



การทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า  
WATER QUALITY TEST USING CONDUCTANCE TECHNIQUES

นายณัฐพล วงศ์มงคล  
นางสาวเจริญศรี ดวงแก้ว

โครงการวิชวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2559

การทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า  
WATER QUALITY TEST USING CONDUCTANCE TECHNIQUES

นายณัฐพล วงศ์มงคล  
นางสาวเจริญศรี ดวงแก้ว

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

# การทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า

## ปีการศึกษา 2559

โดย

นายณัฐพล วงศ์มงคล  
นางสาวเจริญศรี ดวงแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ไทยเยี่ยม

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้า การทดลองนี้ประกอบด้วยการออกแบบการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys และออกแบบการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างแบบจำลองจริง จุดประสงค์ของเทคนิคนี้คือ การเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างผลลัพธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์ Ansys และจากการสร้างแบบจำลองจริงเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาการสร้างเซนเซอร์การทดสอบคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้าซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสารละลายต่างชนิดกันเช่น น้ำดื่ม น้ำเกลือ น้ำโคลน เลือด มาใช้ในการทดสอบเพื่อใช้ในการอธิบายเทคนิคการนำไฟฟ้าว่าเป็นไปตามทฤษฎีเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างว่าสารละลายแต่ละชนิดเมื่อทดสอบด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้าแล้วมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันเป็นไปตามทฤษฎีเทคนิคการนำไฟฟ้า

ผลการทดสอบสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายต่างชนิดกันมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์และค่าความต้านทานไฟฟ้าจากแบบจำลองจริงซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือน้ำดื่ม น้ำโคลน น้ำเกลือและเลือด ตามลำดับ สามารถสังเกตได้จากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์และผลการทดสอบที่ได้ผลลัพธ์เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้านี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเพื่อออกแบบเซนเซอร์ทดสอบคุณภาพน้ำต่อไป

คำสำคัญ: ไฟไนต์อีลิเมนต์ ซอฟต์แวร์ Ansys สภาพน้ำไฟฟ้า

# WATER QUALITY TEST USING CONDUCTANCE TECHNIQUES

Academic Year 2016

## By

Mr. Nattapon Wongmongkhon

Miss Charoensri Dounkaew

## Advisor

Asst. Prof. Dr. Chanchai Thaijjiam

## Abstract

This article presents a simulation water quality test using the conductance techniques. This experiment consists of designing a test of water quality using Ansys software and designing a test of the water quality using the conductance techniques with a real model. The purpose of this technique is comparison electric resistance occurred from results of the resistance from the software Ansys and from the real model, which used in developing the sensor for water quality test using the conductance techniques in this research. The solution of different types such as drinking water , slosh ,normal saline, and blood, are used in the test to use in describing the techniques of electricity that adhere to the tenet to the technology, compared to see the difference that each type of solution when tested by the techniques of electricity and the different resistance according to the theory of the techniques of electricity.

The test results show that the electric resistance of different types of substances from the software and the real model have values in descending order as follows the drinking water, slosh, normal saline, and blood. It can be noted that the both of results of the resistances in the same way. The simulation and test results can be used to develop an electric sensor of following water quality test.

**Keywords:** Finite Element, Software Ansys, Electrolytic Conductivity



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชญาไชย ไทยเจียม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ระหว่างจัดทำโครงการนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากนักน้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากโครงการวิศวกรรมนี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

คณะผู้จัดทำโครงการ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี	3
2.1.1 เทคนิคการนำไฟฟ้า	3
2.1.2 คุณสมบัติของสารละลาย	4
2.1.3 กระบวนการอิเล็กโทรไลต์	5
2.1.4 การนำไฟฟ้าของสารละลาย	5
2.1.5 เครื่องมือที่จะใช้วัด	6
2.1.6 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	15
3.1 จำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าโดยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์	15
3.1.1 ออกแบบการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys	15

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 วิธีนำค่าแรงดันของแต่ละโหนดออกจากซอฟต์แวร์	18
3.2 ออกแบบการทดลองคุณภาพโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างแบบจำลองจริง	21
3.2.1 สร้างรูปร่างเรขาคณิตจากแผ่นพลาสติกอะคริลิก	21
3.2.2 ทดลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า	21
3.3 จำนวนอิเล็กโทรดและโหนดที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กโทรด	23
3.4 ค่ากระแสไฟฟ้าในแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กโทรดและการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	26
4.1 ผลการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยวิธีการไฟไนต์อิเล็กโทรดโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys	26
4.1.1 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของน้ำเกลือ	27
4.1.2 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของน้ำดื่ม	28
4.1.3 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของน้ำโคลน	29
4.1.4 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของเลือด	30
4.2 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างการสร้างการทดลองจริง	30
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทานไฟฟ้า ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของซอฟต์แวร์กับการทดลองจริง	31
4.4 วิเคราะห์ผลจากกราฟ	32
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	33
5.1 สรุปผล	33
5.2 สรุปปัญหาและอุปสรรคในการทำการทดลอง	34
5.3 ข้อเสนอแนะ	34
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก ก	36
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	55



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดค่า คุณภาพน้ำแบบพกพาของภาควิชาวิศวกรรมโยธา	4
3.1 จำนวนอิเล็กโทรดและโหนดที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กโทรด	23
3.2 ค่ากระแสไฟฟ้าในแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กโทรดและการทดลอง	24
4.1 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้วิธีการไฟไนต์อิเล็กโทรด โดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys ของสารละลาย	26
4.2 ผลการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์	27
4.3 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างการทดลอง จริง	30
4.4 ผลการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจริง	31
4.5 ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กโทรดและการทดลอง	31

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงถึงแบบจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า	3
2.2 ภาพตัวอย่างการนำไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์	5
2.3 แสดงถึงแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ	7
2.4 แสดงถึงเครื่องมือออสซิลโลสโคป	7
2.5 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่า ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ	9
2.6 ตัวอย่างปัญหาทางโครงสร้างแบบง่ายๆ	10
2.7 ลักษณะอิเลิเมนต์แบบอย่างสำหรับโครงสร้าง	10
3.1 เลือกรูปแบบจำลอง	15
3.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ	16
3.3 การสร้างรูปร่างเรขาคณิต	17
3.4 การหาผลเฉลยของซอฟต์แวร์	18
3.5 เลือกคำสั่ง	18
3.6 นำค่าผลลัพธ์ออกจากซอฟต์แวร์	19
3.7 เลือกผลลัพธ์	19
3.8 คำสั่งส่งออก	20
3.9 บันทึกไฟล์	20
3.10 กล่องลูกบาศก์สี่เหลี่ยม	21
3.11 กำหนดค่าแรงดันให้เพาเวอร์ซัพพลาย	22
3.12 การทดลองทดสอบคุณภาพน้ำ	22
3.13 แสดงรายละเอียดการทดลอง	23
3.14 แสดงรูปร่างอิเลิเมนต์	23
3.15 กระบวนการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า	25
4.1 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำเกลือ	27
4.2 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำดื่ม	28
4.3 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำโคลน	29
4.4 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำเลือด	30

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	31

กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างค่าความต้านทาน  
ไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์และการทดลองจริง

## รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$A$	พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ	ตารางเมตร
$I$	กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้วงจร	แอมแปร์
$L$	ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดแบบ สี่เหลี่ยมจัตุรัส	เมตร
$R$	ความต้านทาน	โอห์ม
$V$	แรงดันไฟฟ้า	โวลต์
$\rho$	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	โอห์ม-เมตร
$\sigma$	ค่าความนำไฟฟ้า	โมห์
$G$	ความนำไฟฟ้า	โมห์
$\kappa$	ค่าการนำไฟฟ้า	โมห์
$\Lambda$	ค่าโมลการนำไฟฟ้าของสารละลาย	โมห์ เมตร <sup>2</sup> โมล <sup>-1</sup>
$c$	ความเข้มข้นของสารละลาย	โมล เดซิเมตร <sup>-2</sup>





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ทรัพยากรน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตทั้งการอุปโภคและบริโภค คุณภาพน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญทำให้มีการทดสอบคุณภาพของน้ำ ปัจจุบันวิธีการทดสอบคุณภาพน้ำมีหลากหลายวิธี เช่น การวัดค่าของ Biochemical Oxygen Demand (BOD) ค่าของ BOD นี้เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในการแสดงถึงความสกปรกมากน้อยเพียงใดของน้ำเสีย และวิธีเมมเบรนอิเล็กโทรด (Membrane electrode method)

การทดสอบคุณภาพน้ำส่วนมากเป็นการใช้สารเคมีในการทดสอบและในหลายวิธีในการทดสอบ เช่น การวัดค่าของ BOD และวิธีเมมเบรนอิเล็กโทรด เนื่องด้วยการทดสอบการใช้สารเคมีต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบทำให้ทราบผลของการทดสอบไม่รวดเร็วและไม่ต่อเนื่อง

จากปัญหาข้างต้นผู้จัดทำมีแนวคิดที่จะออกแบบโปรแกรมจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element) ร่วมกับซอฟต์แวร์ Ansys และออกแบบการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า การทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้านี้จะทำให้ทราบถึงคุณภาพของน้ำได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ออกแบบโปรแกรมจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับซอฟต์แวร์ Ansys

1.2.2 ออกแบบการทดลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า

1.2.3 นำผลการเปรียบเทียบของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากซอฟต์แวร์ Ansys และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจากแบบจำลองจริงไปใช้ในการพัฒนาเป็นเซนเซอร์การทดสอบคุณภาพน้ำในอนาคต

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

จำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับซอฟต์แวร์ Ansys เพื่อทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของสารละลายและทดสอบคุณภาพน้ำจากการสร้างการทดลองจริงด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้า

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยจะเป็นประโยชน์ในการหาแนวทางป้องกันและตรวจสอบคุณภาพน้ำ เพื่อการใช้น้ำอุปโภคและบริโภคที่มีคุณภาพ ได้แบบจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับซอฟต์แวร์ Ansys ที่สามารถเป็นต้นแบบในการศึกษา



## บทที่ 2

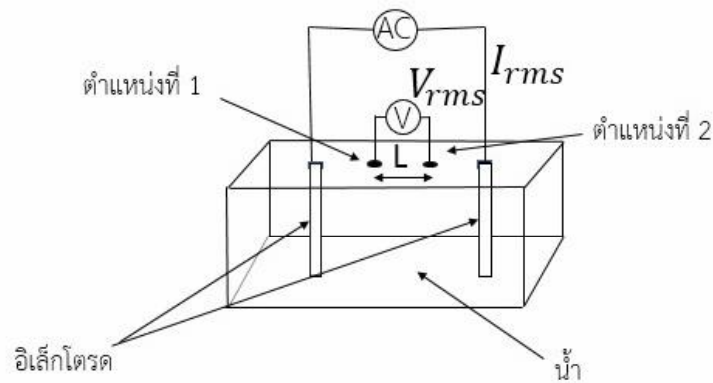
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งการนำกระแสไฟฟ้าจากแผ่นอิเล็กโทรดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นต้องอาศัยหลักการและทฤษฎีต่างๆ ใช้ในการประกอบการพิจารณา รวมถึงการคำนวณ เพื่อการออกแบบการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง และออกแบบชิ้นงานที่เหมาะสมกับการใช้งาน

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 เทคนิคการนำไฟฟ้า

จากแบบจำลองของเทคนิคการนำไฟฟ้ารูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าสลับคงที่ผ่านแผ่นอิเล็กโทรดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 2.1 แสดงถึงแบบจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า

และกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.1)$$

โดยที่  $V$  = แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์

$I$  = กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้วงจร มีหน่วยเป็นแอมแปร์

$R$  = ความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม

จากสมการค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดตัวนำจะมีสมการดังนี้

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.2)$$

โดยที่  $R$  = ความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม  
 $\rho$  = ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร ( $\Omega \cdot m$ )  
 $L$  = ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีหน่วยเป็นเมตร (m)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร ( $m^2$ )

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

ซึ่งค่าความนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) มีหน่วยเป็น โมห์ (mho)

### 2.1.2 คุณสมบัติการต้านทานไฟฟ้าของสารละลาย

การวัดคุณภาพของน้ำมีหลายชนิด (Dissolved Oxygen) มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารละลายแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดค่าคุณภาพของน้ำแบบพกพาจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สารละลาย	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ohm/cm)
น้ำดื่ม	15873.015
น้ำเกลือ	64
น้ำโคลน	1908.39
เลือด	47.16

### 2.1.3 กระบวนการอิเล็กโทรไลต์

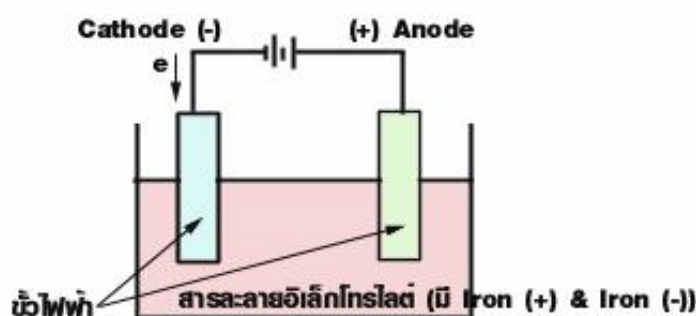
กระบวนการอิเล็กโทรไลต์ หมายถึง ธาตุหรือไอออนที่สามารถละลายน้ำได้แล้วแตกตัวเป็นไอออนอิสระ หรือปรากฏการณ์ที่ทำให้สารนั้นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป เช่น สภาพสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไปก็ส่งผลให้การนำไฟฟ้าเปลี่ยนไป

เมื่อแผ่นอิเล็กโทรดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสอยู่ในน้ำแล้ว อาจเกิดกระแสไฟฟ้าอ่อนๆขึ้นก่อน และเกิดกระแสไฟฟ้าจากกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ด้วย

### 2.1.4 การนำไฟฟ้าของสารละลาย

สารละลายที่นำไฟฟ้าได้จะเรียกว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์

ลักษณะเด่นของการนำไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์ มีดังนี้ เป็นสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และเป็นสารละลายของกรด เบส หรือเกลือ การนำไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ ทำได้โดยการจุ่มแผ่นโลหะ 2 แผ่นลงในอิเล็กโทรไลต์แล้ว ต่อเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ พบว่า แผ่นโลหะทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก และขั้วไฟฟ้าลบ สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าบวก และขั้วไฟฟ้าลบ จะมีผลทำให้อิเล็กโทรไลต์ แตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบ ไอออนบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าลบ และไอออนลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก แสดงว่า กระแสไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าบวก (ไอออนบวก) และประจุไฟฟ้าลบ (ไอออนลบ) กล่าวโดยสรุป กระแสไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์ เกิดจากการเคลื่อนที่ไอออนบวกและไอออนลบ



รูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่างการนำไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์

ที่มา: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic9/electrolite.html>

นียมการนำไฟฟ้าของสารละลาย

ความนำไฟฟ้า (conductance)

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.4)$$

$G$  = ความนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโมห์ (mho)

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม

การนำไฟฟ้าแปรผกผันกับความยาว  $l$  และแปรผันตรงกับหน้าตัด  $A$

$$G = \frac{\kappa A}{l} \quad (2.5)$$

$\kappa$  = ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโมห์ (mho)

ค่าการนำไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับจำนวนไอออนในสารละลาย หรือความเข้มข้นของสารละลาย

ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าโมลการนำไฟฟ้าของสารละลาย (molar conductivity)

$$\Lambda = \frac{\kappa}{c} \quad (2.6)$$

$\Lambda$  = ค่าโมลการนำไฟฟ้าของสารละลาย มีหน่วยเป็นโมห์ เมตร<sup>2</sup> โมล<sup>-1</sup> (mho m<sup>2</sup> mol<sup>-1</sup>)

$c$  = ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็นโมล เมตร<sup>-2</sup> (mol dm<sup>-2</sup>)

## 2.1.5 เครื่องมือที่จะใช้วัด

### 2.1.5.1 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ (AC supply)

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ เป็นเครื่องควบคุมและจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการตามโพลต์ที่ใช้งาน โดยแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจะสามารถจ่ายและปรับเปลี่ยนความถี่ตามความต้องการให้กับโพลต์ได้



รูปที่ 2.3 แสดงถึงแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ

#### 2.1.5.2 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคปชนิดนี้จะใช้เทคนิคดิจิทัล และแตกต่างจากออสซิลโลสโคปแบบเก็บภาพอนาล็อก โดยดิจิทัลออสซิลโลสโคปนั้นจะรับอินพุตเข้ามาในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก จากนั้นจะนำสัญญาณไปเข้าสู่การแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) แล้วได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นดิจิทัลนำไปเก็บไว้ในหน่วยความจำ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำมาพล็อตเป็นรูปสัญญาณบนจอภาพ



