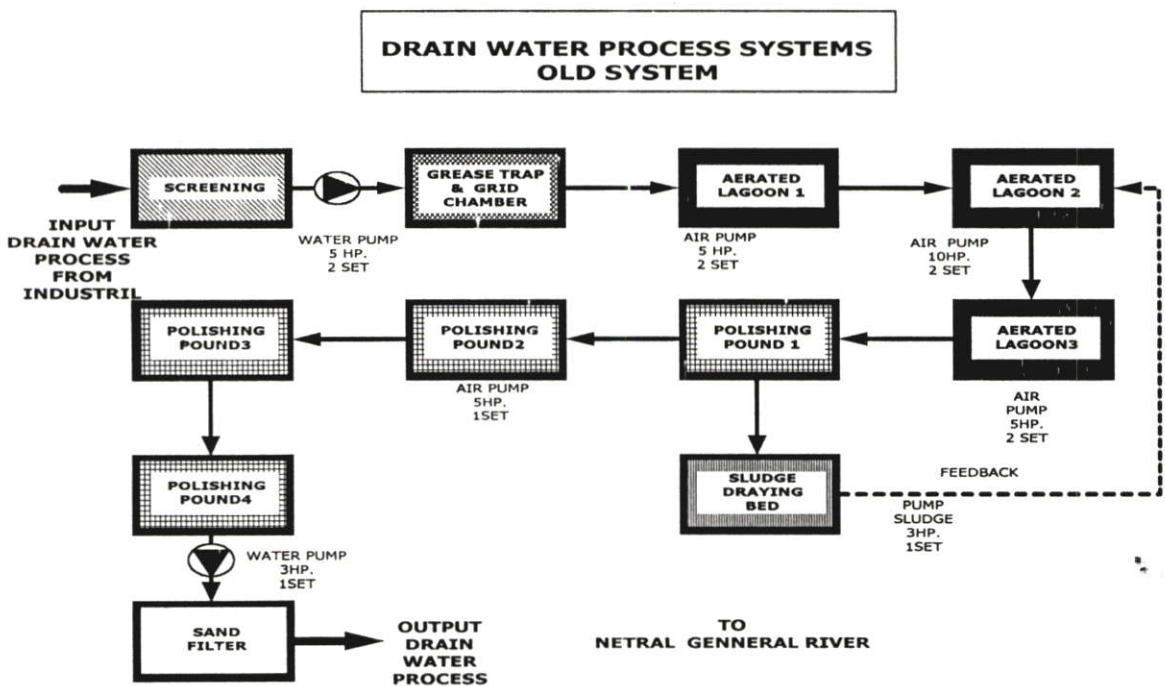
ข้อเสีย การกำหนดหรือเขียนโปรแกรมแบบภาษาฟอร์แทนจะเขียนยากและโหมดทางกราฟิกซ์ยังมีข้อจำกัดความยุ่งยากต่อการแก้ไขและการคำนวณจะช้ามากโดยเฉพาะการกำหนดเอลิเมนต์ และจุดเชื่อมต่อมากกว่า 500 โนดมาตรวจวัดปริมาณโปรตีนอัลบูมินจาก ที่สำคัญถ้าต้องการงานของไฟไนต์เอลิเมนต์เป็น 3 มิติจะต้องใช้ความละเอียดมากส่วนทางด้าน ตัวเครื่องต้นแบบจะมีข้อจำกัดอยู่ที่หลอดปิเปตสนามไฟฟ้าสถิตย์ ยังไม่คีนัก เป็นเพราะว่า หลังเวลาทำการแยกโปรตีนออกมาโปรตีนอัลบูมินจะขยายตัวเนื่องจากการสูญเสียเสถียรภาพของโปรตีนช่วงขณะจะมีลักษณะคล้ายสปริงที่ถูกยืดด้วยแรงทางสนามไฟฟ้า การที่จะวัดให้ถูกต้องโดยวิธีนี้ควรจะต้องทิ้งไว้สัก 2 นาทีจึงจะได้ค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นงานวิจัยนี้อาจจะเป็นแนวทางและจุดเริ่มต้นที่จะพัฒนาระบบการตรวจหาปริมาณอัลบูมินในปัสสาวะแบบใหม่โดยไม่ต้องใช้สารเคมีและผู้เชี่ยวชาญ

ส่วนการประยุกต์ที่จะนำไปใช้กับระบบที่ใหญ่ปัจจุบันนี้กำลังอยู่ในช่วงการดำเนินการเก็บข้อมูลวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดของความเหมาะสมกับแหล่งน้ำเสียเพราะว่าคุณสมบัติของน้ำจะมีความเข้มข้นของคุณสมบัติคอลลอยด์ต่างกันและหวังว่างานวิจัยนี้ถ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจะต้องมีคุณค่าต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

6.1 แนวทางพัฒนาต่อไป

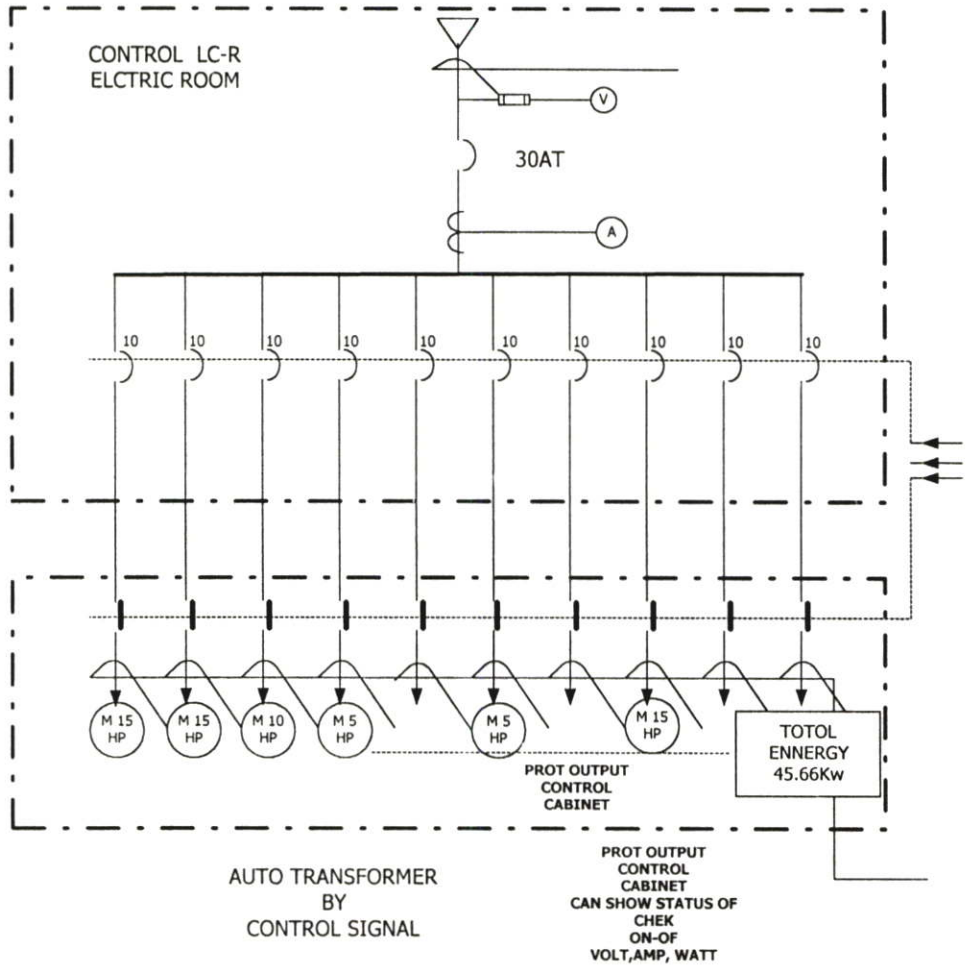
กรณีการศึกษาเครื่องแยกโมเลกุลของถังปฏิกริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 4 จุดเปรียบเทียบกับระบบที่นิยมใช้ในการแยกโมเลกุลโปรตีนเหล่านี้ออกจากน้ำเสียที่มีอยู่ในปัจจุบันคือระบบการใช้ชีวภาพโดยการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทางไฟฟ้าและอัตราการตกตะกอนในปริมาณน้ำเสียเท่ากัน โดยการเปรียบเทียบนี้เพียงแต่ประมาณการเท่านั้น โดยแบ่งเป็นกระบวนการทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ได้ทำการสำรวจระบบทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของบริษัทต้าหมิงเอนเตอร์ไพรส์

