การออกแบบตัวตรวจรู้จากหลักการเก็บประจุโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเป็นกรณีศึกษา

DESIGN OF CAPACITIVE METHOD-BASE SENSOR : A CASE CHEMICAL CONCENTRATION

นที ทองอุ่น
NATEE THONG-UN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

การออกแบบตัวตรวจรู้จากหลักการเก็บประจุโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเป็นกรณีศึกษา

DESIGN OF CAPACITIVE METHOD – BASE SENSOR : A CASE CHEMICAL CONCENTRATION

นที ทองอุ่น

NATEE THONG - UN

เลขหมู่.....................................
เลขทะเบียน.......74420.......
วัน,เดือน,ปี.......28 ก.ย. 2550.......

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

DESIGN OF CAPACITIVE METHOD – BASE SENSOR : A CASE CHEMICAL CONCENTRATION

NATEE THONG - UN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2007

COPYRIGHT 2007
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวตรวจรู้จากหลักการเก็บประจุโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายเป็นกรณีศึกษา
นักศึกษา	นายนที ทองอุ่น
รหัสนักศึกษา	48060808
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.วิศรุต ศรีรัตนะ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอสมการจากวงจรสมมูลไฟฟ้า ที่ได้จากการออกแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายทางเคมี โดยเน้นถึงความประหยัดและมีความน่าเชื่อถือ อุปกรณ์ Sensor ที่ได้ออกแบบขึ้นนั้นมีโครงสร้างเป็นลักษณะตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานชนิดสแตนเลสและทองแดงเคลือบด้วยไนลอน ที่มีความหนาเฉลี่ย 0.4 mm ในขณะที่แผ่นโลหะดังกล่าวทั้งสองถูกยึดติดด้วยเรซิ่น เพื่อกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองคงที่ 2.5 และ 5 mm (0.18 และ 0.36 เท่าของความกว้างของแผ่นตัวนำ) การเปลี่ยนแปลงค่าความจุที่ได้จากการตรวจวัดสารละลาย จะนำไปเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐาน ยี่ห้อ Good Will รุ่น CTR ที่มีย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz ถึง 2 kHz ซึ่งจากการทดสอบอุปกรณ์ Sensor ที่ได้ออกแบบขึ้นมากับสารละลายชนิดเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นตั้งแต่ 5% ถึง 95% และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นครั้งละ 10% ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง 23 ^{o}C

Thesis	Design of Capacitive Method – Base Sensor : A Case of Chemical Concentration
Student	Mr. Natee Thong - un
Student ID.	48060808
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst.Prof.Witsarut Sriratana

ABSTRACT

This thesis proposes the equations from equivalent circuits are obtained by the design of the sensors for measuring the concentrate of chemical solution regarding to economy and reliability reasons. The designed sensor consists of 2 parallel electrode plates (Stainless and Copper types) that are coated with 4 mm. Nylon and fixed together by Resin with 2.5 and 5 mm gap (0.18 and 0.36 times of the electrode width). The change of the solution capacity will be compared with the electric circuit that is obtained from the Good Will standard R-L-C instrument, model CTR, at the 100Hz – 2 kHz of frequency range. From the experiments, it was found that the sensor designed for Ethyl Alcohol solution at 5% - 95% of concentrate with the 10% change interval, at 23 ^{O}C of room temperature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และการช่วยเหลือต่างๆจาก ผศ.วิศรุต ศรีรัตนะ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.จิระศักดิ์ ชาญวุฒิธรรรม ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้โอกาสและสนับสนุนในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ให้ยืมเครื่องมือวัดมาใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ที่ศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่เป็นแรงบันดาลใจในการศึกษา และอยู่เคียงข้างเสมอมาในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นที ทองอุ่น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……………………………………………………………………………..I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…..……………………………………………………………………..II

กิตติกรรมประกาศ…...………...………………………………………………...…………..III

สารบัญ………...………………...……………………………………………………...IV

สารบัญตาราง…………………………………………………………………………….. VII

สารบัญรูป…………………………………………………………………………....…VIII

บทที่ 1 บทนำ……………………………………………………………………………..1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา………………...…………………...…......1

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา…………...……………………..... ...2

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา………………...……………………………………...……2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย……………………..…………………......2

1.5 ขอบเขตการวิจัย…………………………………………...……..…………...5

1.6 ขั้นตอนการศึกษา………………………………………………………………… 5

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง......................………………………………....6

2.1 ทฤษฎีตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน..6

2.1.1 ในกรณีมีวัสดุระหว่างแผ่นระนาบของระบบซ้อนกัน.......................................8

2.1.2 ในกรณีมีวัสดุเป็นแผ่นระนาบวางขนานในระบบ..9

2.2 ผลกระทบ Fringing Field ของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน....................................10

2.3 คุณลักษณะทางกายภาพของไดอิเล็คตริกภายในตัวเก็บประจุ..................................13

2.4 ความไม่เป็นอุดมคติของตัวเก็บประจุไฟฟ้า..16

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างหัววัด...20

3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างหัววัด...20

3.2 ขั้นตอนการทดสอบหัววัดในสภาวะบรรยากาศห้องทดลอง.......................................22

3.3 ขั้นตอนการทดสอบหัววัดในสภาวะความเข้มข้นสารละลาย.......................................22

3.3.1 ประเด็นเรื่องสัดส่วนระยะห่างต่อความกว้างของแผ่นตัวนำ..........................23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 ประเด็นเรื่องผลตอบสนองความถี่ต่อความจุไฟฟ้า..23

3.3.3 ประเด็นเรื่องผลตอบสนองค่าความเข้มข้นต่อความจุไฟฟ้า..........................23