รูปที่ 2.4 แสดงถึงเครื่องมือออสซิลโลสโคป

ที่มา: <https://tungelectronic.wordpress.com>

### 2.1.6 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง จะวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์ จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ ฟังก์ชันการกระจัด (shape function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาหนึ่งจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (element) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน

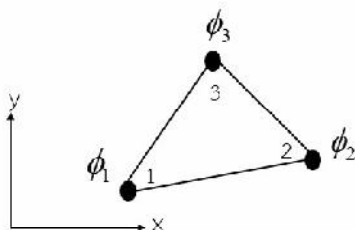
วิธีการดังกล่าวบ่งชี้เป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันเกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

#### 2.1.6.1 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid problem)

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์ (element interpolation functions) เช่น อีลิเมนต์สามเหลี่ยม อีลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูป 2.3 โดยที่จุดต่อนั้นเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งคือ  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  และ  $\phi_3$  ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยืดหรือหดตัว (displacement)



รูป 2.5 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

หากเราทำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของเหลวหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวไม่รู้ค่าบนอีลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.7)$$

โดย  $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$  คือ ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์ สมการ (2.4) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

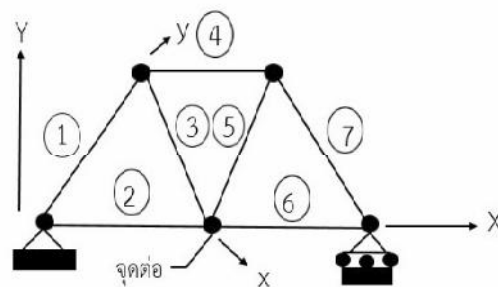
$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{\{\phi\}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดย  $[N]$  คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ และ  $\{\phi\}$  คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของอีลิเมนต์นั้น ในตำราเล่มนี้ สัญลักษณ์  $[ \ ]$  แสดงถึงเมตริกซ์แนวนอน และ  $\{ \}$  แสดงถึงเมตริกซ์แถวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ

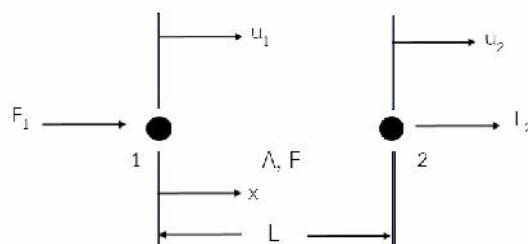
การสร้างสมการของเอลิเมนต์ในหนึ่งมิติ

ปัญหาทางโครงสร้าง ดังแสดงโดยตัวอย่างง่ายๆ ในรูปที่ 2.6 สามารถนำไปสู่ความเข้าใจในการสร้างสมการของเอลิเมนต์ได้เป็นอย่างดี โครงสร้างในรูป 2.6 นี้ ประกอบด้วยเหล็กท่อนทั้งหมด 7 ท่อน ซึ่งอาจทำการจำลองแบบด้วยเอลิเมนต์ทั้งหมดจำนวน 7 เอลิเมนต์



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างปัญหาทางโครงสร้างแบบง่ายๆ

เอลิเมนต์ทั้งหมดนี้อยู่ในระบบแกนรวมใหญ่ X-Y (global coordinate system) หากเราพิจารณาลงไปในแต่ละเอลิเมนต์เช่น เอลิเมนต์หมายเลข 3 เราจะเห็นว่าเอลิเมนต์นี้วางอยู่ในแนวแกน x ซึ่งอยู่ในระบบแกนย่อย x-y (local coordinate system) เมื่อโครงสร้างในรูปที่ 2.6 นี้ถูกแรงภายนอกมากระทำ เราสามารถคำนวณหาการเคลื่อนตัวของ จุดต่อต่างๆได้โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ขั้นตอนแรกๆที่จำเป็นต้องทำคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ขึ้นมาก่อน ดังเช่น หากเรานำเอลิเมนต์ใดเอลิเมนต์หนึ่ง เช่น เอลิเมนต์ 3 นี้ มาพิจารณาดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะเอลิเมนต์แบบอย่างสำหรับโครงสร้าง



อิลิเมนต์แบบอย่างในรูป 2.7 นี้ประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 1 และ 2 ที่ปลายทั้งสองข้าง อิลิเมนต์นี้ทำจากวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น เท่ากับ  $E$  มีพื้นที่หน้าตัด เท่ากับ  $A$  และมีความยาว เท่ากับ  $L$  มีแรง  $F_1$  และ  $F_2$  กระทำในแนวแกน  $x$  ที่จุดต่อ 1 และ 2 ตามลำดับ แรงดังกล่าวเป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนอิลิเมนต์นี้เมื่อโครงสร้างทั้งหมดอยู่ภายใต้สภาวะสมดุล และแรงดังกล่าวทำให้จุดต่อ 1 และ 2 เคลื่อนตัวไปในแนวแกน  $x$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $u_1$  และ  $u_2$  ตามลำดับ

เริ่มต้นจากสมการความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียด ที่เรียกกันว่ากฎของฮุก (Hooke's law) นั่นคือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.9)$$

โดย  $\sigma$  แทนค่าของความเค้นและ  $\varepsilon$  แทนค่าของความเครียด สมมติว่าจากอิลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ เราจับยึดที่จุดต่อ 1 และดึงที่จุดต่อ 2 ด้วยแรง  $F_2$  สมการ 2.9 สามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{F_2}{A} = \left( \frac{u_2 - u_1}{L} \right)$$

$$F_2 = \frac{AE}{L}(u_2 - u_1) \quad (2.10)$$

$$-\frac{AE}{L}(u_2 - u_1) = F_2$$

ภายใต้ความสมดุล

$$\sum F_x = 0$$

$$F_1 + F_2 = 0$$

$$F_1 = -F_2$$

$$F_1 = \frac{AE}{L}(u_1 - u_2)$$

นั่นคือ สมการ (2.7) และ (2.6) สามารถนำมาเขียนด้วยกันได้ดังนี้

$$\frac{AE}{L}(u_1 - u_2) = F_1$$

$$-\frac{AE}{L}(u_1 - u_2) = F_2$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & -\frac{AE}{L} \\ -\frac{AE}{L} & \frac{AE}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

$$\frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

หรือเขียนย่อได้เป็น

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2.12)$$

ในที่นี้

$[K]$  เรียกว่า อิลิเมนต์เมตริกซ์ของความแข็งเกร็ง

$\{u\}$  เรียกว่า เมตริกซ์ของการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ

$\{F\}$  เรียกว่า เมตริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.13)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในสมการ แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา  $\{\phi\}_{\text{sys}}$  อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจจะเป็นค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างเราสามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (strain) และความเค้น (stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้คุณสมบัติที่จุดต่างๆก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการของอิลิเมนต์เป็นหลัก

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้ทำการศึกษการตรวจสอบการเจือปนของน้ำในน้ำผึ้งด้วยเซนเซอร์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแกนร่วม โดยใช้เซนเซอร์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแกนร่วม และเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ คำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งเกิดจากเซนเซอร์สัมผัสตัวอย่างน้ำผึ้ง ผลการวิจัยพบว่า ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของตัวอย่างน้ำผึ้งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่สภาวะเดียวกัน นอกจากนั้น ณ ความถี่ 0.5 กิกะเฮิรตมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบการเจือปนของน้ำในน้ำผึ้งที่สุด เนื่องจากมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าส่วนจริงต่อเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่เจือปนในน้ำผึ้งสูงสุด คือ 1.25 ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์

ฐิติมา เฮ้งเจริญ ได้ทำการศึกษการวัดสภาพเชิงซ้อนของของเหลวที่ความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้เทคนิคท่อนำคลื่นแบบเลื่อนที่ออกแบบสร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ และวิธี 2 จุด สารไดอิเล็กตริกของเหลวชนิดไม่ดูดกลืนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ เบนซีน และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ลำดับของเหลวชนิดดูดกลืนพลังงานได้แก่ เอทิลเบนซีน คลอโรเบนซีน และโบรโมเบนซีน จากผลการทดลองด้วยเทคนิคท่อนำคลื่นแบบเลื่อนที่ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเบนซีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เอทิลเบนซีน คลอโรเบนซีน และโบรโมเบนซีน เท่ากับ 2.242, 2.203, 2.3064, 4.855 และ 4.201 ตามลำดับ สำหรับค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของเอทิลเบนซีน คลอโรเบนซีน และโบรโมเบนซีน เท่ากับ 0.049, 1.693, และ 1.781 ตามลำดับ จากค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของเอทิลเบนซีน คลอโรเบนซีน และโบรโมเบนซีน ได้ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก เท่ากับ 8.45, 10.20 และ 15.32 pS ตามลำดับ สำหรับใช้ 2 จุด ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเบนซีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เอทิลเบนซีน คลอโรเบนซีน และโบรโมเบนซีน เท่ากับ 2.249, 2.207, 2.315, 4.611 และ 4.127 ตามลำดับ สำหรับค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของเอทิลเบนซีน คลอโรเบนซีน และโบรโมเบนซีน เท่ากับ 0.054, 1.639 และ 1.782 ตามลำดับ จากค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของเอทิลเบนซีน

คลอโรเบนซีน และโบรมเบนซีน ได้ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก เท่ากับ 10.82, 10.96 และ 16.08 Ps ตามลำดับ

รัตติกรณ์ เสาร์แดน ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโตรดต่างชนิดในการฮีตเอ็มวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยในการดำเนินการทดลองจะใช้วัสดุอิเล็กโตรดทองเหลือง ทองแดง กราไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ทำการสปาร์ควัดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90WC-10Co เป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ลึก 1 มม. ภายใต้สารไดอิเล็กตริกไฮโดรคาร์บอน ด้วยพารามิเตอร์การทดลอง 4 ปัจจัยหลักคือ เวลาเปิด เวลาปิดกระแส และช่วงประจุอิเล็กโตรด โดยวัดประสิทธิภาพการทำงานของอิเล็กโตรดอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด และวัดผลกระทบของอิเล็กโตรดที่มีต่อคุณภาพของผิวงานในรูปของความหยาบเฉลี่ย ผลการทดลองพบว่า วัสดุอิเล็กโตรดทองแดงให้ผลอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 1.20 มม.<sup>3</sup>/นาที การที่อิเล็กโตรดทองแดงให้อัตราการขจัดเนื้องานสูงกว่าอิเล็กโตรดชนิดอื่น เกิดจากคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และค่าความต้านทานที่ต่ำ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อนไหลผ่านได้มาก โดยวัสดุอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จะให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ต่ำสุดอยู่ที่ 1.545  $\mu\text{m}$  สำหรับผลวัสดุอิเล็กโตรดให้ผลค่าความหยาบผิวที่ติดตามไปด้วย

## บทที่ 3

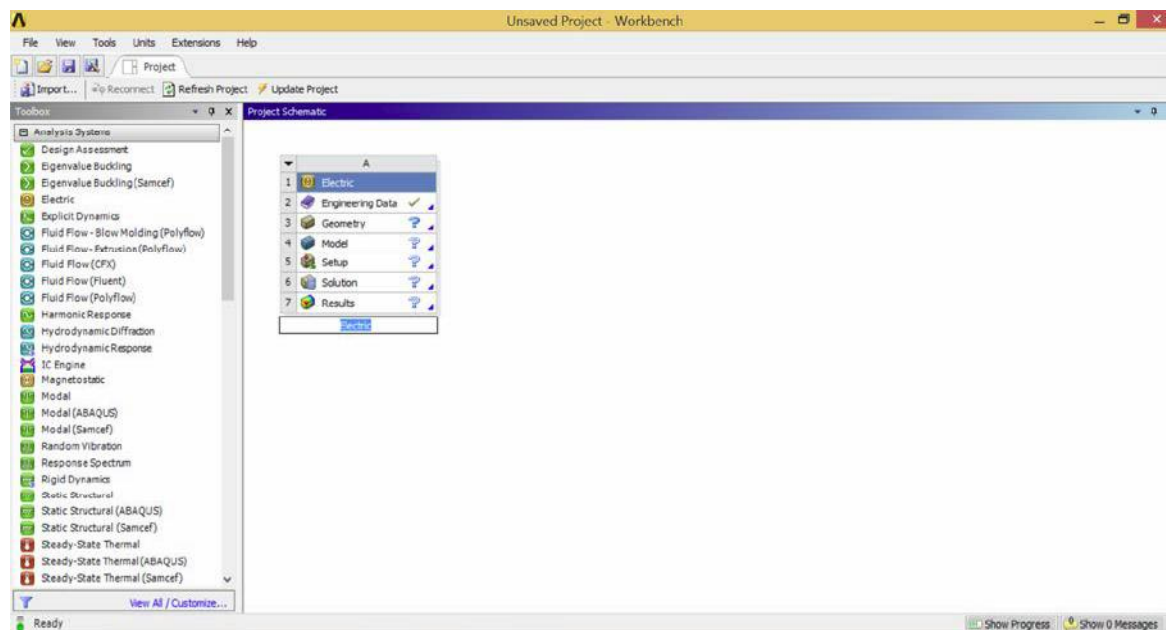
### วิธีการดำเนินงาน

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาการทดสอบคุณภาพของน้ำ โดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้ามาทดสอบ รวมถึงการออกแบบทดลองการทดสอบคุณภาพน้ำให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

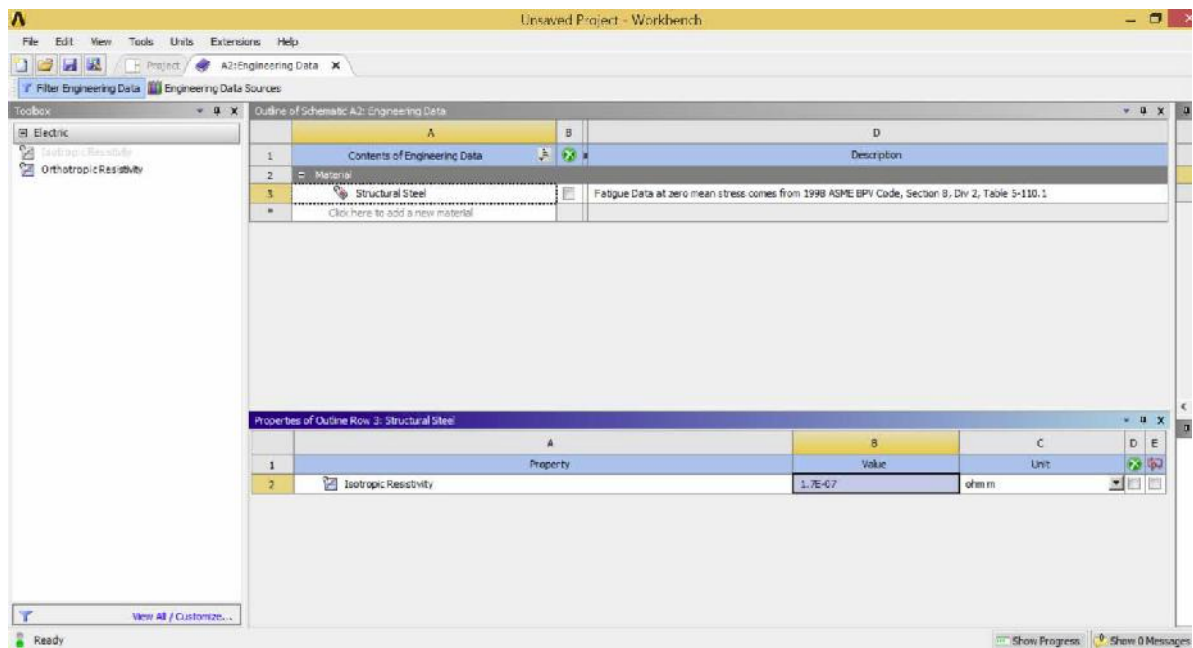
#### 3.1 จำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 3.1.1 ออกแบบการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดคุณสมบัติวัสดุโดยการกำหนดค่าการนำไฟฟ้าของแต่ละวัสดุ วัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลว ซึ่งของแข็งวัสดุที่เลือกใช้คือ stainless steel ใช้แสดงถึงแผ่นสแตนเลสสตีล 2 แผ่น ส่วนของเหลวคือ น้ำดื่ม น้ำเกลือ น้ำโคลน น้ำเลือด การกำหนดคุณสมบัติของเหลวต้องใส่ค่า สภาพนำไฟฟ้าตามชนิดของเหลว