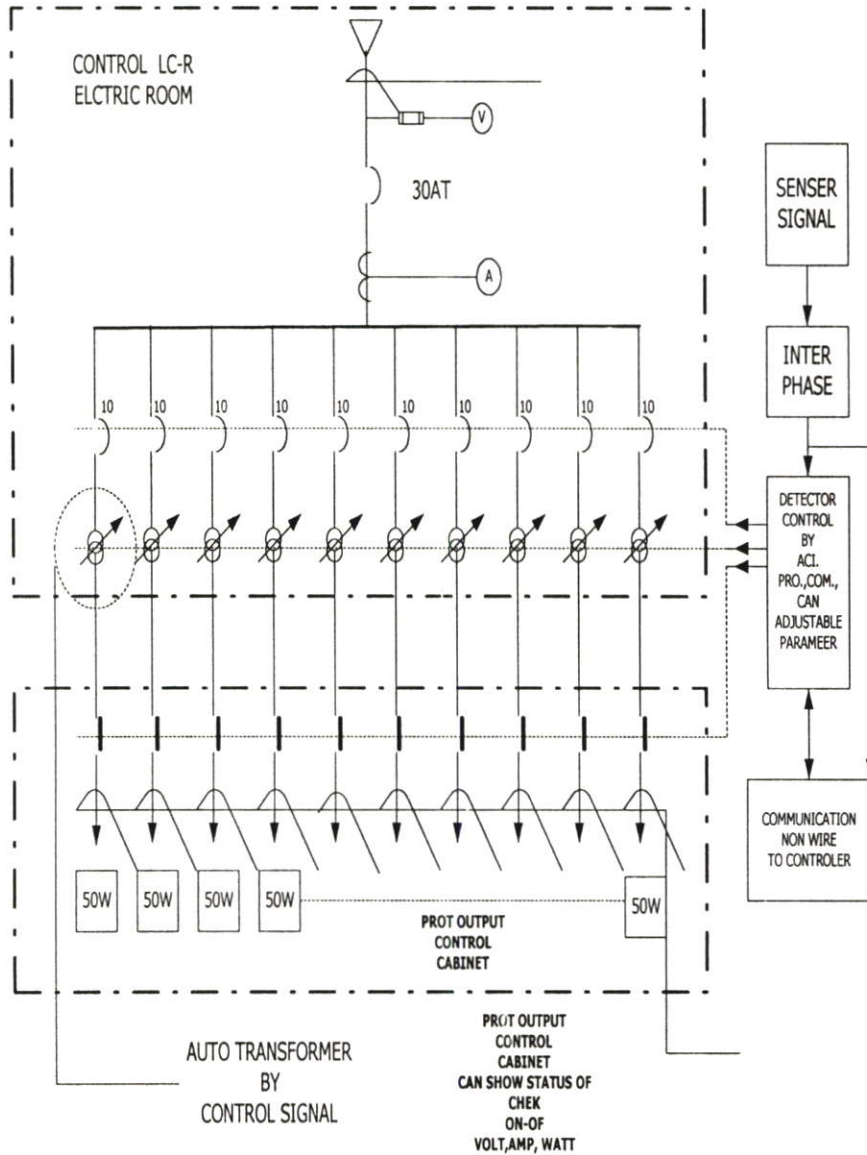
ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสำรวจการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดง Load Schedule ของระบบการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ

ซึ่งจะพบว่าการทำงานของระบบนี้จะต้อง ทำงานตลอด 24 ชม และพลังงานทั้งหมดจะอยู่ที่ 45.66 kw จากการสำรวจจะพบว่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่ำวันละ 5,000 หน่วย/วัน เมื่อคำนวณค่าไฟฟ้าแล้วจะต้องจ่ายค่าพลังงานเดือนละ 30,000 บาท

ขั้นตอนที่ 3 ทดลองวางระบบของถังปฏิบัติการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 4 จุดเปรียบเทียบ เฉพาะอัตราการใช้พลังงานในระบบของน้ำที่เท่ากันจะได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดง Load Schedule ของถังปฏิบัติการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการทดแทนการใช้มอเตอร์

LOAD SCHEDULE							
CKT NO.	DESCRIPTION	LOAD (VA)	CB AT	SIZE			DIAGRAM
				CONDUCTOR	TYPE	COUIT	
LP-R 1	REACTION ELECTROD 1	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 2	REACTION ELECTROD 2	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 3	REACTION ELECTROD 3	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 4	REACTION ELECTROD 4	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 5	REACTION ELECTROD 5	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 6	REACTION ELECTROD 6	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 7	REACTION ELECTROD 7	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 8	REACTION ELECTROD 8	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 9	REACTION ELECTROD 9	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
LP-R 10	REACTION ELECTROD 10	50	10	2.5 Sq.mm	VCT		
	TOTAL MAIN	500	30	4 Sq.mm	VCT		

ตารางที่ 6.4 แสดงตาราง Load Scedual ของระบบถึงปฏิกิริยาฯ

จากตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานกับรูปที่ 6.2 เมื่อกำหนดให้

$$(a) = \frac{\text{พลังงานจากระบบขีვეภาพ}}{\text{พลังงานจากถ้งปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า}} = \frac{45.66kw}{5kw} = 9.132$$

a = อัตราของพลังงาน

ดังนั้นค่าไฟฟ้าต่อเดือนของถ้งปฏิกิริยา=3,000/9.132 = 3,285 บาทต่อเดือน

% การใช้พลังงานลดลงจากระบบเดิม = 100-(3,285/3,000)x100=89.05%

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gerard J. Torfora, Bergen Community College., Berdell R. Funke, North Dakota State University., Christine L. Case, Skyline College., Microbiology anintroduction, 1995.
- [2] Nason, "a texbook of modern biology", John wiley, New York.
- [3] Plonus, m. a., "Applied electromagnetics", McGraw Hill Inc., 1974.
- [4] William H. Hayt, jr. "Engineering electromagnetics".
- [5] C.U.M. Smith, "Elements of Molecular Neurobiology", John Wiley & Sons Ltd., 2nd ed., England, 1996.
- [6] Duncan J. Show, "Introduction to colloid and Surfaces Chemistry", Butterworth-Heinemann Ltd.,4th ed., Liverpool, 1991.
- [7] Jaakko Malmivuo and Robert Plonsey, "Bioelectromagnetism", Oxford University Press, Findland, North Carolina, 1995.
- [8] Nathan Ida, Joao P.A. Batos, "Electromagnetic and Calculation of Fields", Springer-Verlag New York,Inc., U.S.A., 1997.
- [9] Matthew N.O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, Inc., Florida, 1992.
- [10] Nathan Ida, "Numerical Modeling for Electromagnetic Non-Destructive Evaluation", Chapman & Hall, Inc., Ohio, 1995.
- [11] "The study of the Recycling of Draining Water from Evaporator of the Split Type Air Conditioners using Reaction Tank to hold back a Germ with Electromagnetic Field" RCETE Chiang mai ,(1-2 Dec 2000) ,pag 484-488
- [12] คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ อุดมชัย จินะดิษฐ์ อิศราวุธ สีदान "การตกตะกอนโปรตีนในน้ำเสียโดยใช้วงจรทวีแรงดันแบบครึ่งคลื่น" ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2539 หน้า CT-109 ถึง CT-113
- [13] คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ ณรงค์ เหมกรณ์ มลทล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ "วิธีการนำโปรตีนจากเศษอาหารชนิดสดที่ตกค้างในนาุ้งกลับมาใช้ใหม่ด้วยหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า" ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540 หน้า 633-637
- [14] คุณฤดี นวมเสวตร คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ ณรงค์ เหมกรณ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ "การพัฒนาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใ้สามารถยับยั้งเชื้อโรคชะลอการเน่าสลายใ้ละน้ำกลับ