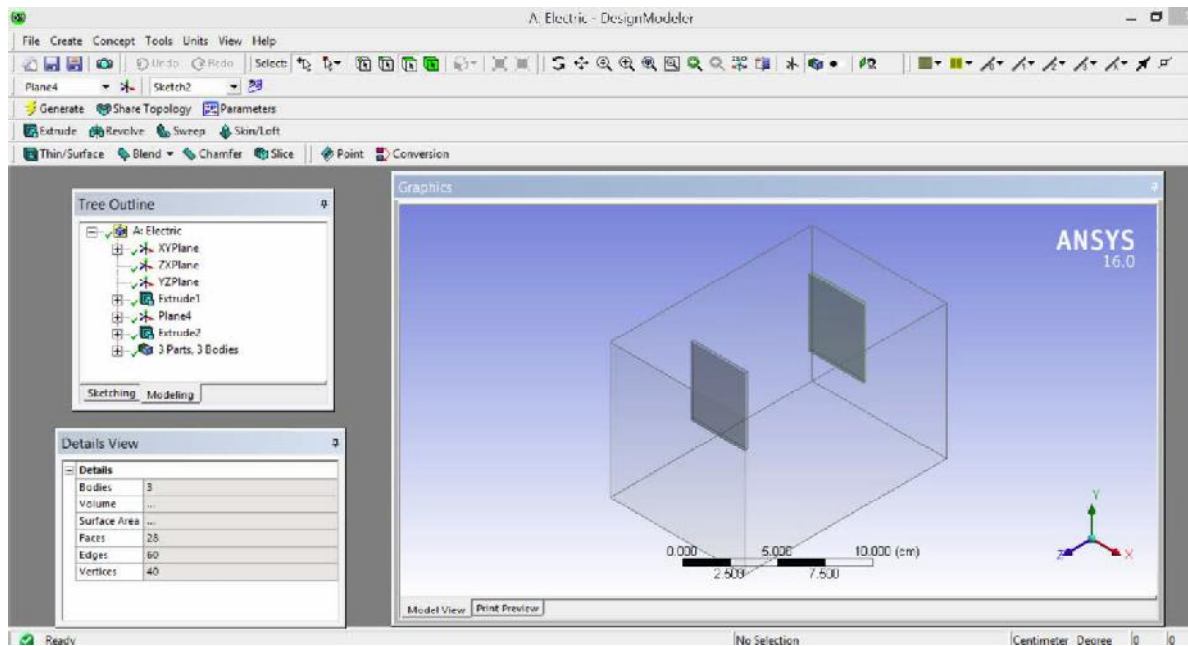


รูปที่ 3.1 เลือกรูปแบบการจำลอง



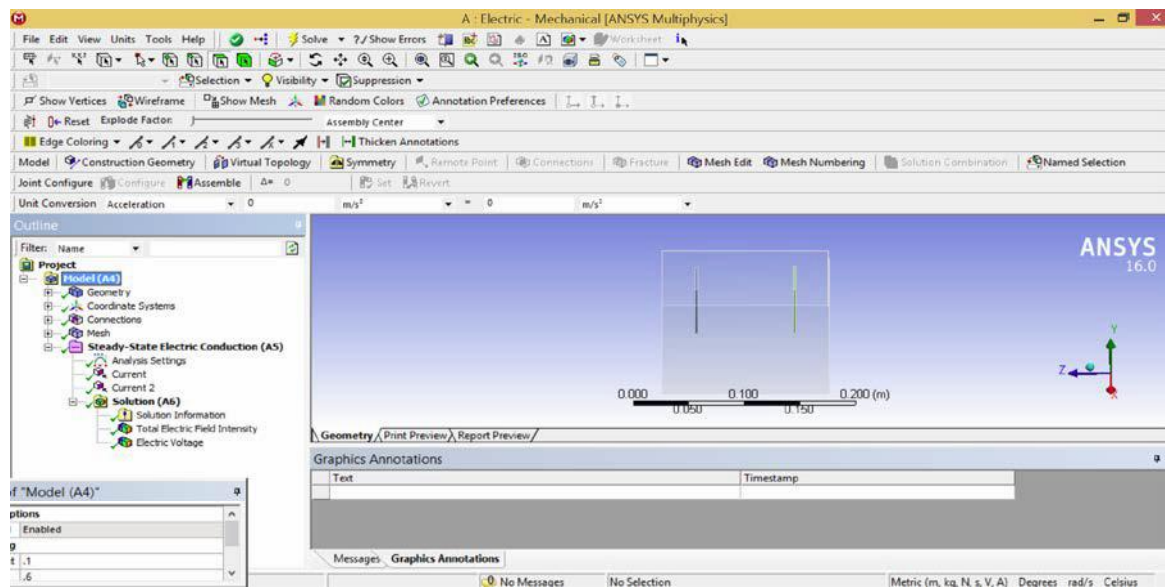
### รูปที่ 3.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างรูปร่างวัสดุ กำหนดหน่วยเป็นเซนติเมตร และทำการสร้างรูปร่างวัสดุที่เป็นของเหลวให้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร จากนั้นทำการสร้างแผ่นสแตนเลสสตีลจำนวนสองแผ่นโดยการเลือกพื้นที่การสร้างรูปร่างขึ้นมาใหม่จากกล่องลูกบาศก์สี่เหลี่ยมเดิม โดยทำการสร้างรูปร่างแผ่นสแตนเลสจากจุดสี่จุดและทำการลากเส้นตรงระหว่างจุดเพื่อทำให้เกิดเป็นรูปร่างแผ่นสแตนเลสที่มีขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร ยาว 5 เซนติเมตร



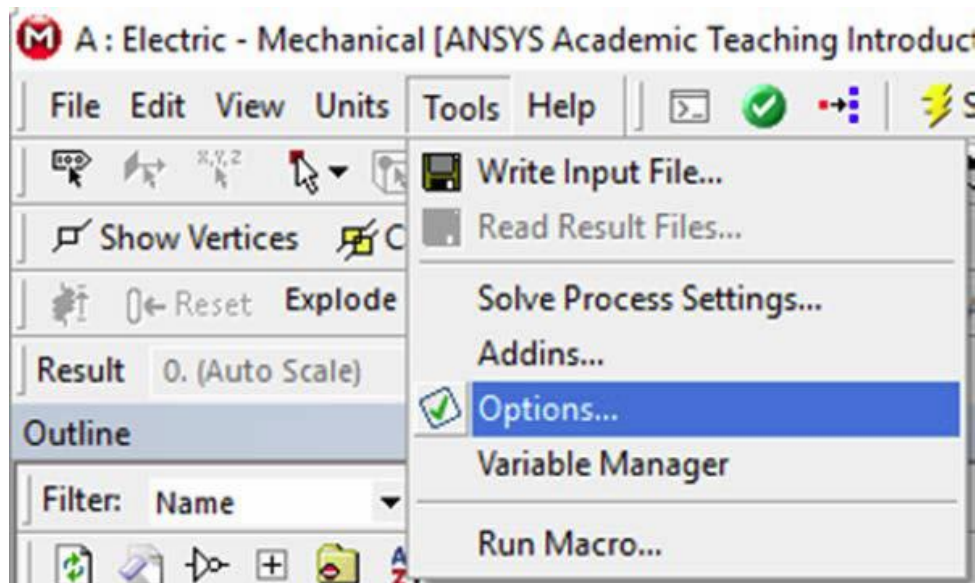
### รูปที่ 3.3 การสร้างรูปร่างเรขาคณิต

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อทำการสร้างรูปร่างวัสดุเรียบร้อยแล้วขั้นตอนนี้จะเป็นการจำลองการนำไฟฟ้า เริ่มจากการเลือกวัสดุที่กำหนดในขั้นตอนกำหนดวัสดุ ทำการเลือกรูปร่างวัสดุที่เป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยมให้เป็นน้ำ และในขณะเดียวกันก็กำหนดคุณสมบัติ วัสดุของแผ่นสแตนเลส 2 แผ่นโดยทำการเลือกคุณสมบัติเป็นสแตนเลส ทำการสร้างจุดโคออดิเนต  $x y z$  ในตำแหน่งของแผ่นสแตนเลสสี่เหลี่ยมทั้ง 2 แผ่น ในขั้นตอนต่อมาทำการกำหนดเมชโดยการกำหนดให้เมชของทั้ง 3 รูปร่างให้เป็นแบบเตตระฮีดรอน และกำหนดขนาดเมชเท่ากับ 0.005 มิลลิเมตร ทำการเจนเนอเรตเมชจากนั้นทำการกำหนดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและกำหนดกราวด์ ของแผ่นสแตนเลส โดยต้องกำหนดให้ แผ่นที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายพร้อมกำหนดค่ากระแสให้เท่ากับ 0.05 แอมแปร์ แผ่นที่ 2 กำหนดค่ากระแสเท่ากับ 0 แอมแปร์ จากนั้นทำการหาผลเฉลยของซอฟต์แวร์



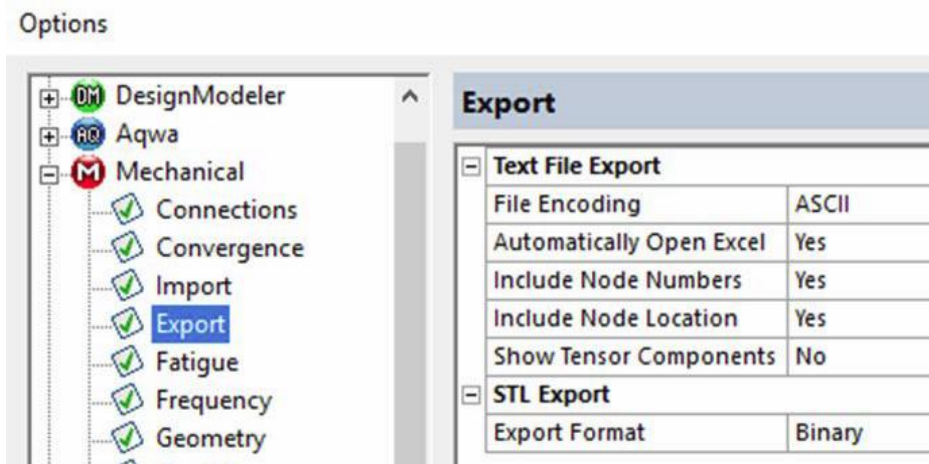
รูปที่ 3.4 หามผลเฉลยของซอฟต์แวร์

### 3.1.2 วิธีนำค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละโหนดออกจากซอฟต์แวร์



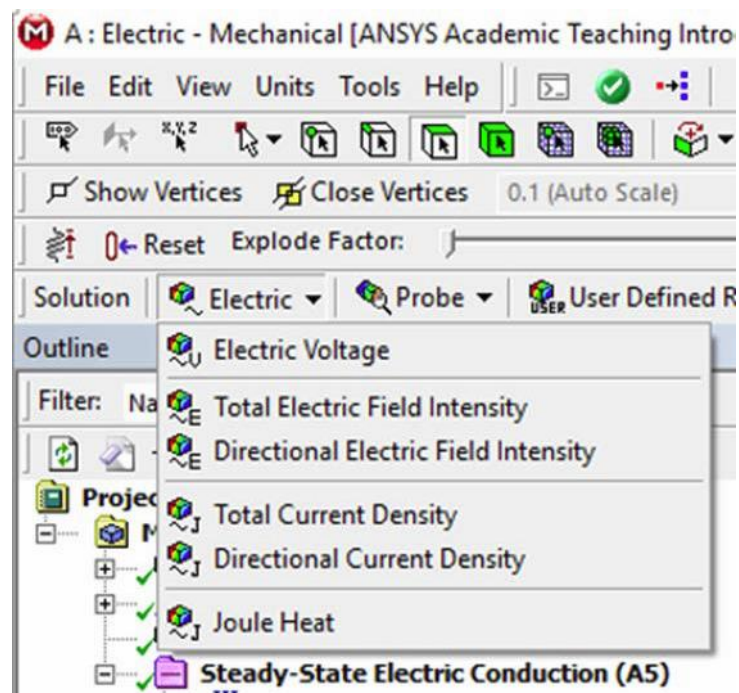
รูปที่ 3.5 เลือกคำสั่ง





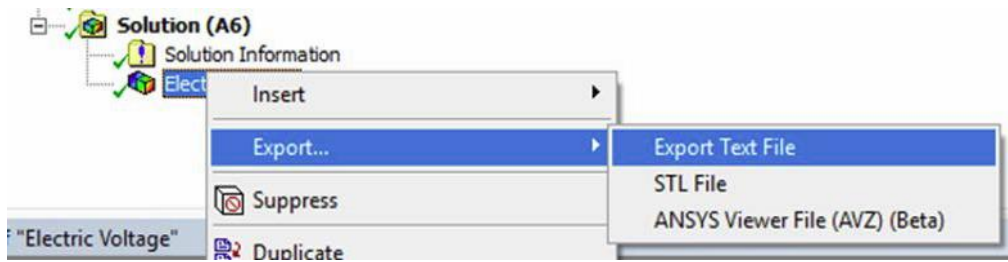
รูปที่ 3.6 นำค่าผลลัพธ์ออกจากซอฟต์แวร์

เลือกผลลัพธ์ที่ต้องการ



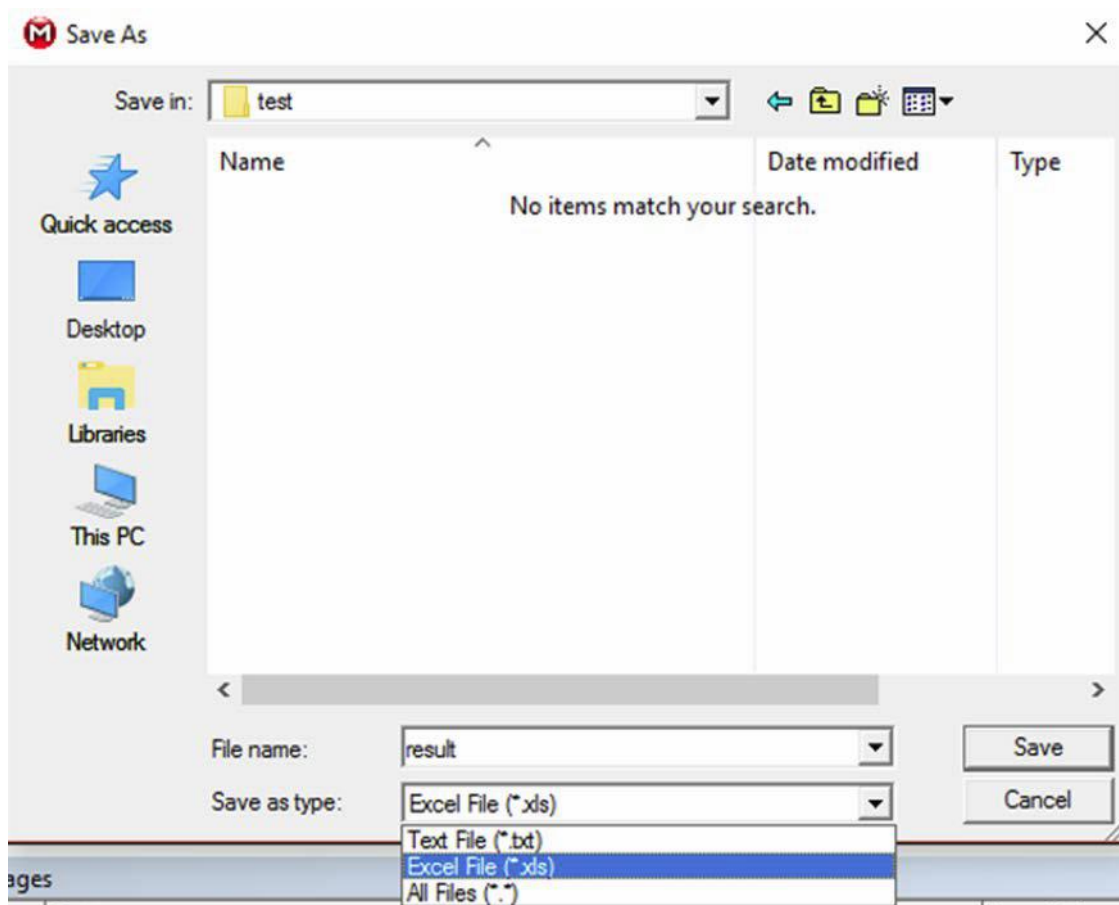
รูปที่ 3.7 เลือกผลลัพธ์

คลิกขวาที่ result ที่ต้องการ export



รูปที่ 3.8 คำสั่งส่งออก

บันทึกไฟล์ตามต้องการ



รูปที่ 3.9 บันทึกไฟล์

## 3.2 ออกแบบการทดลองคุณภาพโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างแบบจำลองจริง

### 3.2.1 สร้างรูปร่างเรขาคณิตจากแผ่นพลาสติกอะคริลิก

ขนาดความกว้างของแผ่นพลาสติกอะคริลิก 10 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร นำมาสร้างเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเรขาคณิตทำการวัดระยะจากขอบด้านบนเข้ามาที่ระยะ 3 เซนติเมตรของแต่ละด้านของทั้ง 2 ด้าน ทำการเจาะรูตรงกลางที่เหลือที่วัดจากระยะขอบทั้ง 2 ด้าน ในขั้นตอนต่อมาทำการตัดแผ่นสแตนเลสสี่เหลี่ยม ขนาดความยาว 5 เซนติเมตร ความกว้างขนาด 4 เซนติเมตรจำนวน 2 แผ่นทำการติดแผ่นสแตนเลสกับขอบด้านบนที่ตัดทั้ง 2 ด้าน โดยให้แผ่นสแตนเลสด้านความยาวที่ 5 เซนติเมตรลงไปในกลุ่มลูกบาศก์สี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล่องลูกบาศก์สี่เหลี่ยม

### 3.2.2 ทดลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 ทำการคาร์เบทเครื่องออสซิลโลสโคป

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าให้เพาเวอร์ซัพพลายเท่ากับ 0.1 โวลต์ และกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.05 แอมแปร์ และนำสายไฟสีแดงคือสายจ่ายกระแสไฟฟ้ามาจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1 และนำสายไฟสีดำมาต่อที่จุดกราวด์ของแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2

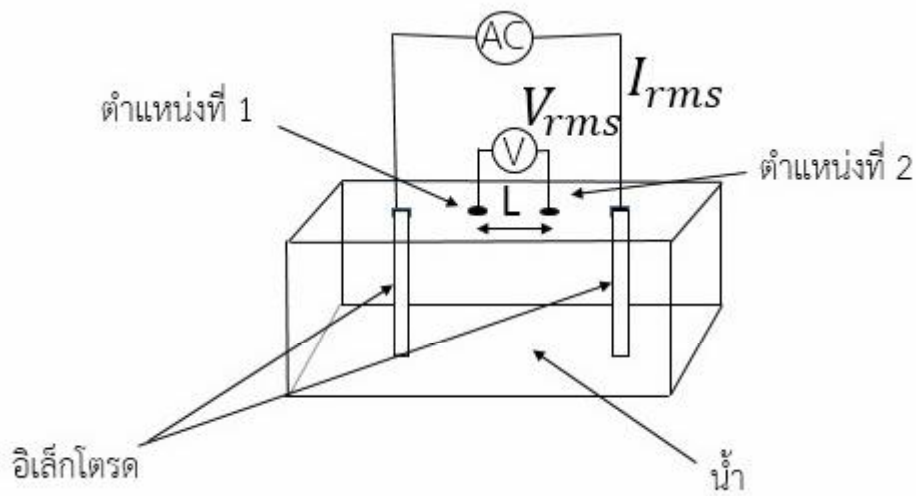


รูปที่ 3.11 กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าให้เพาเวอร์ซัพพลาย

ขั้นตอนที่ 3 นำอิเล็กทรอนิกส์ตำแหน่งที่ 1 วางที่ตำแหน่ง (x,y,z) เท่ากับ (5,7.5,5) และตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์แผ่นที่ 2 วางที่ตำแหน่ง (x,y,z) เท่ากับ (5,7.5,12)  
 ขั้นตอนที่ 4 อ่านค่าแรงดันจากหน้าจอออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.12 การทดลองทดสอบคุณภาพน้ำ

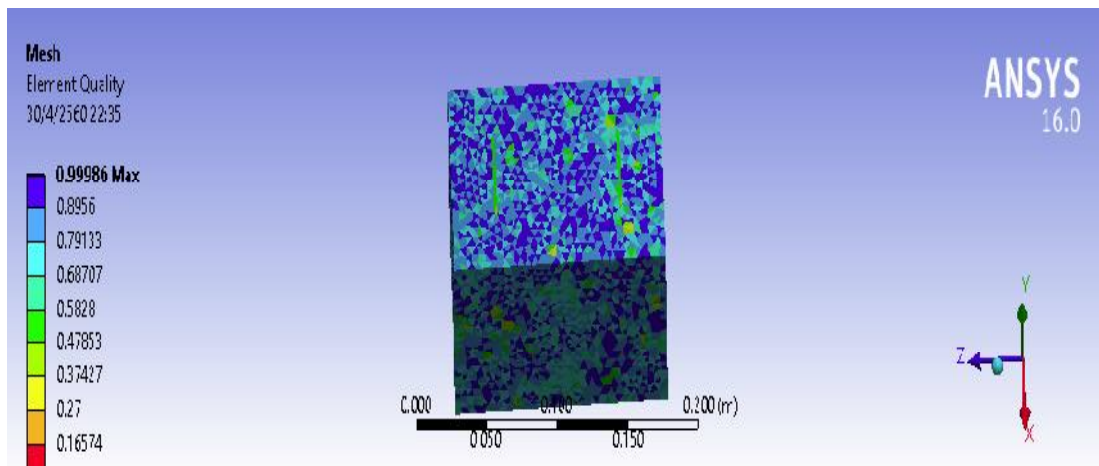


รูปที่ 3.13 แสดงรายละเอียดการทดลอง

### 3.3 จำนวนอิเลิเมนต์และโหนดที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อิเลิเมนต์

ตารางที่ 3.1 จำนวนอิเลิเมนต์และโหนดที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อิเลิเมนต์

จำนวนโหนดทั้งหมด (โหนด)	จำนวนอิเลิเมนต์ทั้งหมด (อิเลิเมนต์)	ขนาดอิเลิเมนต์ (เมตร)
148404	104802	0.005

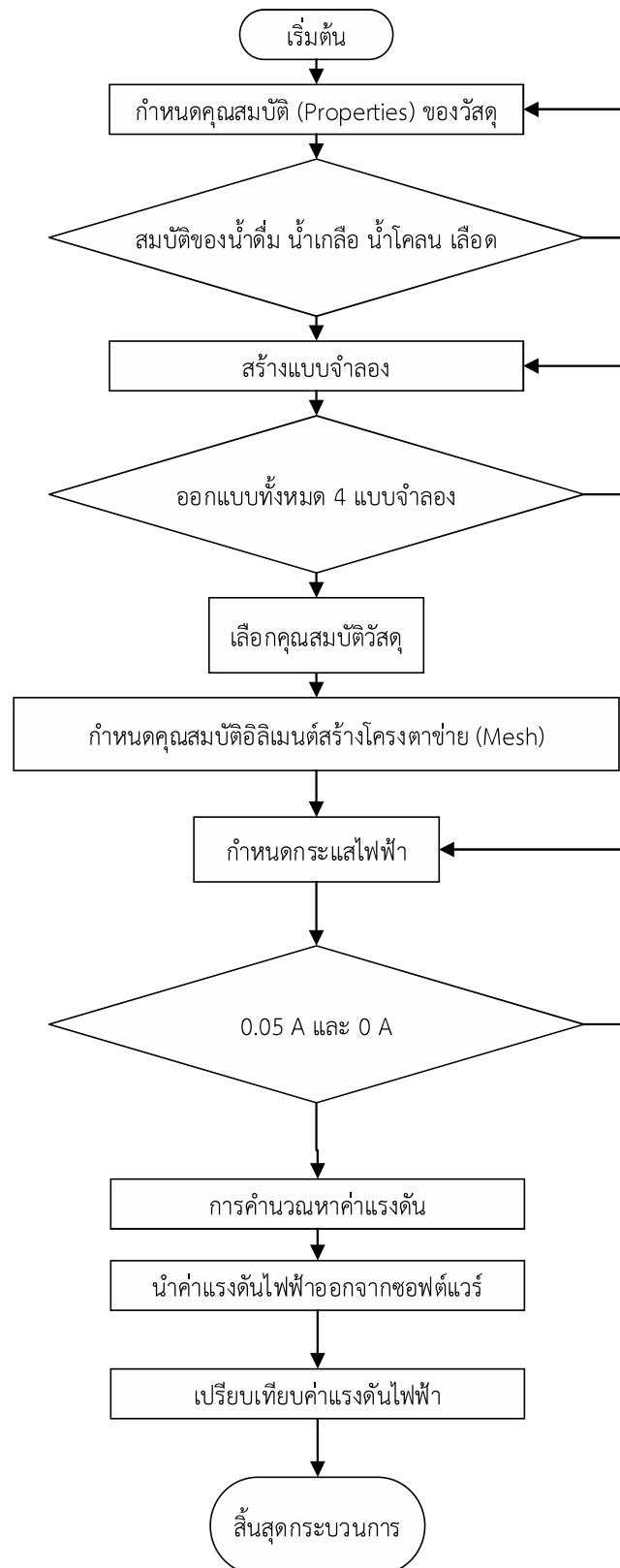


รูปที่ 3.14 แสดงรูปร่างอิเลิเมนต์

### 3.4 ค่ากระแสไฟฟ้าในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ค่ากระแสไฟฟ้าในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดลอง

ค่ากระแสไฟฟ้าในแบบจำลอง (แอมแปร์)		ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลอง (แอมแปร์)	
แผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1	แผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2	แผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1	แผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2
0.05	0	0.05	0



รูปที่ 3.15 กระบวนการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้า

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานจะแสดงถึงผลการจำลองในซอฟต์แวร์ Ansys และแสดงผลการทดลองด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้า

#### 4.1 ผลการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้ซอฟต์แวร์

##### Ansys

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys

ของสารละลาย

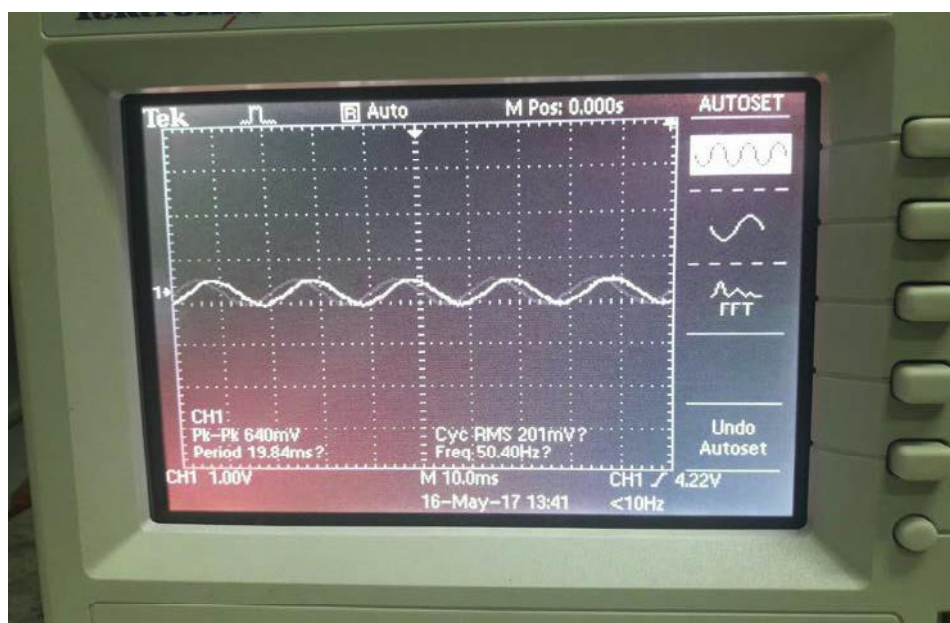
ชนิดของสารละลาย	ตำแหน่งของอิเล็กโทรดจุดที่ 1			ตำแหน่งของอิเล็กโทรดจุดที่ 2			ผลต่างแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
	ตำแหน่งโหนด	ตำแหน่ง (x,y,z)	ค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์ต่อเมตร)	ตำแหน่งโหนด	ตำแหน่ง (x,y,z)	ค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	
น้ำดื่ม	1137	(5,7,3)	281.98	1046	(5,7,12)	239.8	42.18
น้ำเกลือ	1137	(5,7,3)	0.70658	1046	(5,7,12)	1.0613	0.35472
น้ำโคลน	1137	(5,7,3)	15.656	1046	(5,7,12)	6.0703	9.5857
เลือด	1137	(5,7,3)	2.6724	1046	(5,7,12)	2.524	0.1484



ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์

ชนิดของสารละลาย	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)
น้ำดื่ม	843.6
น้ำโคลน	191.714
น้ำเกลือ	7.0944
เลือด	2.968

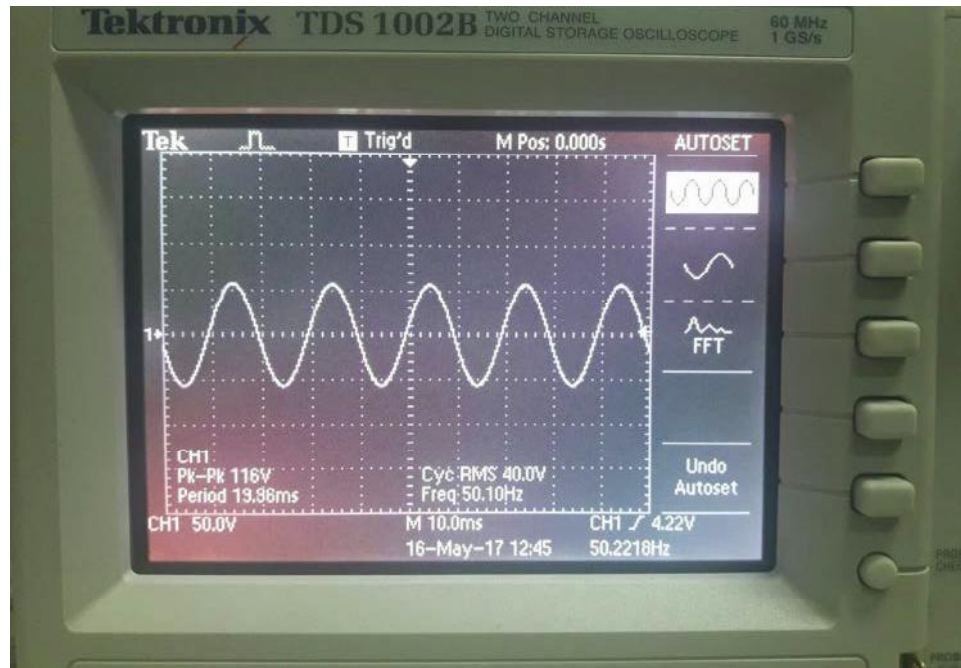
#### 4.1.1 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของน้ำเกลือ



รูปที่ 4.1 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำเกลือ

จากจอภาพในรูป 4.1 มี  $V_{rms} = 201 \text{ mV}$

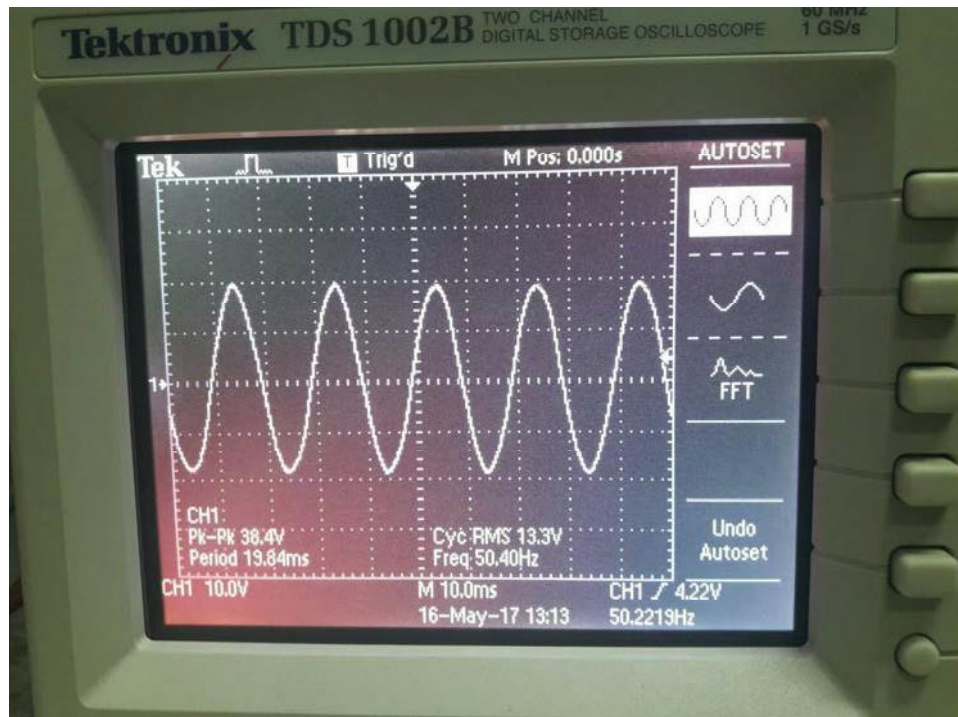
#### 4.1.2 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของน้ำดื่ม