โปรตีนชนิดสาคที่ตกค้างในน้ำเสียได้” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2541 หน้า 319-323

- [15] คมเพชร ปีก้าวงษ์สังข์ คุณฤดี นวมเสวตร สุทธิชัย นพนาตีพงษ์ นवलพรรณ ณ ระนอง ณรงค์ เหมกรณ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ “การบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์และนำกลับสารตกค้างกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีตกตะกอนเร็วของทุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า” ประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ในสหัฐวรรษใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2543 หน้า EE-COM 1.77-EE-COM 1.82
- [16] คมเพชร ปีก้าวงษ์สังข์ คุณฤดี นวมเสวตร สุทธิชัย นพนาตีพงษ์ นवलพรรณ ณ ระนอง ณรงค์ เหมกรณ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ “การแยกอัลบูมินแนวใหม่เพื่องานตรวจวินิจฉัยโรคจากปัสสาวะแบบอิเล็กทรอนิกส์สวิตติ่งแหวน” ประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ในสหัฐวรรษใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2543 หน้า EE-COM 1.83-EE-COM 1.89
- [17] ปราโมทย์ เคะชะอำไพ ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. “การตกตะกอนโปรตีนในน้ำเสียโดยใช้วงจรวีแรงดันแบบครึ่งคลื่น” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2539 หน้า CT-109 ถึง CT-113
2. “วิธีการนำโปรตีนจากเศษอาหารชนิดสดที่ตกค้างในนาุ้งกลับมาใช้ใหม่ด้วยท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540 หน้า 633-637
3. “การพัฒนาท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถยับยั้งเชื้อโรคชะลอการเน่าสลายไล่นากลับโปรตีนชนิดสดที่ตกค้างในน้ำเสียได้” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 2541 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2541 หน้า 319-323
4. “ การบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์และนากลับสารตกค้างกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีตกตะกอนเร็วของท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า” ประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ในสหัฐวรรษใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2543 หน้า EE-COM 1.77-EE-COM 1.82
5. “การแยกอัลบูมินแนวใหม่เพื่องานตรวจวินิจฉัยโรคจากปัสสาวะแบบอิเล็กทรอนิกส์วงแหวน” ประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ในสหัฐวรรษใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2543 หน้า EE-COM 1.83-EE-COM 1.89
6. “การศึกษาและออกแบบระบบท่อนลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์วงแหวนคู่ขนาน 4 จุดนำกลับสารตกค้างจากน้ำเสียของโรงงานฆ่าสัตว์กลับมาใช้ใหม่” การประชุมวิชาการประจำปีระดับชาติครั้งที่ 12 สวสท. (11-12 พฤษภาคม 2543) หน้า 55-64
7. “The study of the Recycling of Draining Water from Evaporator of the Split Type Air Conditioners using Reaction Tank to hold back a Germ with Electromagnetic Field” RCETE Chiang mai, (1-2 Dec 2000) pag484-488

ภาคผนวก ข.

โปรแกรม ช่วยในการคำนวณการออกแบบ

```

!*****
! FINITE ELEMENT SOLUTION OF POISSON'S EQUATION FOR
! TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS
! TRIANGULAR ELEMENTS ARE USED
!
!
! THE UNKNOWN POTENTIALS ARE OBTAINED USING
! ITERATION METHOD
!
! ND=NO. OF NODES
! NE=NO. OF ELEMENTS
! NP=NO. OF FIXED NODE (WHERE POTENTIAL IS PRESCRIBED)
! NDP(I) =NODE NO. OF PRESCRIBED POTENTIAL, I = 1,2...NP
! VAL(I) =VALUE OF PRESCRIBED POTENTIAL AT NODE NDP(I)
! NL(I,J)=LIST OF NODES FOR EACH ELEMENT I, WHERE
! LF(I) = LIST OF FREE NODES I = 1,2,...,NF=ND-NP
! J = 1, 2, 3 IS LOCAL NODE NUMBER
! CE(I,J) = ELEMENT COEFFICIENT MATRIX
! ER(I) = VALUE OF THE RELATIVE PERMITTIVITY FOR ELEMENT I
! C(I,J)= GLOBAL COEFFICIENT MATRIX
! X(I), Y(I) = GLOBAL COORDINATES OF NODE I
! XL(I),YL(J) =LOCAL COORDINATES OF NODE J= 1,2,3
! V(I) = POTENTIAL AT NODE I
! MATRICES P(I) AND Q(I) ARE DEFINED IN EQ.(6.1.1)
!*****

```

DIMENSION X(2000), Y(2000), C(2000,2000),CE(2000,2000)

```

DIMENSION NL(2000,3000), NDP(2000), VAL(2000), LF(2000)
DIMENSION V(2000),P(3000),Q(3000),XL(3000),YL(3000),ER(2000),EX(2000),EY
(2000),EM(2000)

```

```

CHARACTER*20 F

```

```

!*****
!
!           FRIST STEP - INPUT DATA DEFINING GEOMETRY AND
!*****
!
!           BOUNDARY CONDITIONS
! *****

```

```

WRITE(*,15) ' Please enter data filename : '

```

```

15 FORMAT(A)

```

```

READ(*,*) F

```

```

NI= 50 ! NO. OF INTERATIONS

```

```

OPEN(UNIT=1,FILE=F, STATUS='OLD')

```

```

READ(1,*) NE ,ND ,NP

```

```

READ(1,*) ((NL(I,J), J=1,3),I=1,NE)

```

```

READ(1,*) (X(I), Y(I), I=1,ND )

```

```

READ(1,*) (NDP(I), VAL(I), I=1,NP)

```

```

CLOSE(UNIT=1)

```

```

PIE=4.0*ATAN(1.0)

```

```

EO=1.0E-9/(36*PIE)

```

```

DO 10 I=1,NE

```

```

ER(I)=5.0

```

```

10 CONTINUE

```

```

! *****
!
! SECOND STEP - EVALUATE COEFFICIENT MATRIX FOR EACH
!
!           ELEMENT AND ASSEMBLE GLOBALLY

```

```

! *****
DO 20 M=1, ND
    DO 20 N=1, ND
        C(M,N) = 0.0
20 CONTINUE
DO 70 I=1, NE
! FIND LOCAL COODINATES XL(J), YL(J) FOR ELEMENT I
DO 30 J=1,3
    K= NL(I,J)
    XL(J)= X(K)
    YL(J)= Y(K)
30 CONTINUE
P(1)=YL(2)-YL(3)
P(2)=YL(3)-YL(1)
P(3)=YL(1)-YL(2)
Q(1)=XL(3)-XL(2)
Q(2)=XL(1)-XL(3)
Q(3)=XL(2)-XL(1)
!
    AREA=0.5*ABS(P(2)*Q(3)-Q(2)*P(3))
! DETERMINE COEFFICIENT MATRIX FOR ELEMENT I
DO 40 M=1,3
    DO 40 N=1,3
        CE(M,N)=ER(I)*( P(M)*P(N)+Q(M)*Q(N) )/(4.0*AREA)
40 CONTINUE
! ASSEMBLE GLOBALLY - FIND C(I,J)
DO 60 J=1,3
    IR = NL(I,J)

```

```

DO 50 L=1,3
IC = NL(I,L)
C(IR,IC)=C(IR,IC)+CE(J,L)
50 CONTINUE
60 CONTINUE
70 CONTINUE
! *****
!  THIRD STEP - SOLVE THE RESULTING SYSTEM
!      ITERATIVELY
! *****
!  INTIALIZE AND DETERMINE LF(I)-LIST OF FREE NODES I
! *****
NF=0
DO 120 I=1,ND
V(I)=0.0
DO 110 K=1,NP ! CHECK IF NODE I IS A PRESCRIBED NODE
IF(I.EQ.NDP(K)) THEN
V(I)=VAL(K)
PRINT *,i,v(i)
GOTO 120
ENDIF
110 CONTINUE
NF=NF+1
LF(NF)=I ! IF I IS NOT A PRESCRIBED NODE, IT IS FREE
120 CONTINUE
PRINT*, NF ,ND-NP,'CHECK IF THESE ARE EQUAL'
!
!  NOW, APPLY ITERATIVE METHOD
DO 150 N=1,NI
DO 140 I= 1,NF
SUM=0.0

```

```

K=LF(I)
DO 130 J=1,ND
  IF(J.EQ.K) GOTO 130
SUM = SUM+V(J)*C(J,K)
V(K) = -SUM/C(K,K) ! APPIES ONLY TO FREE NODES
EX=0.0
EY=0.0
EM=0.0
EX=-((P(1)*V(1)+P(2)*V(2)+P(3)*V(3))/2*AREA)

EY=-((Q(1)*V(1)+Q(2)*V(2)+Q(3)*V(3))/2*AREA)
EM=SQRT(EX*EX+EY*EY)

130 CONTINUE

140 CONTINUE
150 CONTINUE

!*****
!      FOURTH STEP - FINALLY OUTPUT THE RESULTS
!
!*****

WRITE(*,155) ' Please enter data filename : '
155 FORMAT(A)
READ(*,*) F
OPEN(UNIT=1, FILE=F,STATUS='NEW')
nvar=1
WRITE(1,610) ND,NE,NVAR
610 FORMAT(' ND NE NVAR',/,3I8)
WRITE(1,620) ND
620 FORMAT(' NODAL COORDINATES & SOLUTIONS [',I5,'] :')

```

```

DO 630 I=1,ND
WRITE(1,640) I, X(I), Y(I), EY(I)
640 FORMAT(18, 3E12.5)

630 CONTINUE
WRITE(1,650) NE
650 FORMAT(' ELEMENT NODAL CONNECTIONS [', I5, ' ] :')
DO 660 IE=1,NE
WRITE(1,670) IE, (NL(IE,J), J=1,3)
670 FORMAT(4I8)
660 CONTINUE
DO 160 I=1,ND
WRITE(6,*)I, X(I),Y(I),EM(I)

160 CONTINUE
170 FORMAT(2X, 'NO. OF NODES=',I3,2X,'NO. OF ELEMENTS =', I3,2X,'NO. OF FIXED
NODES=',I3,/)
!DO 180 I=1,ND
!WRITE(6,*)I, X(I),Y(I),EM(I)

!180 CONTINUE
!101 FORMAT('ELEMENT-',I3,'EX=',3E10.4,'EY=',3E10.4,'EM=',F10.2)

CLOSE(UNIT=1)
STOP
END

```

```

!*****
! THIS PROGRAM PERFORMS A MESH GENERATION OF AN
! ARBITRARY SOLUTION DOMAIN USING A SYSTEMATIC
! APPROACH. A FEW POINTS OF THE REGION.
! THE GENERAL CONFIGURATION OF THE REGION.
! THEN THE PROGRAM AUTOMATICALLY GENERATES
! TRIANGULAR OR QUADRILATERAL ELEMENTS
!*****

```

```

IMPLICIT INTEGER(I-N)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON /MESH1/COORD(2500,2),NL(2500,8),MATNO(2500), SHAPE
(9),NP,NELEM,NTYPE,NDIME,MNODE

```

```

! THIS SUBROUTINE ACCEPTS DATA DEFINING THE SOLUTION REGION
CALL INPUT
! THIS SUBROUTINE UNDERTAKES THE MESH SUBDIVISION
CALL GENERATE
! THIS SUBROUTINE SUBDIVIDES INTO TRIANGULAR ELEMENTS
IF(NTYPE.EQ.3)CALL TRIANGLE
! THIS SUBROUTINE OUTPUTS THE GENERATED MESH
! THE SUBROUTINE DOES NOT NEED TO BE CALLED IF A PLOTTING
! SUBROUTINE USED IN DISPLAYING THE OUTPUT
CALL OUTPUT
STOP
END

```

```

!*****

```

```

! THIS SUBROUTINE ACCEPTS THE DATA WHICH DEFINES THE
! SOLUTION REGION OUTLINE AND THE MATERIAL ZONES
! NP = NUMBER OF COORDINATE POINTS DEFINING THE
! SOLUTION REGION
! NELEM = NUMBER OF BLOCKS OR ZONES
! NTYPE = THE TYPE OF ELEMENT INTO WHICH THE
! STRUCTURE IS TO BE SUBDIVIDED
! NDIME = THE NUMBER OF COORDINATE DIMENSIONS
!     FOR A PLANE NDIME=2
! NUMEL = BLOCK NUMBER
! ( NL(NUMEL,INODE),INODE=1,NTYPE) )=THE
! BLOCK TOPOLOGY DEFINITION
! MATNO(NUMEL)THE MATERIAL IDENTIFICATION NUMBER:
! INPUT SPECIFICATION FOR EACH BLOCK
! JPOIN = POINT NUMBER
! (COORD(JPOI,IDIME),IDIME=1,NDIME)=X&Y COORDINATES
!*****

```

SUBROUTINE INPUT

```

COMMON /MESH1/COORD(2500,2),NL(2500,8),MATNO(2500),SHAPE
(9),NP,NELEM,NTYPE,NDIME,MNODE
DATA LNODE/ 8/

```

```

CHARACTER*20 FILENAME

```

```

WRITE(*,15) 'please enter data filename:'

```

```

15 FORMAT(A)

```

```

READ(*,'(A)') FILENAME

```

```

OPEN(UNIT=1,FILE=FILENAME,STATUS='OLD')

```

```

READ(1,*) NP,NELEM,NTYPE,NDIME

```

```

DO 10 IELEM=1,NELEM
  READ(1,*) NUMEL,(NL(NUMEL,I), I=1,LNODE),MATNO(NUMEL)

10 CONTINUE
  DO 20 IPOIN=1,NP
    READ(1,*) JPOIN, (COORD(JPOIN,I),I=1,NDIME)
20 CONTINUE

      CLOSE(UNIT=1)

      RETURN

      END

!*****
! THIS SUBROUTINE UNDERTAKES THE SUBDIVISION OF EACH
! BLOCK AND ELIMINATES COMMON NODES ALONG BLOCK INTERFACES
! KBLOC = BLOCK NUMBER
! NDIVX/NDIVY = NUMBER OF ELEMENTS IN THE ZETA/ETA
! DIRECTION INTO WHICH THE BLOCK IS TO BE SUBDIVIDED
! WEITX(IDIVX) AND WEITY = WEIGHTING FACTORS
!*****

  SUBROUTINE GENERATE
    DIMENSION      WEITX(40),WEITY(40),TCORD(81,2),TNODS(50,8),TMATO
(50),LREPN(350),LASOC(350),LFINN(350),LFASC(350)
    COMMON/MESH1/COORD(2500,2),NL(2500,8),MATNO(2500),SHAPE
(9),NP,NELEM,NTYPE,NDIME,MNODE
    DATA MREPN/350/,MPOIN/1500/,LNODE/ 8/
    CHARACTER*20 FILENAME
!
!INITIALIZATION SECTION
!
```

```

DO 10 IREP=1,MREP
10 LREP(IREP)=0
   NPONT=NP
      NBLOC=NELEM
      NP=0
      NELEM=0
      MNODE=4
      IF(NTYPE.EQ.8)MNODE=8
      KNODE=MNODE/4
      FNODE=KNODE
      DO 20 IPONT=1,NPONT
         DO 20 IDIME=1,NDIME
20   TCORD(IPONT,IDIME)=COORD(IPONT,IDIME)
      DO 30 IPOIN=1,MPOIN
         DO 30 IDIME=1,NDIME
30   COORD(IPOIN,IDIME)=0.0
      DO 40 IBLOC=1,NBLOC
         TMATO(IBLOC)=MATNO(IBLOC)
         DO 40 INODE=1,LNODE
40   TNODS(IBLOC,INODE)=NL(IBLOC,INODE)
!
! READ AND WRITE BLOCK SUBDIVISION DATA
!
   WRITE(*,15) 'please enter data filename:'
15  FORMAT(A\
      READ(*,'(A)') FILENAME
         OPEN(UNIT=1,FILE=FILENAME,STATUS='OLD')

DO 170 IBLOC=1,NBLOC
      READ(1,*) KBLOC,NDIVX,NDIVY
      READ(1,*) ( WEITX(IDIVX) , IDIVX=1,NDIVX )