รูปที่ 4.2 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำดื่ม

จากจอภาพในรูป 4.2 มี  $V_{rms} = 40 \text{ V}$

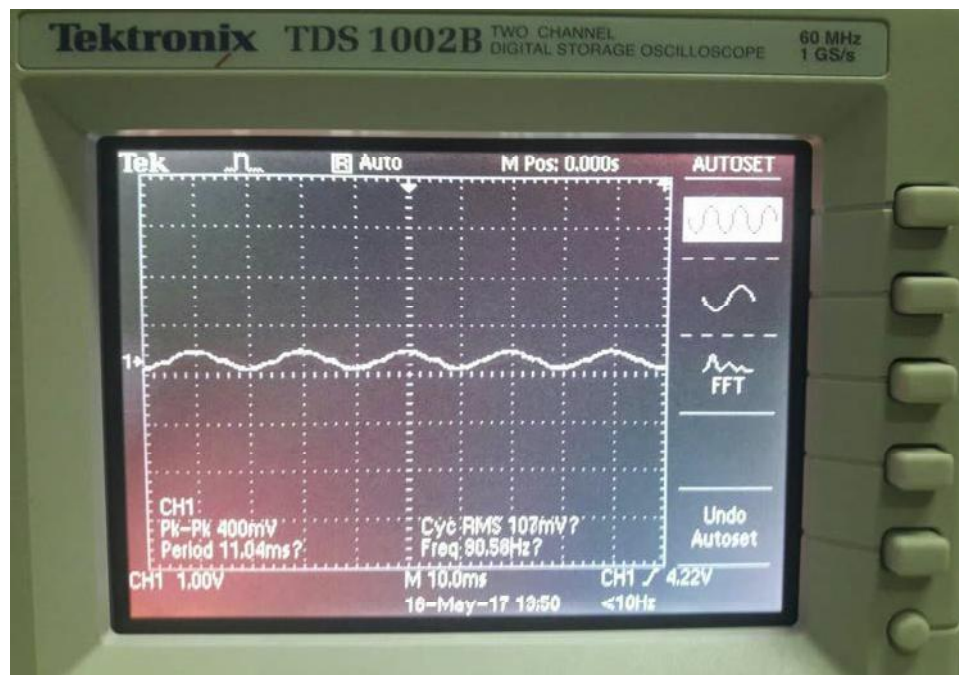
#### 4.1.3 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของน้ำโคลน



รูปที่ 4.3 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของน้ำโคลน

จากจอภาพในรูป 4.3 มี  $V_{rms} = 13.3 \text{ V}$

#### 4.1.4 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของเลือด



รูปที่ 4.4 จอภาพแสดงแรงดันไฟฟ้าของเลือด

จากจอภาพในรูป 4.4 มี  $V_{rms} = 107 \text{ mV}$

#### 4.2 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างการทดลองจริง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างการทดลองจริง

ชนิดสารละลาย	ตำแหน่งอิเล็กโทรดจุดที่ 1 และจุดที่ 2	ค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
น้ำดื่ม	(5,7,3) และ (5,7,12)	40
น้ำเกลือ	(5,7,3) และ (5,7,12)	0.201
น้ำโคลน	(5,7,3) และ (5,7,12)	13.3
เลือด	(5,7,3) และ (5,7,12)	0.107

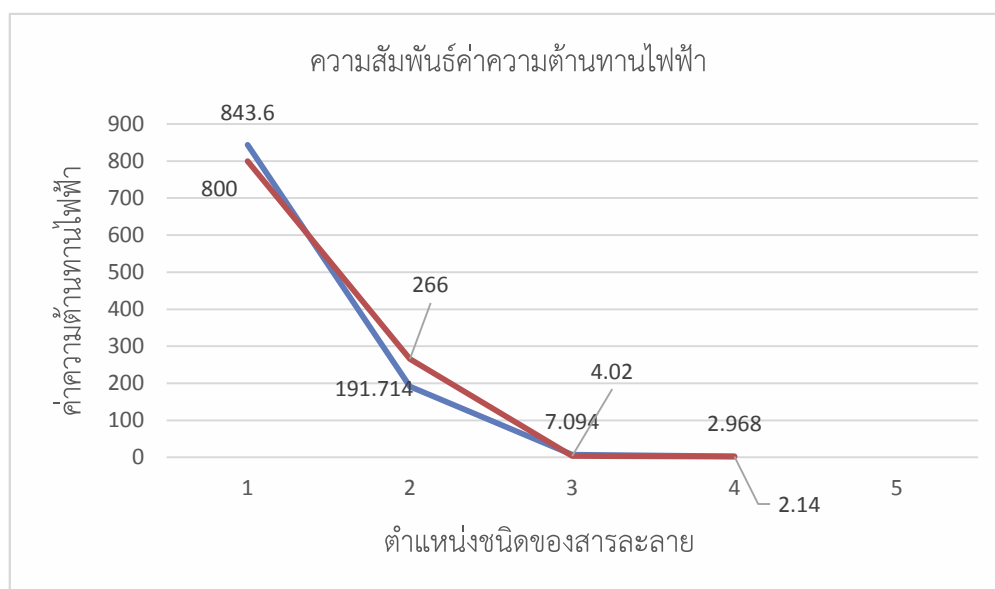
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจริง

ชนิดสารละลาย	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)
น้ำดื่ม	800
น้ำโคลน	266
น้ำเกลือ	4.02
เลือด	2.14

ตารางที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดลอง

ชนิดสารละลาย	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
น้ำดื่ม	5
น้ำเกลือ	43
น้ำโคลน	38
เลือด	27.89

#### 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างค่าความต้านทานจากซอฟต์แวร์และการทดลองจริง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์และการทดลองจริง

คำอธิบายของกราฟ

เส้นตรงสีฟ้า	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์
เส้นตรงสีส้ม	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจากการทดลองจริง
ตำแหน่งที่ 1	คือ น้ำดื่ม
ตำแหน่งที่ 2	คือ น้ำโคลน
ตำแหน่งที่ 3	คือ น้ำเกลือ
ตำแหน่งที่ 4	คือ เลือด

#### 4.4 วิเคราะห์ผลจากกราฟ

จากกราฟที่ได้จะพบว่าที่ความสัมพันธ์ความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและการทดลอง ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเป็นสมการเส้นตรง (linear) แต่ค่าในการทดลองอาจไม่ตรงกับแบบจำลอง เพราะมีค่าชดเชยอันเกิดจากผลของอิเล็กทรอนิกส์ เพราะในไฟไนต์อีลิเมนต์ไม่ได้ใส่ผลกระทบนี้ มีปัจจัยบางอย่างที่ไม่ได้ใส่ในไฟไนต์อีลิเมนต์ และค่าแรงดันไฟฟ้าในการทดลอง อาจมีค่ามากกว่าในไฟไนต์อีลิเมนต์ เพราะในไฟไนต์อีลิเมนต์พยายามหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimize) เพื่อให้ค่าแรงดันต่ำสุด แต่ในที่นี้การทดลองกับแบบจำลองเป็นค่าคงที่ ค่าชดเชยของน้ำดื่มมีค่าเท่ากับ 43.6 ค่าชดเชยของน้ำเกลือมีค่าเท่ากับ 1.9664 ค่าชดเชยของน้ำโคลนมีค่าเท่ากับ 74.286 ค่าชดเชยของเลือดมีค่าเท่ากับ 5.026 ซึ่งมันเกิดขึ้นจริงในการทดลอง แต่เป็นค่าคงที่ที่ยอมรับได้

นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากผลการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำโดยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys และผลการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างการทดลองจริงมาคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าและนำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ได้ดังตารางที่ 4.5 ของสารละลายทั้ง 4 ชนิดซึ่งเหตุผลที่นำสารละลายทั้ง 4 ชนิดคือ น้ำดื่ม น้ำเกลือ น้ำโคลนและเลือดถูกเลือกนำมาใช้ในการทดลองนี้เพื่อให้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของเทคนิคการนำไฟฟ้าเพื่อแสดงให้เห็นว่าสารละลายแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแตกต่างกันและในอนาคตเพื่อการพัฒนาการทดสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าให้มีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้นสิ่งที่เป็นไปได้คือการนำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของน้ำมาเปรียบเทียบกับค่า PH มาตรฐานของน้ำ

สรุปคือผลของค่าความต้านทานที่ได้จากในซอฟต์แวร์และการทดลองจริงเป็นไปตามทฤษฎีและแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้า เพื่อใช้ในการพัฒนาออกแบบเซนเซอร์ทดสอบคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้า เพื่อความรวดเร็วของการแสดงค่าคุณภาพน้ำตลอดเวลาและเป็นการสร้างองค์ความรู้เพื่อพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยีทางการทดสอบคุณภาพน้ำ กล่าวคือการนำค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่า PH มาตรฐานของน้ำ เนื่องจากการตรวจสอบค่า PH ของน้ำทางเคมีมีความไม่ต่อเนื่องในการแสดงผลของการทดสอบคุณภาพน้ำซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป โดยการออกแบบการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำด้วยซอฟต์แวร์ Ansys และทดสอบคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้าจากการสร้างการทดลองจริง สำหรับการจำลองการทดสอบคุณภาพน้ำเมื่อกระแสคงที่ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากซอฟต์แวร์และการทดลองจริงของสารละลายต่างชนิดกันมีค่าที่แตกต่างกันและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ผลการทดสอบสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าเมื่อกระแสคงที่ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าจากซอฟต์แวร์ของสารละลายแต่ละชนิด ได้แก่ น้ำดื่ม น้ำโคลน น้ำเกลือและเลือด มีค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกันซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเทคนิคการนำไฟฟ้า เมื่อทำการเปรียบเทียบเรียงลำดับค่าแรงดันไฟฟ้าจากมากไปน้อยจะได้ดังนี้คือ น้ำดื่ม น้ำโคลน น้ำเกลือ และเลือด

จากการทดลองจากแบบจำลองจริงพบว่าเมื่อกระแสคงที่ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายคือ น้ำดื่ม น้ำเกลือ น้ำโคลนและน้ำเลือดมีค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันเป็นไปตามทฤษฎีเทคนิคการนำไฟฟ้า เมื่อทำการเปรียบเทียบเรียงลำดับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าจากมากไปน้อยจะได้ดังนี้คือ น้ำดื่ม น้ำโคลน น้ำเกลือ และเลือด

จากการทดสอบคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการนำไฟฟ้าระหว่างซอฟต์แวร์และแบบจำลองจริงทำให้สรุปผลการทดลองได้ว่า เมื่อกระแสคงที่ผลการทดลองมีค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

## 5.2 สรุปปัญหาและอุปสรรคในการทำการทดลอง

ในช่วงเริ่มแรกการทดลองการนำค่าการนำไฟฟ้าจากเอกสารอ้างอิงมาใช้กำหนดค่าในซอฟต์แวร์ส่งผลให้ค่าที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน

การเลือกใช้อุปกรณ์ในการทดลองไม่ถูกวิธีในช่วงเริ่มต้นทำให้เกิดข้อผิดพลาด

การเก็บสารละลายบางชนิดให้มีความเหมาะสมก่อนทำการทดลอง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

การทดสอบคุณภาพน้ำจากการทดลองจริงควรจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดให้มีความเสถียรภาพ ควรทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าจากเครื่องวัดเนื่องจากการนำค่าจากเอกสารอ้างอิงมาหาผลเฉลี่ยในซอฟต์แวร์ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่มากกว่าปกติ



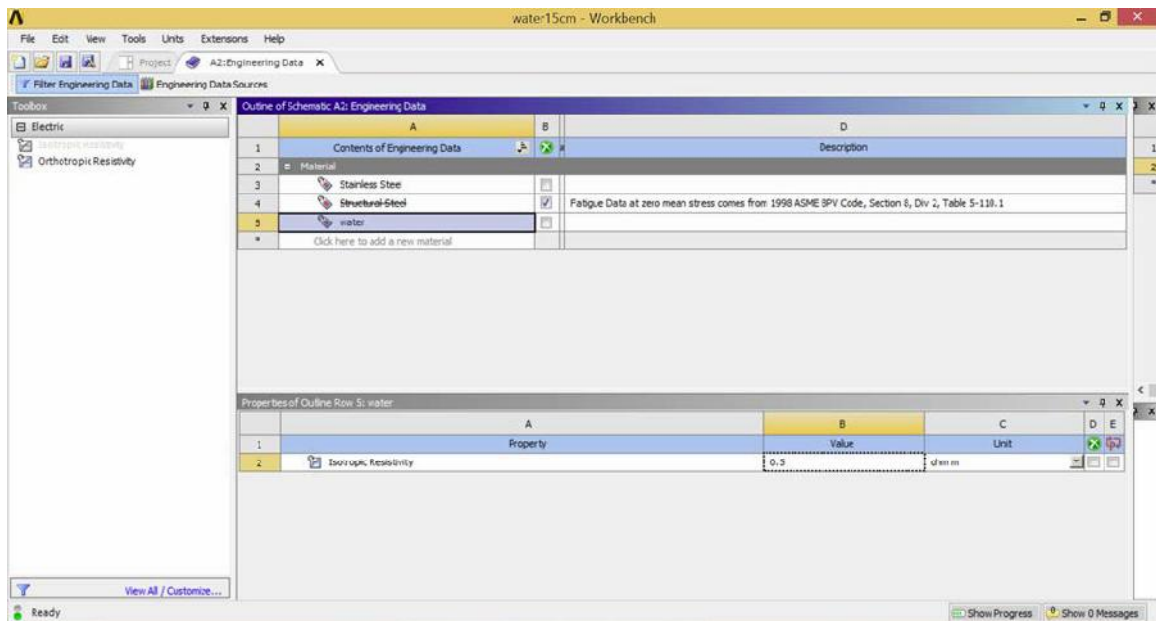
## เอกสารอ้างอิง

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสารคาม. (2558). การตรวจสอบการเจือปนของน้ำในน้ำผิวด้วย  
เซนเซอร์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแกนร่วม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.  
ปีที่10(2):1-8.
- ฐิติมา เอ็งเจริญ. (2554). การวัดสภาพยอมเชิงซ้อนของของเหลวที่ความถี่ไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ วท.ม.  
(เทคโนโลยีทางการศึกษา). คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- รัชชัย ตระกูลเลิศยศ. (2560). น้ำไม่ได้นำไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ มกราคม 2560, จาก  
<http://www.scimath.org/chemistryarticle/6728-2017-03-22-16-31-45>
- นเร ผิวนิม. (2556). การนำไฟฟ้าของสารละลาย. สืบค้นเมื่อ พฤษภาคม 2560, จาก  
<http://www.science.mju.ac.th>
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ,(2542). *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตติกรณ์ เสาร์แดน. (2554). การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่างชนิดในการอิตีเอ็มวัสดุทั้งสเดน  
คาร์ไบด์. วิทยานิพนธ์ วศ.ม (เทคโนโลยีทางการศึกษา). ปทุมธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- สมพร เหล่าทองสาร. (2555). การนำไฟฟ้า (conductivity). โรงเรียนดงบังพิสัยนวการนุสรณ์  
จังหวัดมหาสารคาม. สืบค้นเมื่อ พฤษภาคม 2560, จาก  
<https://www.slideshare.net/somporndb/conductivity-13933943>
- แหล่งจ่ายไฟฟ้า. (2559) แหล่งจ่ายไฟฟ้า สืบค้นเมื่อ มกราคม 2560, จาก  
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B8%88%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B9%84%E0%B8%9F>
- Nuturft specialists providing solutions. Interpretation of water analysis for irrigation.  
Retrieved April 1, 2017, from [http://qtpa.com.au/wp-content/uploads/2012/02/02/Interpretation\\_FACTSHEET\\_2010.pdf](http://qtpa.com.au/wp-content/uploads/2012/02/02/Interpretation_FACTSHEET_2010.pdf).

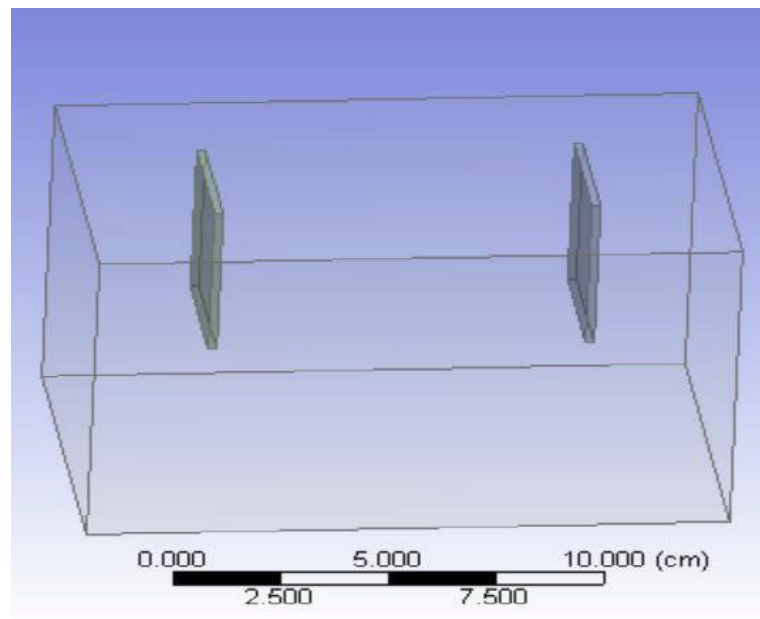
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

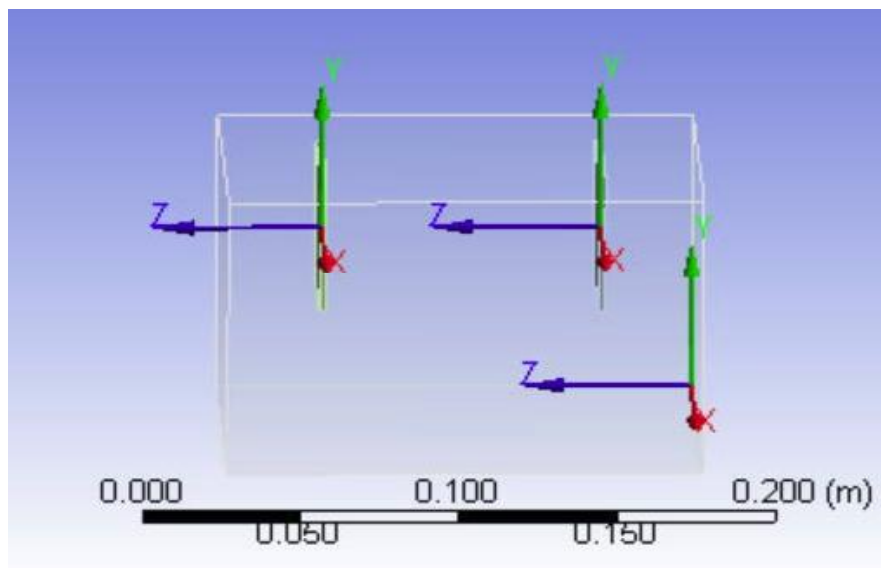
ผลการจำลองการนำไฟฟ้าโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys ของน้ำ



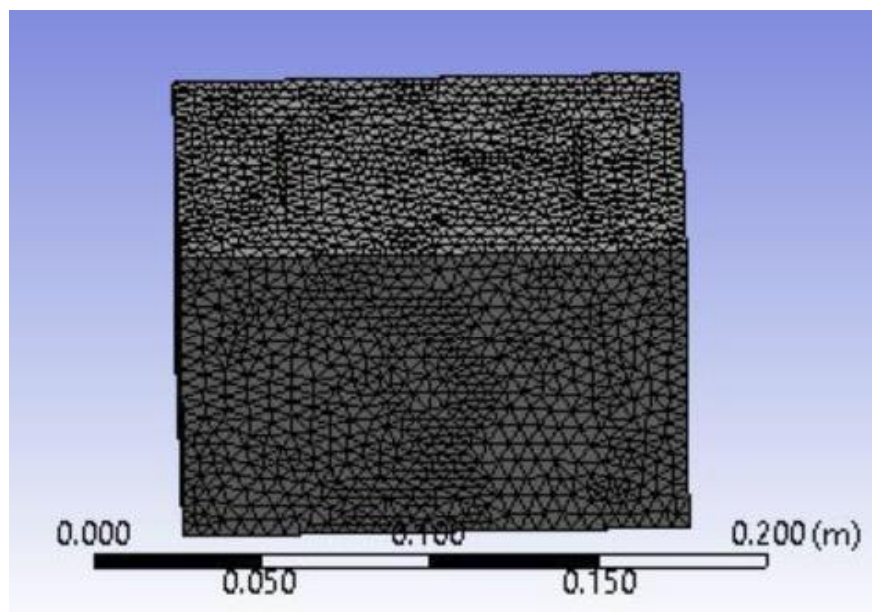
รูปที่ 1 กำหนดค่าสภาพต้านทานทานไฟฟ้าของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.5 ohm/m



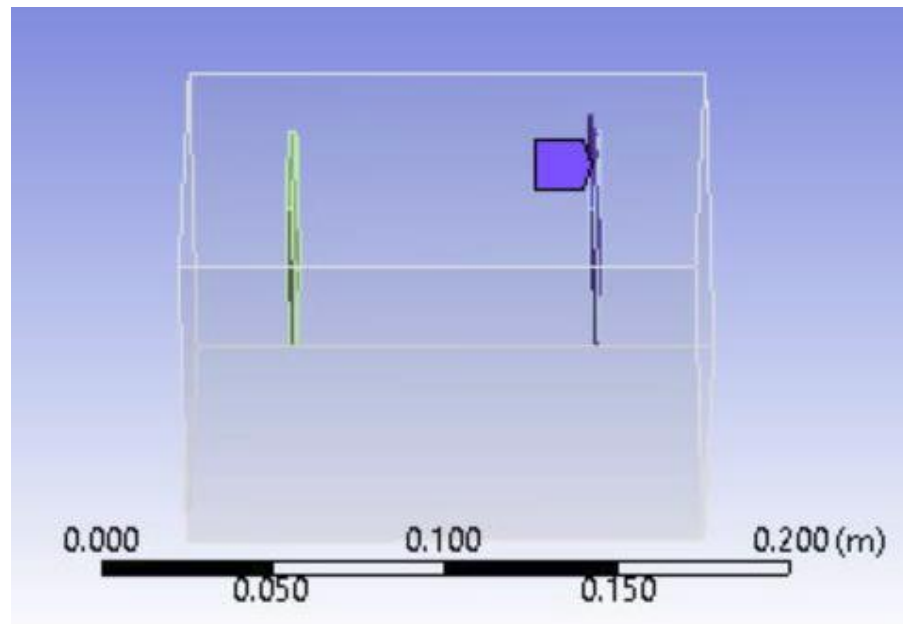
รูปที่ 2 สร้างรูปเรขาคณิตสี่เหลี่ยม



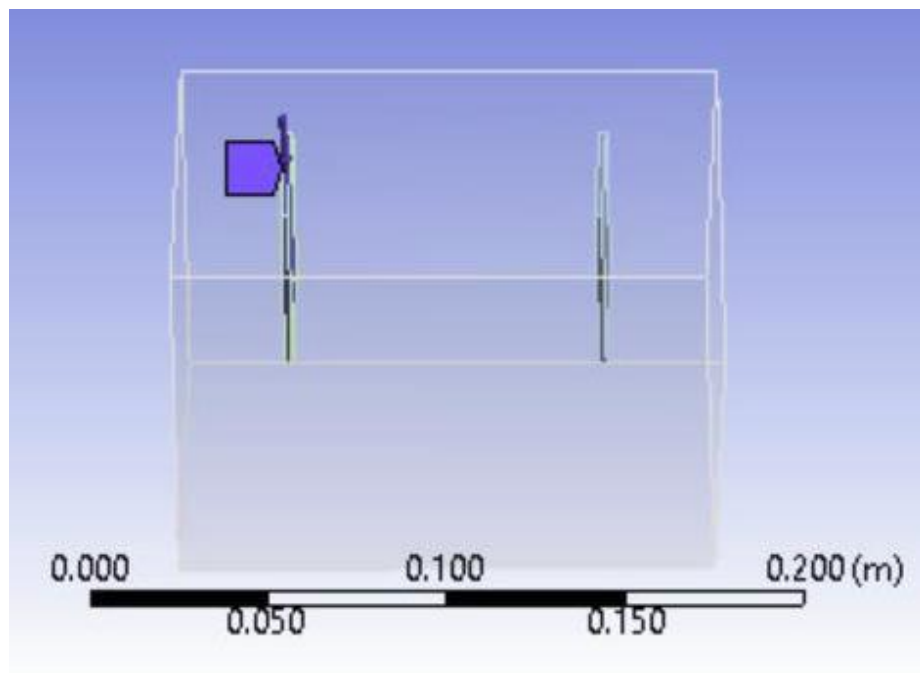
รูปที่ 3 กำหนดจุดโคออดิเนต



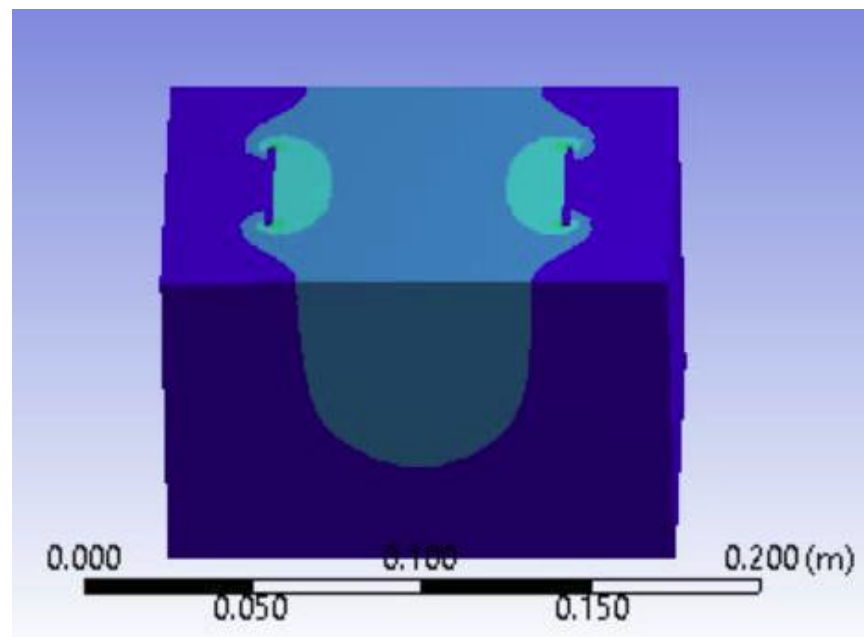
รูปที่ 4 ทำการ generate mesh และกำหนดค่าขนาด mesh เท่ากับ 0.005 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1 เท่ากับ 0.005 แอมแปร์

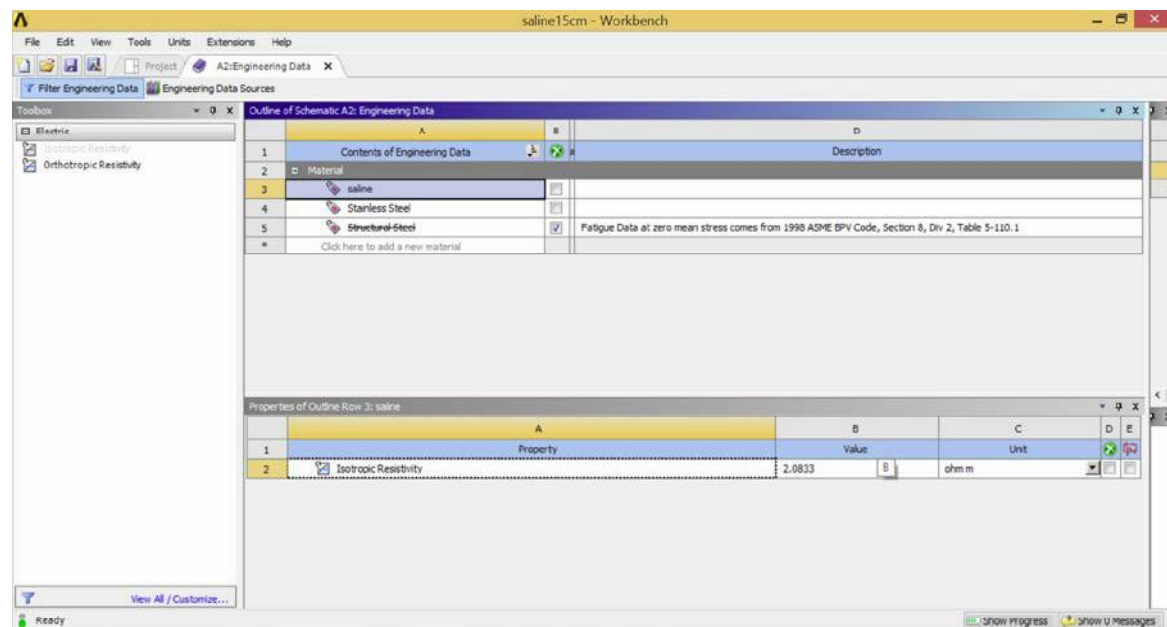


รูปที่ 6 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2 เท่ากับ 0 แอมแปร์

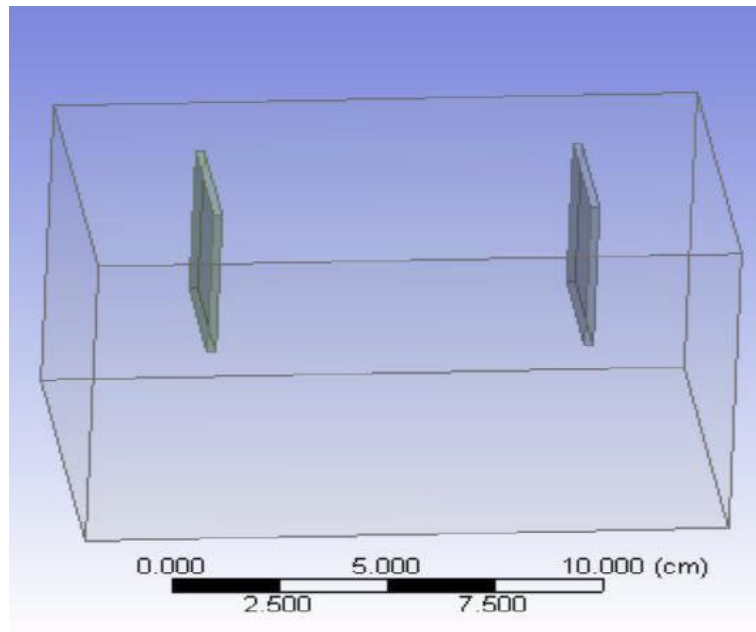


รูปที่ 7 ทำการหาผลเฉลยของค่าแรงดัน

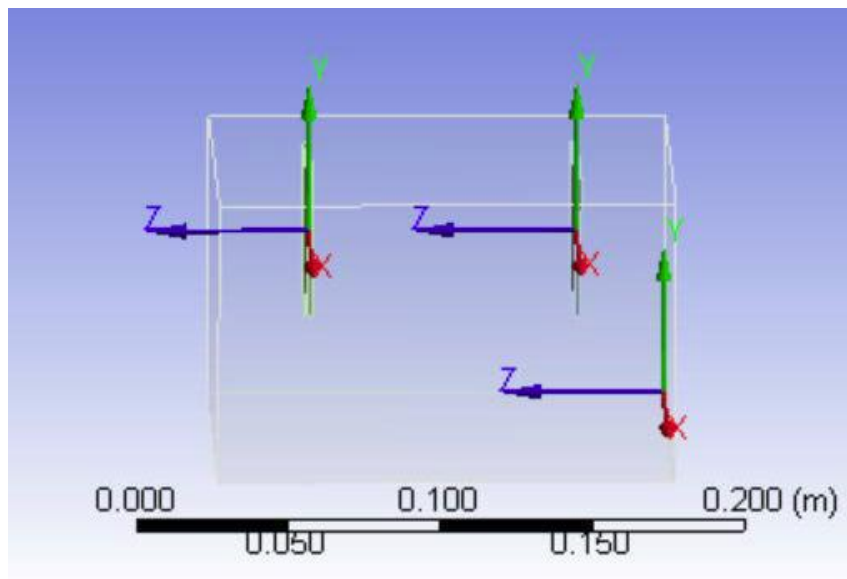
ผลการจำลองการนำไฟฟ้าโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys ของน้ำเกลือ



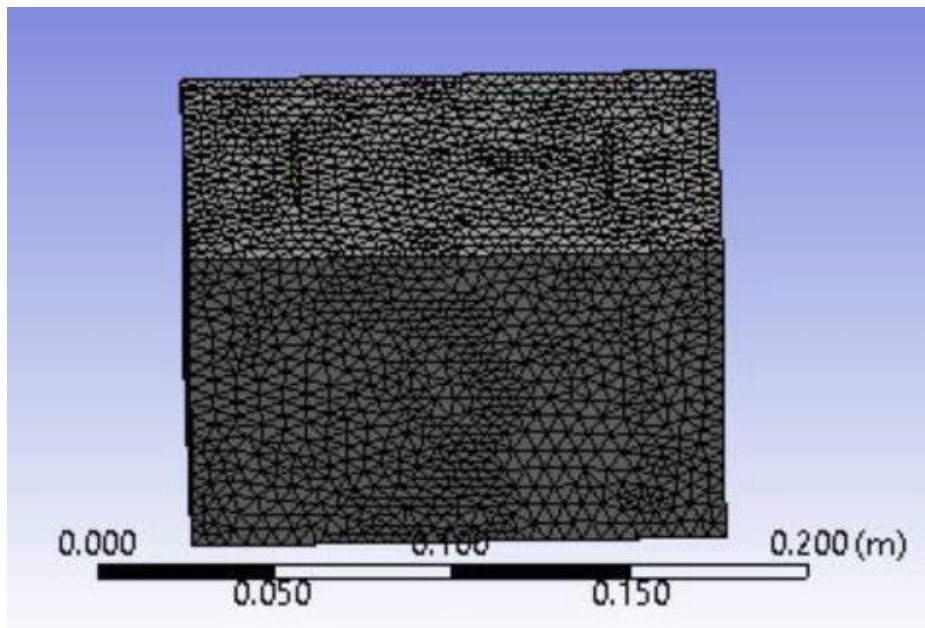
รูปที่ 8 กำหนดค่าสภาพต้านทานทานไฟฟ้าของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.0833 ohm/m