```

```

      READ(1,*) ( WEITY(IDIVY) , IDIVY=1,NDIVY )
!
! DIVIDE EACH BLOCK INTO ELEMENTS
!
      TOTAL=0.0
      DO 50 IDIVX=1,NDIVX
      IF(WEITX(IDIVX).EQ.0.0)WEITX(IDIVX)=1.0
50 TOTAL=TOTAL+WEITX(IDIVX)
      XNORM=2.0/TOTAL
      TOTAL=0.0
      DO 60 IDIVY=1,NDIVY
      IF(WEITY(IDIVY).EQ.0.0) WEITY(IDIVY)=1.0
60 TOTAL=TOTAL+WEITY(IDIVY)
      YNORM=2.0/TOTAL
      NXTWO=NDIVX*KNODE+1
      NYTWO=NDIVY*KNODE+1
      IASEY=0
      ETASP=-1.0
      KWETY=0
      DO 160 IYTWO=1,NYTWO
      IASEY=IASEY+1
      IF(NTYPE.NE.8.AND.IASEY.EQ.3)IASEY=2
      IF(NTYPE.EQ.8.AND.IASEY.EQ.4)IASEY=2
      IASEX=0
      EXISP=-1.0
      KWETX=0
      DO 130 IXTWO=1,NXTWO
      IASEX=IASEX+1
      IF(NTYPE.NE.8.AND.IASEX.EQ.3)IASEX=2
      IF(NTYPE.EQ.8.AND.IASEX.EQ.4)IASEX=2
      NP=NP+1

```

```
CALL SHAPEF (EXISP,ETASP)
DO 70 INODE=1,LNODE
JTEMP=TNODS(IBLOC,INODE)
DO 70 IDIME=1,NDIME
70 COORD(NP,IDIME)=COORD(NP,IDIME) + SHAPE(INODE)*TCORD(JTEMP,IDIME)
GO TO (80,90) KNODE
80 IF(IASEX.NE.2.OR.IASEY.NE.2) GO TO 100
NELEM=NELEM+1
JPOIN=NP-NXTWO
NL(NELEM,1)=JPOIN-1
NL(NELEM,2)=JPOIN
NL(NELEM,3)=NP
NL(NELEM,4)=NP-1
MATNO(NELEM)=TMATO(IBLOC)
90 IF(IASEX.NE.3.OR.IASEY.NE.3) GO TO 100
NELEM=NELEM+1
IPOIN=NP-IXTWO-NDIVX+(IXTWO-1)/2
JPOIN=NP-NXTWO-NDIVX-1
NL(NELEM,1)=JPOIN-2
NL(NELEM,2)=JPOIN-1
NL(NELEM,3)=JPOIN
NL(NELEM,4)=IPOIN
NL(NELEM,5)=NP
NL(NELEM,6)=NP-1
NL(NELEM,7)=NP-2
NL(NELEM,8)=IPOIN-1
MATNO(NELEM)=TMATO(IBLOC)
100 CONTINUE
GO TO (110,120),KNODE
110 KWETX = KWETX+1
GO TO 130
```

```

120 IF(KONTX.LT.0) KWETX=KWETX + 1
      KONTX=KONTX*(-1)
130 EXISP=EXISP+XNORM*WEITX(KWETX)/FNODE
      GO TO (140,150),KNODE
140 KWETY=KWETY+1
      GO TO 160
150 IF(KONTY.LT.0) KWETY=KWETY+1
      KONTY=KONTY*(-1)
160 ETASP=ETASP+YNORM*WEITY(KWETY)/FNODE
170 CONTINUE
      CLOSE(UNIT=1)
!*****
!           ELIMINATE REPEATED NODE AT BLOCK INTERFACES
!*****

      NREPN=0
      DO 210 IPOIN=1,NP
        IF(NREPN.EQ.0) GO TO 190
        DO 180 IREPN=1,NREPN
          IF(IPOIN.EQ.LREPN(IREPN)) GO TO 210
180 CONTINUE
190 CONTINUE
      LPOIN=IPOIN+1
      DO 200 JPONT=LPOIN,NP
        TOTAL=ABS(COORD(IPOIN,1)-COORD(JPONT,1))+ABS(COORD(IPOIN,2)-
COORD(JPONT,2))
        IF(TOTAL.GT.0.00001) GO TO 200
        NREPN=NREPN+1
        LREPN(NREPN)=JPONT
        LASOC(NREPN)=IPOIN
200 CONTINUE

```

210 CONTINUE

IF(NREPN.EQ.0) GO TO 360

INDEX=0

DO 240 IPOIN=1,NP

DO 220 IREPN=1,NREPN

IF(LREPN(IREPN).EQ.IPOIN) GO TO 230

220 CONTINUE

GO TO 240

230 INDEX=INDEX+1

LFINN(INDEX)=LREPN(IREPN)

LFASC(INDEX)=LASOC(IREPN)

240 CONTINUE

DO 250 IREPN=1,NREPN

LREPN(IREPN)=LFINN(IREPN)

250 LASOC(IREPN)=LFASC(IREPN)

DO 260 IREPN=1,NREPN

DO 260 IELEM=1,NELEM

DO 260 INODE=1,MNODE

IF(NL(IELEM,INODE).EQ.LREPN(IREPN)) NL(IELEM,INODE)=LASOC

(IREPN)

260 CONTINUE

DO 310 IPOIN=1,NP

DO 270 IREPN=1,NREPN

IF(IPOIN.EQ.LREPN(IREPN)) GO TO 310

270 CONTINUE

IF(IPOIN.LT.LREPN(1)) GO TO 310

IDIFF=IPOIN-NREPN

IF(IPOIN.GT.LREPN(NREPN)) GO TO 290

DO 280 IREPN=1,NREPN

KREPN=NREPN-IREPN+1

280 IF(IPOIN.LT.LREPN(KREPN))IDIFF=IPOIN-KREPN+1

```

290 DO 300 IDIME=1,NDIME
300 COORD(IDIFF,IDIME)=COORD(IPOIN,IDIME)
310 CONTINUE
    DO 350 IELEM=1,NELEM
        DO 350 INODE=1,MNODE
            NPOSI=NL(IELEM,INODE)
            DO 320 IREP=1,NREP
                IF(NPOSI.EQ.LREP(IREP)) GO TO 350
320 CONTINUE
                IF(NPOSI.LT.LREP(1)) GO TO 350
                    IDIFF=NPOSI-NREP
                    IF(NPOSI.GT.LREP(NREP)) GO TO 340
                    DO 330 IREP=1,NREP
                        KREP=NREP-IREP+1
330 IF(NPOSI.LT.LREP(KREP))IDIFF=NPOSI-KREP+1
340 NL(IELEM,INODE)=IDIFF
350 CONTINUE
360 CONTINUE
    NP=NP-NREP
    RETURN
    END