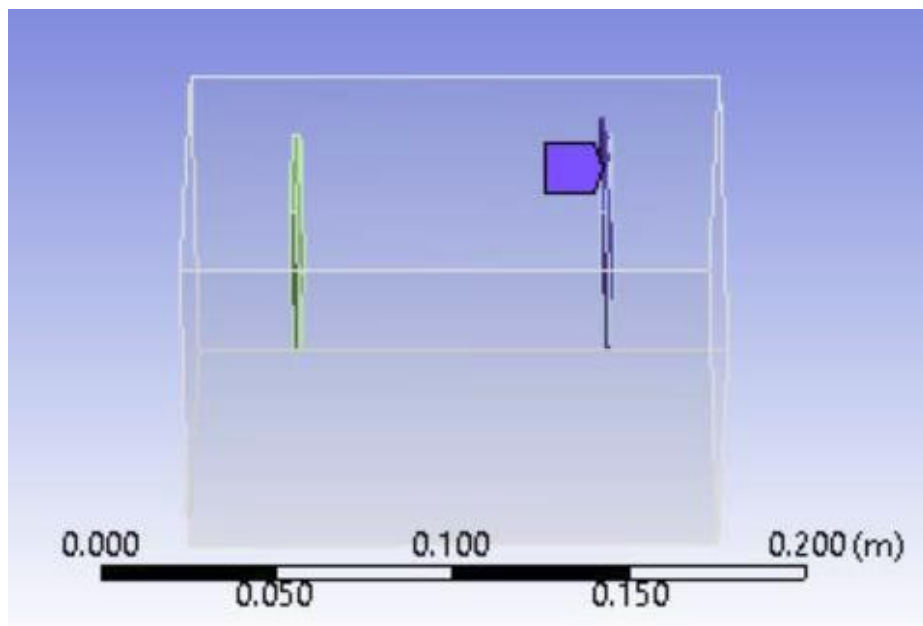
รูปที่ 9 สร้างรูปทรงเรขาคณิตกล่องสี่เหลี่ยม



รูปที่ 10 กำหนดจุดโคออดิเนต

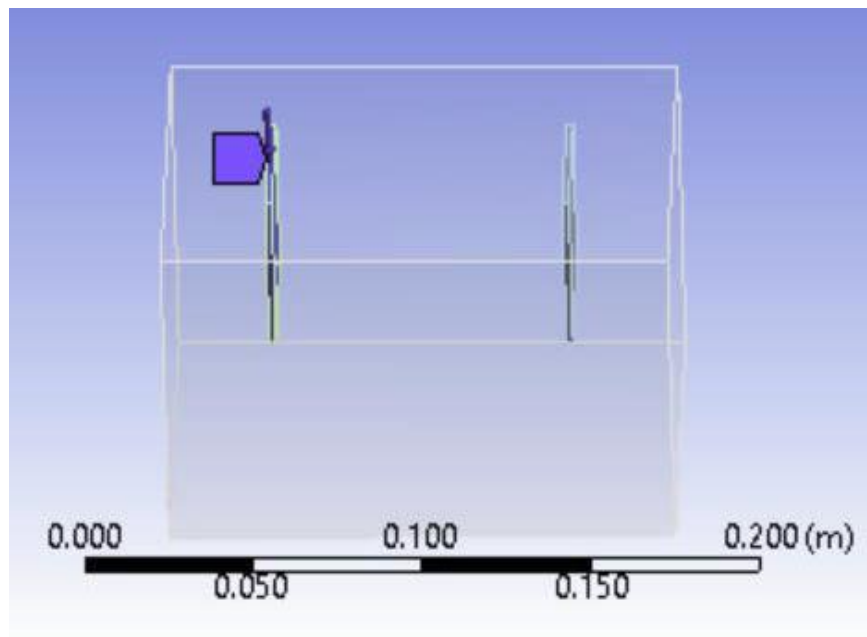


รูปที่ 11 ทำการ generate mesh และกำหนดค่าขนาด mesh เท่ากับ 0.005 มิลลิเมตร

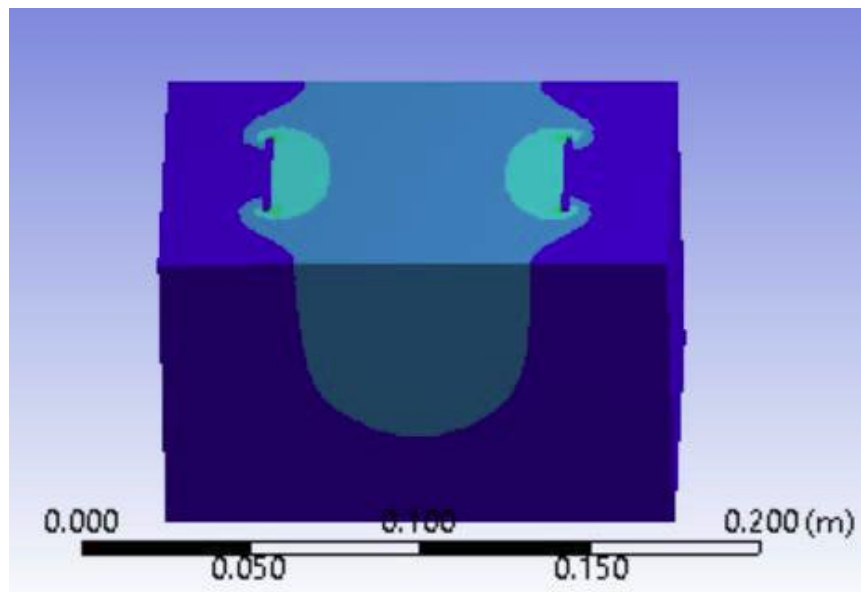


รูปที่ 12 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1 เท่ากับ 0.005 แอมแปร์



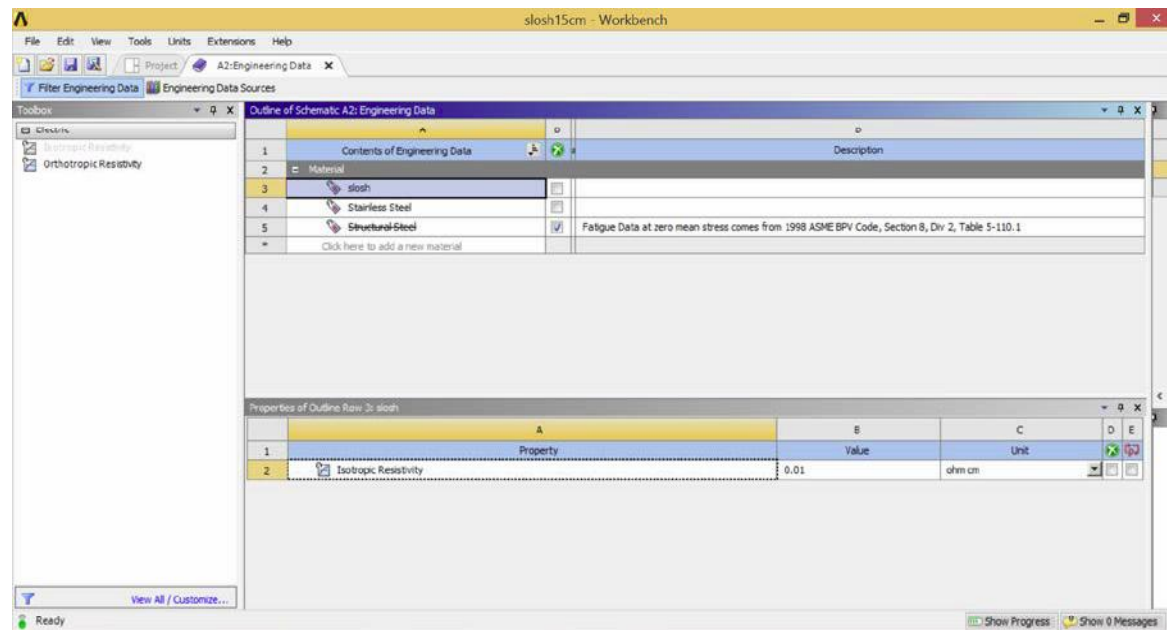


รูปที่ 13 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2 เท่ากับ 0 แอมแปร์

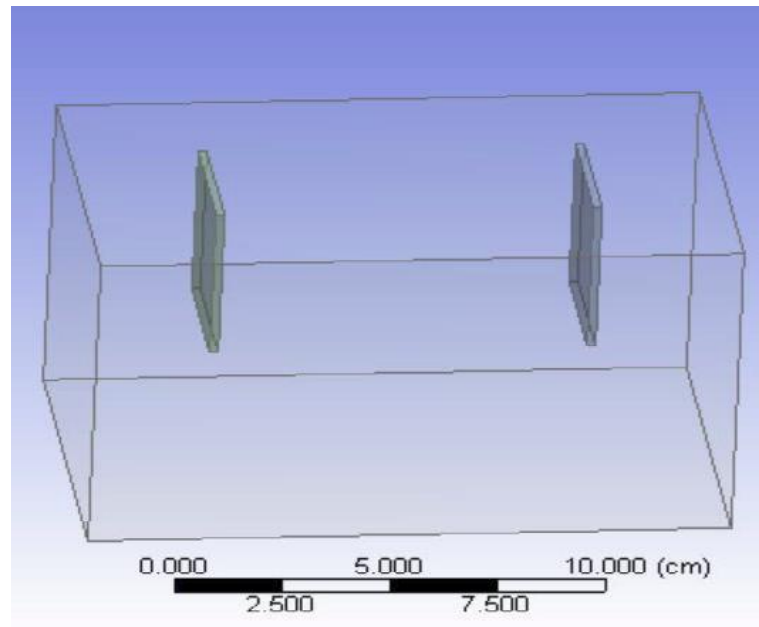


รูปที่ 14 ทำการหาผลเฉลยของค่าแรงดัน

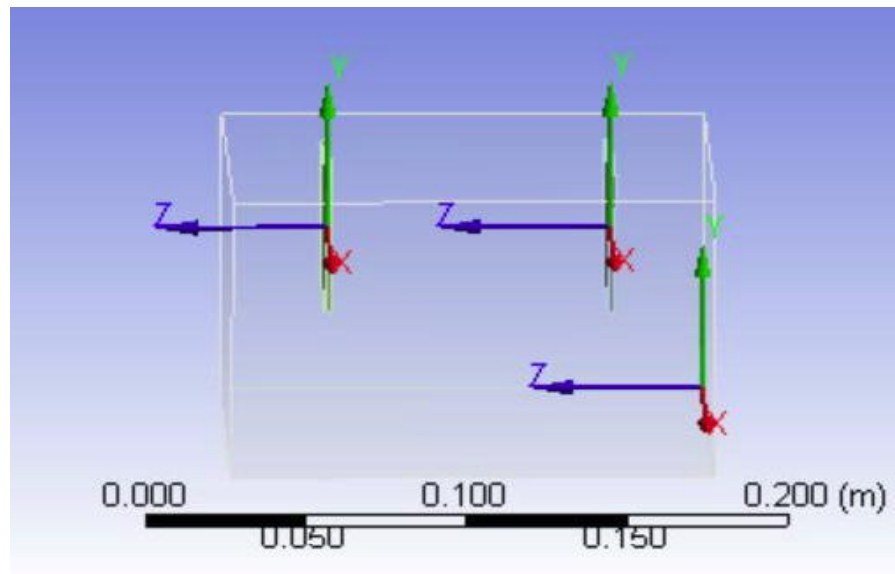
## ผลการจำลองการนำไฟฟ้าโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys ของน้ำโคลน



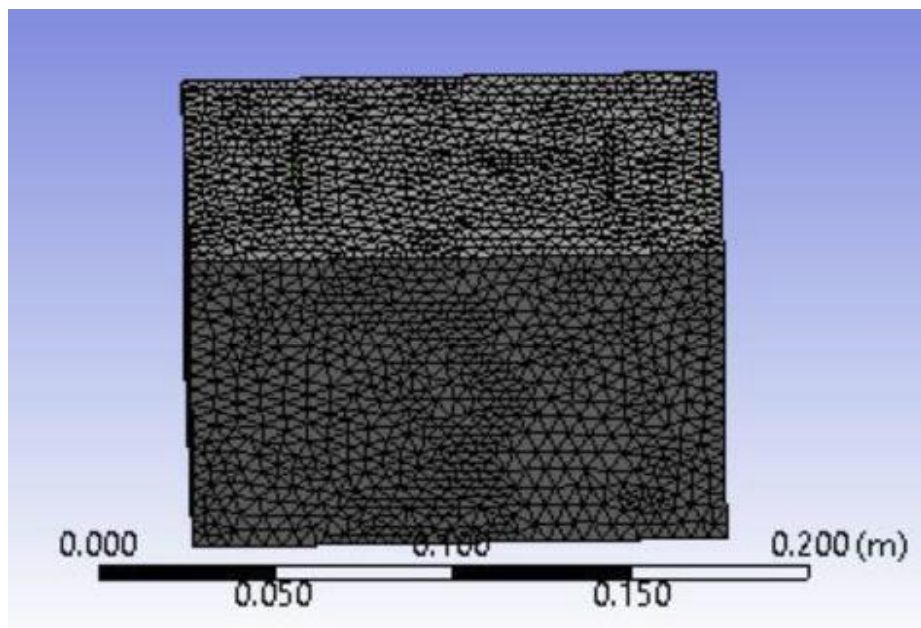
รูปที่ 15 กำหนดค่าสภาพต้านทานทานทางไฟฟ้าของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.01 ohm/m



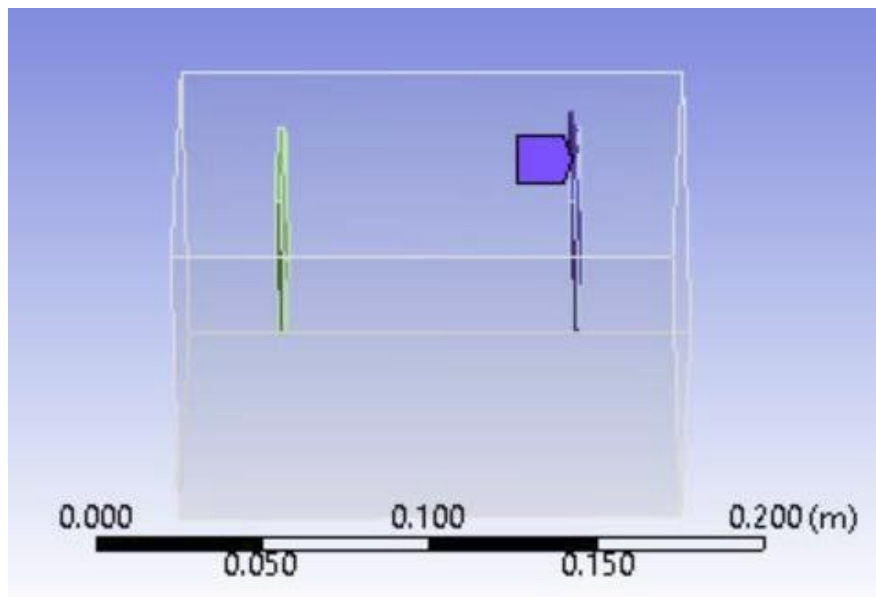
รูปที่ 16 สร้างรูปทรงเรขาคณิตกล่องสี่เหลี่ยม