```

```
!*****
```

```
!THIS SUBROUTINE EVALUATES THE SHAPE FUNCTIONS
```

```
!*****
```

```
SUBROUTINE SHAPE(S,T)
```

```
COMMON/MESH1/COORD(2500,2),NL(2500,8),MATNO(2500),SHAPE
```

```
(9),NP,NELEM,NTYPE,NDIME,MNODE
```

```
SHAPE(1)=0.25*(1.0-S)*(1.0-T)*(-S-T-1.0)
```

```
SHAPE(2)=0.5*(1.0-S*S)*(1.0-T)
```

```

SHAPE(3)=0.25*(1.0+S)*(1.0-T)*(S-T-1.0)
SHAPE(4)=0.5*(1.0-T*T)*(1.0+S)
SHAPE(5)=0.25*(1.0+S)*(1.0+T)*(S+T-1.0)
SHAPE(6)=0.5*(1.0-S*S)*(1.0+T)
SHAPE(7)=0.25*(1.0-S)*(1.0+T)*(-S+T-1.0)
SHAPE(8)=0.5*(1.0-T*T)*(1.0-S)
RETURN
END

```

```

!*****
! THIS SUBROUTINE SUBDIVIDES EACH 4-NODED
! QUADRILATERAL ELEMENT INTO TWO TRIANGULAR
! ELEMENTS:THE SUBDIVISION IS DONE ACROSS THE
! SHORTER DIAGONAL
!*****

```

```

SUBROUTINE TRIANGLE
  DIMENSION CORDE(4,2),LTEMP(4)
  COMMON/MESH1/   COORD(2500,2),NL(2500,8),MATNO(2500),SHAPE
(9),NP,NELEM,NTYPE,NDIME,MNODE

  KOUNT=0

  DO 10 IELEM=1,NELEM
    NOTAL=NELEM+IELEM
    MATNO(NOTAL)=MATNO(IELEM)
    DO 10 INODE=1,MNODE

10  NL(NOTAL,INODE)=NL(IELEM,INODE)

  DO 40 IELEM=1,NELEM
    NOTAL=NELEM+IELEM
    DO 20 INODE=1,MNODE
      INDEX=NL(NOTAL,INODE)

```

```

      LTEMP(INODE)=INDEX
      DO 20 IDIME=1,NDIME
20  CORDE(INODE,IDIME)=COORD(INDEX,IDIME)
      DIAG1 =SQRT((CORDE(1,1)-CORDE(3,1))**2 + (CORDE(1,2)-CORDE(3,2))**2)
      DIAG2 =SQRT((CORDE(2,1)-CORDE(4,1))**2 + (CORDE(2,2)-CORDE(4,2))**2)
!*****
! DIVIDE ACROSS THE SHORTER DIAGONAL
!*****

      DIFER=DIAG1-DIAG2
      IF(DIFER.GT.1.0E-9) GO TO 30
      KOUNT=KOUNT+1
      NL(KOUNT,1)=LTEMP(1)
      NL(KOUNT,2)=LTEMP(2)
      NL(KOUNT,3)=LTEMP(3)
      MATNO(KOUNT)=MATNO(NOTAL)
      KOUNT=KOUNT+1
      NL(KOUNT,1)=LTEMP(1)
      NL(KOUNT,2)=LTEMP(3)
      NL(KOUNT,3)=LTEMP(4)
      MATNO(KOUNT)=MATNO(NOTAL)
      GO TO 40
30  KOUNT=KOUNT+1
      NL(KOUNT,1)=LTEMP(1)
      NL(KOUNT,2)=LTEMP(2)
      NL(KOUNT,3)=LTEMP(4)
      MATNO(KOUNT)=MATNO(NOTAL)
      KOUNT=KOUNT+1
      NL(KOUNT,1)=LTEMP(2)
      NL(KOUNT,2)=LTEMP(3)
      NL(KOUNT,3)=LTEMP(4)
      MATNO(KOUNT)=MATNO(NOTAL)

```

40 CONTINUE

NELEM=2*NELEM

RETURN

END

```
!*****
! THIS SUBROUTINE OUTPUTS THE COORDINATES AND
! ELEMENT TOPOLOGIES OF THE GENERATED MESH
!*****
```

SUBROUTINE OUTPUT

```
COMMON /MESH1/ COORD(2500,2),NL(2500,8),MATNO(2500),SHAPE
(9),NP,NELEM,NTYPE,NDIME ,MNODE
CHARACTER*20 FILENAME
```

WRITE(*,15) 'please enter data filename:'

15 FORMAT(A\)

READ(*,'(A)') FILENAME

OPEN(UNIT=1,FILE=FILENAME,STATUS='NEW')

NVAR=1

WRITE(1,610) NP ,NELEM ,NVAR !TOTAL NO.OF POINTS

610 FORMAT(' NP NELEM NVAR NF ',/3I8)

! WRITE(1,620) NP

620 FORMAT(' NOAD COORDINATES & SOLUTIONS [',I5,'] :')

DO 630 IPOIN=1,NP

WRITE(1,640) IPOIN,(COORD(IPOIN,I),I=1,NDIME)

640 FORMAT(I8, 3E12.5)

630 CONTINUE

WRITE(1,650) NELEM !TOTAL NO OF ELEMENTS

650 FORMAT(' ELEMENT NODAL CONNECTIONS [', I5, ''] :')

```

DO 660 IELEM=1,NELEM
    WRITE(1,670) IELEM, (NL(IELEM,I), I=1,NTYPE) !, MATNO(IELEM)
670 FORMAT(4I8)
660 CONTINUE

```

```
CLOSE(UNIT=1)
```

```
STOP
```

```
END
```

ส่วนกราฟฟิกซ์ของไฟในเอลิเมนต์แบบ 2-DIMENSION

```

!*****
! PROGRAM FEPLLOT 2-DIMENSION OF FINITE ELEMENT MODELS
!
!           Mr. KOMPHEP      PACKAMWONGSANG
!           FACULTY OF ENGINEERING
!           KING MONG KUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY
!           LA DKRABANG
!*****
USE MSFLIB
!*****
! SET MAXIMUM NUMBERS OF NODES AND ELEMENTS:
!*****
PARAMETER (MXPOI=300, MXELE=500)
DIMENSION XY(2,MXPOI), SOL(3,MXPOI), TEXT(20)
DIMENSION INTMAT(3,MXELE), ISIDE(2,3*MXELE)
DIMENSION LA(MXPOI), LB(MXPOI), LC(3*MXELE)
CHARACTER*25 NAME
!*****

```

```

INTEGER*2 DUMMY
RECORD/VIDEOCONFIG/SCREEN
CALL GETVIDEOCONFIG(SCREEN)
      DUMMY = SETVIDEOMODE($VRES256COLOR)

```

```
!*****
```

```

      open(UNIT = 12,FILE = USER',TITLE = ' produc matrix')
10 WRITE(12,15)
15 FORMAT(/, ' PLEASE ENTER THE INPUT FILE NAME: ')
      READ(12,'(A)',ERR=10) NAME
      OPEN(UNIT=1, FILE=NAME, STATUS='OLD', ERR=10)

```

```
!*****
```

```

      READ(1,20) TEXT
20 FORMAT(20A4)
      READ(1,*) NPOIN, NELEM, NVAR
      IF(NPOIN.GT.MXPOI) WRITE(6,30) NPOIN
30 FORMAT(' PLEASE INCREASE MXPOI TO', I6)
      IF(NPOIN.GT.MXPOI) STOP
      IF(NELEM.GT.MXELE) WRITE(6,35) NELEM
35 FORMAT(' PLEASE INCREASE MXELE TO', I6)
      IF(NELEM.GT.MXELE) STOP
      WRITE(6,40) NVAR
40 FORMAT(/, ' TOTAL OF', I2, ' VARIABLE(S) FOR CONTOUR PLOT')
      WRITE(6,45)
45 FORMAT(/, ' *** PREPARING DATA FOR GRAPHIC DISPLAY ***')

```

```
!*****
```

```

      READ(1,20) TEXT
      DO 50 I=1,NPOIN
      READ(1,*) N, (XY(J,I), J=1,2), (SOL(K,I), K=1,NVAR)
      IF(I.NE.N) WRITE(6,55) I
55 FORMAT(/, ' NODE NO.', I5, ' IN DATA FILE IS MISSING')
      IF(I.NE.N) STOP

```

```

50 CONTINUE
  READ(1,20) TEXT
  DO 60 IE=1,NELEM
    READ(1,*) JE, (INTMAT(J,IE), J=1,3)
    IF(IE.NE.JE) WRITE(6,65) IE
65 FORMAT(/,' ELEMENT NO.', I5, ' IN DATA FILE IS MISSING')
    IF(IE.NE.JE) STOP
60 CONTINUE
!*****
! DETERMINE SIDES THAT REPRESENT ELEMENT EDGES:
!*****
  CALL SIDE(NELEM, NPOIN, INTMAT, ISIDE, LS, LA, LB, LC,
*      MXPOI, MXELE      )
!
! DETERMINE MIN AND MAX COORDINATES FOR SCREEN PLOTTING:
!
  XXMIN = 1.E20
  YYMIN = XXMIN
  DO 70 IP=1,NPOIN
    IF(XY(1,IP).LT.XXMIN) XXMIN = XY(1,IP)
    IF(XY(2,IP).LT.YYMIN) YYMIN = XY(2,IP)
70 CONTINUE
  DO 75 IP=1,NPOIN
    XY(1,IP) = XY(1,IP) - XXMIN
    XY(2,IP) = XY(2,IP) - YYMIN
75 CONTINUE
  SCX = 0.
  SCY = 0.
  DO 80 IP=1,NPOIN
    IF(XY(1,IP).GT.SCX) SCX = XY(1,IP)
    IF(XY(2,IP).GT.SCY) SCY = XY(2,IP)

```

80 CONTINUE

SC = SCX

IF(SCY.GT.SC) SC = SCY

DO 85 IP=1,NPOIN

XY(1,IP) = XY(1,IP)/SC

XY(2,IP) = XY(2,IP)/SC

85 CONTINUE

XMIN = 0.

YMIN = 0.

XMAX = SCX/SC

YMAX = SCY/SC

DO 90 IP=1,NPOIN

XY(1,IP) = XY(1,IP) - XMAX/2.

XY(2,IP) = XY(2,IP) - YMAX/2.

90 CONTINUE

CMIN = 0.

CMAX = XMAX

IF(YMAX.GT.CMAX) CMAX = YMAX

XMIN = -CMAX/2.

YMIN = XMIN

XMAX = CMAX/2.

YMAX = XMAX

!

100 CONTINUE

WRITE(6,110)

110 FORMAT(//,' PLEASE SELECT AN OPTION: ',/,

* ' 1. DRAW FINITE ELEMENT MODEL',/,

* ' 2. DRAW COLOR CONTOUR LINES ',/,

* ' 3. QUIT ')

READ(5,*) IOPT

IF(IOPT.EQ.3) GO TO 200

```

IF((IOPT.EQ.1).OR.(IOPT.EQ.2)) THEN
CALL DRAW(NELEM,NPOIN, XY, SOL, ISIDE, LS, IOPT,
*      MXPOI, MXELE, XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, INTMAT)
CALL CLEARSCREEN($GCLEARSCREEN)
GO TO 100
ENDIF
200 DUMMY = SETVIDEOMODE($DEFAULTMODE)
STOP
END
!
!*****
SUBROUTINE CNTOUR(NELEM, INTMAT, XY, SOL, IVAR,
*      NCON, CONLIN, AMAX, AMIN, MXPOI, MXELE)
!*****
INCLUDE 'FGRAPH.FD'
DIMENSION XY(2,MXPOI), SOL(3,MXPOI)
DIMENSION INTMAT(3,MXELE), CONLIN(500)
!
INTEGER*2 DUMMY, COLOR
CHARACTER*12 STR
CHARACTER*2 STR1
RECORD/WXYCOORD/WXY
RECORD/RCCOORD /CURPOS
!
DUMMY = SETTEXTCOLOR(13)
CALL SETTEXTPOSITION(4, 60, CURPOS)
CALL OUTTEXT('SOLUTION CONTOURS FOR POTENTIAL IN SPACE OF EMF')
CALL SETTEXTPOSITION(6, 60, CURPOS)
WRITE(STR1, '(I2)') IVAR
CALL OUTTEXT(' POTENTIAL NUMBER' // STR1 )
DUMMY = SETTEXTCOLOR(15)

```

```
CALL SETTEXTPOSITION(11, 60, CURPOS)
CALL OUTTEXT('COLOR CONTOUR LEVELS')
CALL SETTEXTPOSITION(12, 60, CURPOS)
CALL OUTTEXT('_____')
CALL SETVIEWPORT(5, 5, 465, 465)
```

```
!
```

```
DO 1000 IE=1,NELEM
  IP = INTMAT(1,IE)
  RX = SOL(IVAR,IP)
  R1 = RX
  R3 = RX
  IP1 = IP
  IP3 = IP
  IPX = INTMAT(2,IE)
  IP = IP + IPX
  RA = SOL(IVAR,IPX)
  RX = RX + RA
  IF(RA.LT.R1) THEN
    IP1 = IPX
    R1 = RA
  ENDIF
  IF(RA.GT.R3) THEN
    IP3 = IPX
    R3 = RA
  ENDIF
  IPX = INTMAT(3,IE)
  IP = IP + IPX
  RA = SOL(IVAR,IPX)
  RX = RX + RA
  IF(RA.LT.R1) THEN
    IP1 = IPX
```

```
R1 = RA
ENDIF
IF(RA.GT.R3) THEN
  IP3 = IPX
  R3 = RA
ENDIF
!
IF(IP1.EQ.IP3) GO TO 1000
IP2 = IP - IP1 - IP3
R1 = SOL(IVAR,IP1)
R2 = SOL(IVAR,IP2)
R3 = SOL(IVAR,IP3)
XC1 = XY(1,IP1)
YC1 = XY(2,IP1)
XC2 = XY(1,IP2)
YC2 = XY(2,IP2)
XC3 = XY(1,IP3)
YC3 = XY(2,IP3)
X12 = XC2 - XC1
Y12 = YC2 - YC1
X23 = XC3 - XC2
Y23 = YC3 - YC2
X13 = XC3 - XC1
Y13 = YC3 - YC1
R12 = R2 - R1
R23 = R3 - R2
R13 = R3 - R1
TOL = 1.E-10
DO 500 IC=1,NCON
RC = CONLIN(IC)
IF((RC.LT.R1).OR.(RC.GT.R3)) GO TO 500
```

```
IF(ABS(R13).LT.TOL)      GO TO 500
A2 = (RC - R1)/R13
X2 = XC1 + A2*X13
Y2 = YC1 + A2*Y13
IF(RC.LT.R2) THEN
  IF(ABS(R12).LT.TOL) GO TO 500
  A1 = (RC - R1)/R12
  X1 = XC1 + A1*X12
  Y1 = YC1 + A1*Y12
ELSE
  IF(ABS(R23).LT.TOL) GO TO 500
  A1 = (RC - R2)/R23
  X1 = XC2 + A1*X23
  Y1 = YC2 + A1*Y23
ENDIF
DIFF = AMAX - AMIN
RC1  = RC - AMIN
RANGE = RC1/DIFF
RANGE = 13*RANGE
COLOR = INT2(RANGE) + 1
DUMMY = SETCOLOR(COLOR)
CALL MOVETO_W(X1, Y1, WXY)
DUMMY = LINETO_W(X2, Y2)
JJ = COLOR + 13
CALL SETTEXTPOSITION(JJ, 64, CURPOS)
DUMMY = SETTEXTCOLOR(COLOR)
WRITE(STR, '(E12.6)') RC
CALL OUTTEXT(STR)
500 CONTINUE
1000 CONTINUE
RETURN
```

END

!

!*****

SUBROUTINE DRAW(NELEM,NPOIN, XY, SOL, ISIDE, LS, IOPT,

* MXPOI, MXELE, XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, INTMAT)

!*****

! DRAW FINITE ELEMENT MODEL AND SOLUTION COLOR CONTOUR LINES

!

INCLUDE 'FGRAPH.FD'

!

DIMENSION XY(2,MXPOI), SOL(3,MXPOI), CONLIN(500)

DIMENSION INTMAT(3,MXELE), ISIDE(2,3*MXELE)

!