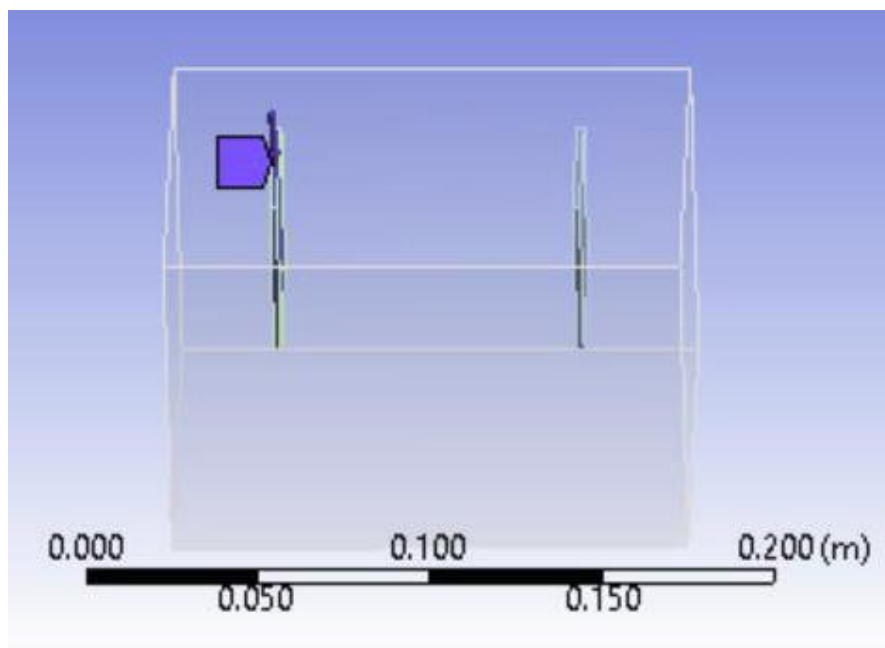
รูปที่ 17 กำหนดจุดโคออดิเนต



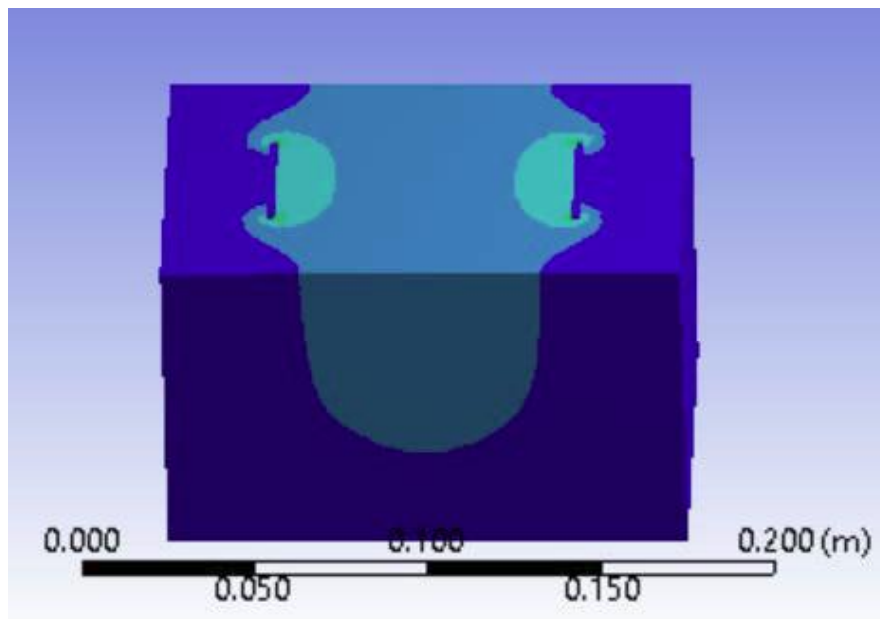
รูปที่ 18 ทำการ generate mesh และกำหนดค่าขนาด mesh เท่ากับ 0.005 มิลลิเมตร



รูปที่ 19 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1 เท่ากับ 0.005 แอมแปร์



รูปที่ 20 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2 เท่ากับ 0 แอมแปร์



รูปที่ 21 ทำการหาผลเฉลี่ยของค่าแรงดัน

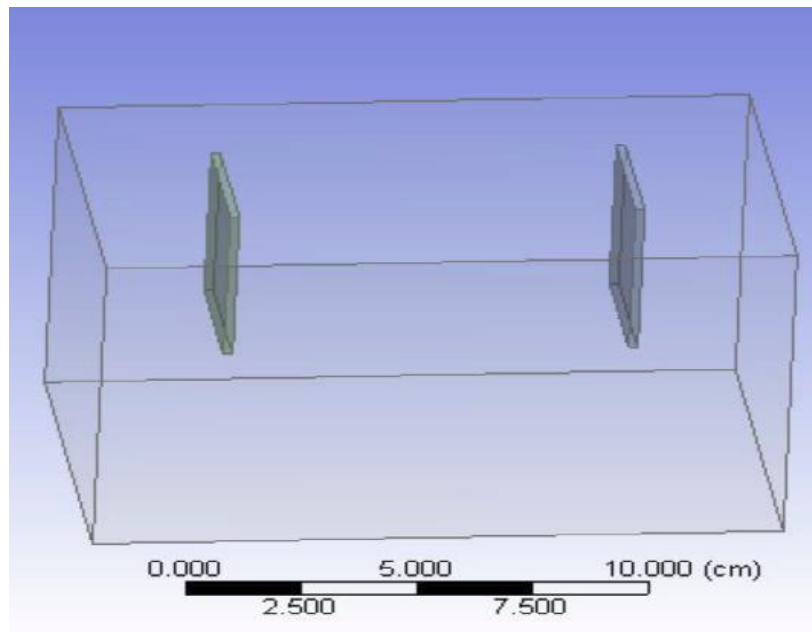
ผลการจำลองการนำไฟฟ้าโดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys ของเลือด

Outline of Schematic A2: Engineering Data		
1	Contents of Engineering Data	Description
2	Material	
3	blood	
4	Stainless Steel	
5	Structural-Steel	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	Structural-Steel-2	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
7	Structural-Steel-3	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material	

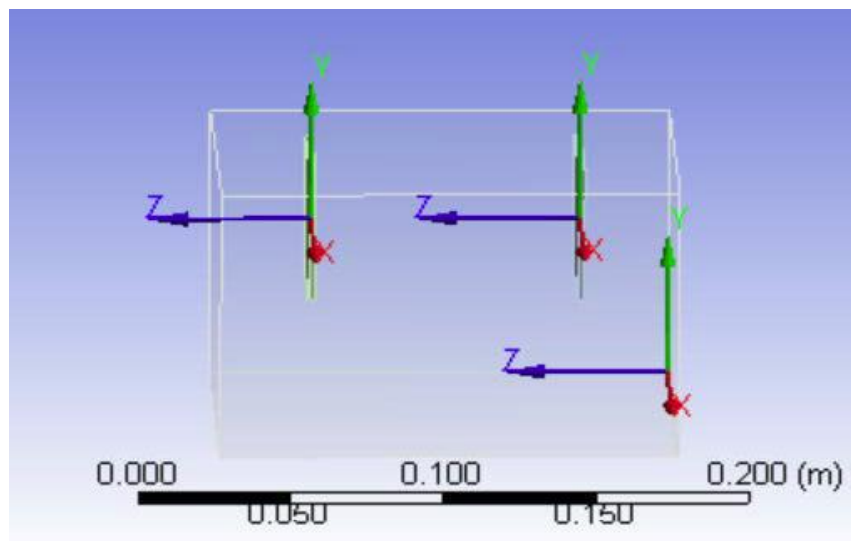
  

Properties of Outline Row 3: blood			
1	Property	Value	Unit
2	Isotropic Resistivity	0.000813	ohm cm

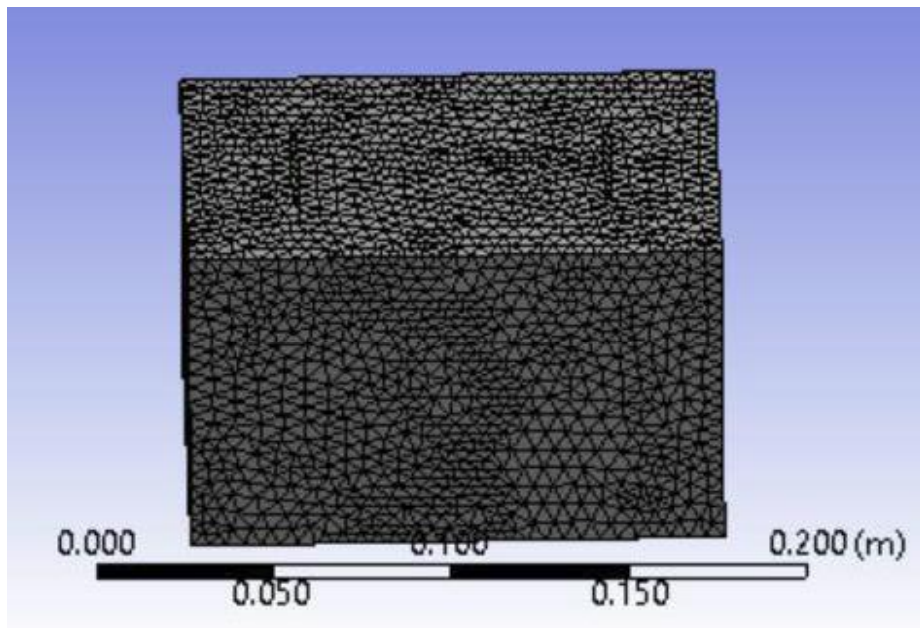
รูปที่ 22 กำหนดค่าสภาพต้านทานทานไฟฟ้าของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.000813 ohm/m



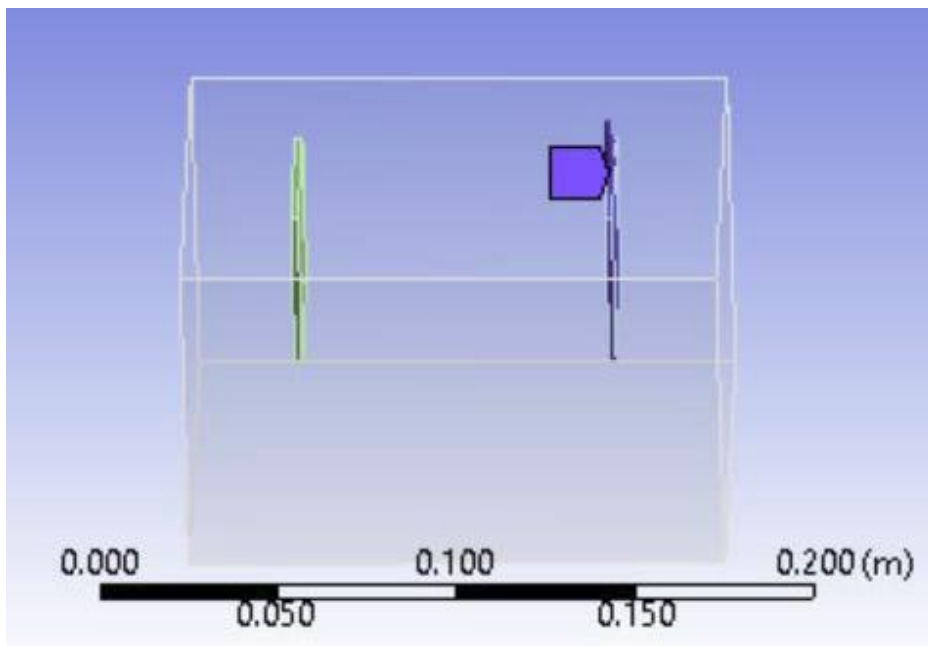
รูปที่ 23 สร้างรูปทรงเรขาคณิตกล่องสี่เหลี่ยม



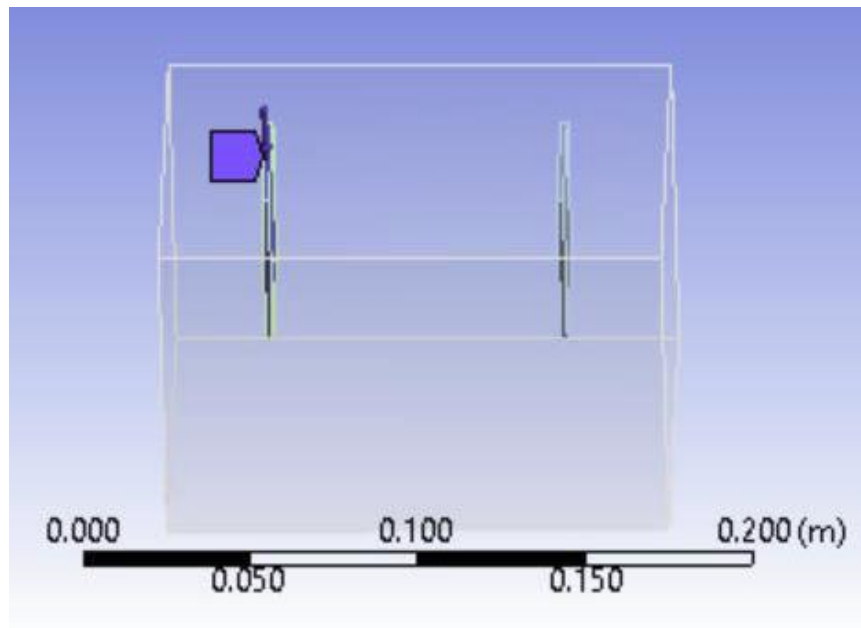
รูปที่ 24 กำหนดจุดโคออดิเนต



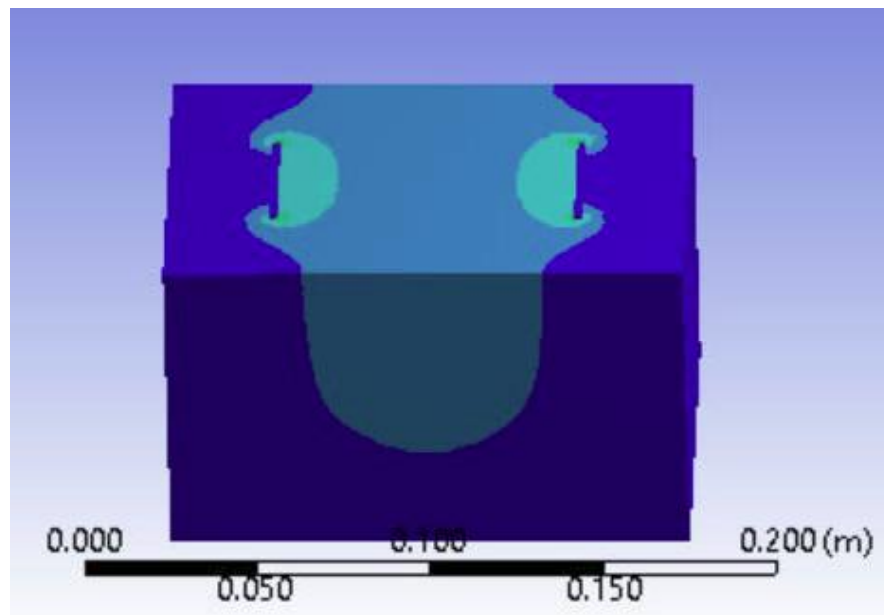
รูปที่ 25 ทำการ generate mesh และกำหนดค่าขนาด mesh เท่ากับ 0.005 มิลลิเมตร



รูปที่ 26 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 1 เท่ากับ 0.005 แอมแปร์



รูปที่ 27 กำหนดค่ากระแสให้กับแผ่นสแตนเลสแผ่นที่ 2 เท่ากับ 0 แอมแปร์



รูปที่ 28 ทำการหาผลเฉลยของค่าแรงดัน



## การทดลองจริง



รูปที่ 29 การทดลองของน้ำดื่ม



รูปที่ 30 การทดลองของน้ำโคลน



รูปที่ 31 การทดลองของน้ำเกลือ



รูปที่ 32 การทดลองของเลือด

ผลการวัดค่า conductivity เพื่อนำไปคำนวณหาค่า resistivity โดยใช้เครื่องมือวัดการทดสอบคุณภาพน้ำแบบพกพา



รูปที่ 33 วัดค่า conductivity ของน้ำดื่ม



รูปที่ 34 วัดค่า conductivity ของน้ำโคลน



รูปที่ 35 วัดค่า conductivity ของน้ำเกลือ



รูปที่ 36 วัดค่า conductivity ของเลือด

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

## ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล

นายณัฐพล วงศ์มงคล

วันเดือนปีเกิด

4 กรกฎาคม 2537

สถานที่เกิด

อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

76 หมู่ที่ 9 ตำบล วัดป่า อำเภอหล่มสัก

จังหวัด เพชรบูรณ์ 67110

หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ

062-939-5984

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555

มัธยมศึกษาปีที่ 6

จากโรงเรียนหล่มสักวิทยาคม

พ.ศ. 2560

กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



## ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล

นางสาวเจริญศรี ดวงแก้ว

วันเดือนปีเกิด

18 เมษายน 2538

สถานที่เกิด

อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

353/79 หมู่บ้านเดอะคอนเนค 7/1

ข.สีกัน ข.ดอนเมือง

จ.กรุงเทพฯ 10210

หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ

088-507-6008

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555

มัธยมศึกษาปีที่ 6

จากโรงเรียนดอนเมืองทหารอากาศบำรุง

พ.ศ. 2560

กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