INTEGER*2 DUMMY

CHARACTER*5 STR

RECORD/RCCOORD /CURPOS

RECORD/WXYCOORD/WXY

CALL SETVIEWPORT(0, 0, 639, 479)

! (.TRUE., XMIN, YMIN, XMAX, YMAX)

!

! DRAW FINITE ELEMENT MESH:

!

IF(IOPT.EQ.2) GO TO 100

CALL CLEARSCREEN(\$GCLEARSCREEN)

DUMMY = SETTEXTCOLOR(13)

CALL SETTEXTPOSITION(8, 66, CURPOS)

CALL OUTTEXT(' F I N I T E')

CALL SETTEXTPOSITION(10, 66, CURPOS)

CALL OUTTEXT('E L E M E N T')

CALL SETTEXTPOSITION(12, 66, CURPOS)

CALL OUTTEXT(' M O D E L')

```
CALL SETTEXTPOSITION(14, 64, CURPOS)
CALL OUTTEXT('_____')
DUMMY = SETTEXTCOLOR(10)
CALL SETTEXTPOSITION(19, 64, CURPOS)
CALL OUTTEXT('MODEL CONSISTS OF')
CALL SETTEXTPOSITION(21, 63, CURPOS)
WRITE(STR, '(I5)') NPOIN
CALL OUTTEXT(STR // ' NODES')
CALL SETTEXTPOSITION(23, 63, CURPOS)
WRITE(STR, '(I5)') NELEM
CALL OUTTEXT(STR // ' TRIANGLES ')
CALL SETVIEWPORT(5, 5, 465, 465)
DO 10 IS=1,LS
N1 = ISIDE(1,IS)
N2 = ISIDE(2,IS)
X1 = XY(1,N1)
Y1 = XY(2,N1)
X2 = XY(1,N2)
Y2 = XY(2,N2)
! MESH IN BRIGHT YELLOW:
DUMMY = SETCOLOR(14)
CALL MOVETO_W(X1, Y1, WXY)
DUMMY = LINETO_W(X2, Y2)
10 CONTINUE
! WAIT FOR 'ENTER' KEY TO BE PRESSED:
READ(*,*)
GO TO 1000
100 CONTINUE
!
! DRAW COLOR CONTOUR LINES:
!
```

```

WRITE(6,110)
110 FORMAT(//,' PLEASE ENTER THE VARIABLE NUMBER FOR CONTOUR PLOT',
*   /,' (OR ENTER ZERO TO QUIT)'           )
READ(5,*) IVAR
IF(IVAR.EQ.0) GO TO 1000
IF(IVAR.GT.3) GO TO 100
AMIN = 1.E+20
AMAX = -AMIN
DO 120 IP=1,NPOIN
IF(SOL(IVAR,IP).LT.AMIN) AMIN = SOL(IVAR,IP)
IF(SOL(IVAR,IP).GT.AMAX) AMAX = SOL(IVAR,IP)
120 CONTINUE
WRITE(6,130) AMIN, AMAX
130 FORMAT(/,' THE MINIMUM VALUE IS', E12.5, /,
*   ' THE MAXIMUM VALUE IS', E12.5, /)
135 WRITE(6,140)
140 FORMAT(' PLEASE ENTER THE BASE VALUE, INCREMENT',
*   ' AND NO. OF CONTOUR LINES'           )
READ(5,*) BASE, DELTA, NCON
IF(NCON.GT.500) GO TO 135
DO 150 IC=1,NCON
CONLIN(IC) = BASE + (IC-1)*DELTA
150 CONTINUE
!
CALL CLEARSCREEN($GCLEARSCREEN)
*   (.TRUE., XMIN, YMIN, XMAX, YMAX)
!
CALL CNTOUR(NELEM, INTMAT, XY, SOL, IVAR,
*   NCON, CONLIN, AMAX, AMIN, MXPOI, MXELE)
!
! SUPERIMPOSED BY MESH IN BRIGHT WHITE:

```

```

!
DO 200 IS=1,LS
N1 = ISIDE(1,IS)
N2 = ISIDE(2,IS)
X1 = XY(1,N1)
Y1 = XY(2,N1)
X2 = XY(1,N2)
Y2 = XY(2,N2)
DUMMY = SETCOLOR(15)
CALL MOVETO_W(X1, Y1, WXY)
DUMMY = LINETO_W(X2, Y2)
200 CONTINUE
! WAIT FOR 'ENTER' KEY TO BE PRESSED:
READ(*,*)
CALL CLEARSCREEN($GCLEARSCREEN)
GO TO 100
1000 CONTINUE
RETURN
END

!*****
SUBROUTINE SIDE(NELEM, NPOIN, INTMAT, ISIDE, LS, LA, LB, LC,
*             MXPOI, MXELE           )
!
! DETERMINE THE TWO NODE NUMBERS OF AN ELEMENT SIDE
!
DIMENSION INTMAT(3,MXELE), ISIDE(2,3*MXELE)
DIMENSION LA(MXPOI), LB(MXPOI), LC(3*MXELE)
!
DO 10 IP=1,NPOIN

```

```
LB(IP) = 0
10 CONTINUE
DO 20 IE=1,NELEM
DO 20 IN=1,3
IP = INTMAT(IN,IE)
LB(IP) = LB(IP) + 1
20 CONTINUE
LA(1) = 0
DO 30 IP=2,NPOIN
LA(IP) = LA(IP-1) + LB(IP-1)
30 CONTINUE
DO 40 IP=1,NPOIN
LB(IP) = 0
40 CONTINUE
DO 50 IE=1,NELEM
DO 50 IN=1,3
IP = INTMAT(IN,IE)
LB(IP) = LB(IP) + 1
JJ = LA(IP) + LB(IP)
LC(JJ) = IE

50 CONTINUE
!
LS = 0
DO 100 IP=1,NPOIN
LI = LS
IELE = LB(IP)
IF(IELE.EQ.0) GO TO 100
IA = LA(IP)
IP1 = IP
DO 120 IEL=1,IELE
```

```
IE = LC(IA+IEL)
DO 130 IN=1,3
IN1 = IN
IPT = INTMAT(IN,IE)
IF(IPT.EQ.IP) GO TO 140
130 CONTINUE
140 CONTINUE
DO 150 J=1,2
IN2 = IN1 + J
IF(IN2.GT.3) IN2 = IN2 - 3
IP2 = INTMAT(IN2,IE)
IF(IP2.LT.IP1) GO TO 150
IF(LS .EQ.LI) GO TO 170
DO 160 IS=LI+1,LS
JJ = IS
IF(ISIDE(2,IS).EQ.IP2) GO TO 190
160 CONTINUE
170 CONTINUE
LS = LS + 1
ISIDE(1,LS) = IP1
ISIDE(2,LS) = IP2
190 CONTINUE
150 CONTINUE
120 CONTINUE
100 CONTINUE
RETURN
END
```

ประวัติผู้เขียน

นาย คมเพชร ปีกคำวงษ์สังข์ เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน 2513 ที่อำเภอวาปีปทุม จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ไฟฟ้ากำลัง)จากวิทยาลัยเทคนิคเลย จังหวัดเลย และ อุตสาหกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์(สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ปีการศึกษา 2538

ปี พ.ศ. 2537-2539 เป็นอาจารย์โรงเรียนเทคโนโลยีบางางกระเปี กรุงเทพฯ ปีพ.ศ.2539-2542 เป็นวิศวกรฝ่ายขายที่ บริษัท Dynavet Thailand ปี พ.ศ. 2542 ถึงปัจจุบันฯ เป็นนักวิจัย"ในโครงการพัฒนาหุ่นลอยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นำโมเลกุลโปรตีนกลับมาใช้ใหม่,ยับยั้งเชื้อโรค,ชลอกการเน่าสลายในน้ำเสีย โดยมี ดร. สุริชัย นพนาตีพงษ์ และ ดร. นवलพรรณ ณ ระนอง เป็นหัวหน้า