บทที่ 4 ผลการทดลอง...25

4.1 ผลลัพธ์วงจรสมมูลของหัววัดและการเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณ.......................25

4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและสูตรการแปลงผัน..............................32

4.2.1 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดทองแดงใช้เป็นตัวนำที่ระยะห่าง 5 มม. 33

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดสแตนเลสใช้เป็นตัวนำที่ระยะห่าง 5 มม. ...35

4.2.3 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดทองแดงใช้เป็นตัวนำที่ระยะห่าง 2.5 มม. ...37

4.2.4 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดสแตนเลสใช้เป็นตัวนำที่ระยะห่าง 2.5 มม. 39

4.3 ความสามารถในการซ้ำค่าเดิมของหัววัด...41

4.4 ฟังก์ชั่นของหัววัดจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง..43

4.5 วิจารณ์ผลการทดลอง...45

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ……………………..…………………………...……….…...47

เอกสารอ้างอิง………………………………………………………..……………………………..48

ภาคผนวก...49

ภาคผนวก ก. สมการความสัมพันธ์วงจรสมมูลขนานและอนุกรมของหัววัด..................50

ก.1 สมการของ Curie's Law..51

ก.2 สมการแปลงผันวงจรสมมูลขนานและอนุกรม...52

ภาคผนวก ข. กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าจากสูตรการแปลงผันและจากเครื่องมือวัด..54

ภาคผนวก ค. สมการคำนวณหาค่าความสามารถในการซ้ำค่าเดิมของหัววัด..................72

ภาคผนวก ง. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมภาษาซีที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชั่น............74

ภาคผนวก จ. คุณลักษณะของเครื่องมือวัดทดสอบค่า R-L-C…...……………………...82

ภาคผนวก ฉ. ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์...89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน..96

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ค่าการเก็บประจุของวัสดุประกอบเป็นหัววัดที่คำนวณได้..26
4.2 คุณลักษณะทางสถิติของหัววัดตัวนำประเภททองแดงระยะห่าง 5 มม.ที่ความถี่ 100 Hz……..42
4.3 คุณลักษณะทางสถิติของหัววัดตัวนำประเภททองแดงระยะห่าง 2.5 มม.ที่ความถี่ 100 Hz…...42
4.4 คุณลักษณะทางสถิติของหัววัดตัวนำประเภทสแตนเลสระยะห่าง 2.5 มม.ที่ความถี่ 100 Hz…43

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 หัววัดที่นำเสนอโดย Saxena and Tayal……3

1.2 หัววัดที่นำเสนอโดย Posada ,J. et.al……3

1.3 หัววัดที่นำเสนอโดย Lijun Xu. et.al……4

2.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าลักษณะเบื้องต้น……6

2.2 คุณลักษณะตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานความกว้างเท่ากับอนันต์……7

2.3 ระนาบวัสดุ 2 ชั้นซ้อนกันในแนวนอน……8

2.4 ระนาบวัสดุ 2 ชั้นวางในแบบขนาน……9

2.5 fringing field ของระนาบแผ่นตัวนำขนาน……10

2.6 ตัวอย่างค่า k_C ที่มีค่า $\varepsilon = 4.5$……11

2.7 แผ่นโลหะที่มีความหนาขนานกัน……11

2.8 เปรียบเทียบสมการที่ปรับปรุงกับค่าทางการคำนวณ……12

2.9 ไดโพลของอะตอม……13

2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความถี่……16

2.11 วงจรสมมูลแบบขนานและเฟสไดอะแกรม……17

2.12 วงจรสมมูลแบบอนุกรมและเฟสไดอะแกรม……18

3.1 ลักษณะแผ่นโลหะตัวนำเคลือบไนลอน……20

3.2 หัววัดที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์……21

3.3 ภาพตัดขวางของหัววัด……22

3.4 หัววัดภายใต้สภาวะทดสอบ……23

3.5 ลักษณะเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง……24

4.1 โครงสร้างของหัววัดในรูปแบบวงจรสมมูลทางไฟฟ้า……25

4.2 ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดแบบ A และ B ในสภาวะบรรยากาศเครื่องมือวัด R-L-C……27

4.3 เปรียบเทียบค่าจริง $Re_{[Z(\omega)]}$ ของหัววัดชนิดสแตนเลสที่วัดจริงกับค่าสมมุติฐานของเอทิลแอลกอฮอล์ล……28

4.4 เปรียบเทียบค่าจริง $Im_{[Z(\omega)]}$ ของหัววัดชนิดสแตนเลสที่วัดจริงกับค่าสมมุติฐานของเอทิลแอลกอฮอล์ล……28

4.5 ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส……27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.6 ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดโดยปราศจากการควบคุมอุณหภูมิ..31

4.7 เปรียบผลลัพธ์ระหว่างการควบคุมอุณหภูมิและไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิ...31

4.8 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz.......................................33

4.9 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz.....................................33

4.10 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz...................................34

4.11 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz...................................34

4.12 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 100 Hz...................................35

4.13 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz...................................35

4.14 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz.................................36

4.15 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz.................................36

4.16เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz..................................37

4.17 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz.................................37

4.18 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz...............................38

4.19เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz................................38

4.20 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz...............................39

4.21 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz...............................39

4.22 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz.............................40

4.23 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz.............................40

4.24 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz.............................41

4.25 ฟังก์ชั่นที่สร้างมาจากข้อมูลของหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะ 5 มิลลิเมตร...................................44

4.26 ฟังก์ชั่นที่สร้างมาจากข้อมูลของหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตร................................44

4.27 ฟังก์ชั่นที่สร้างมาจากข้อมูลของหัววัดชนิดสแตนเลสที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตร.............................45

ข.1 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 5 มม. 55

ข.2 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 5 มม. 56

ข.3 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 5 มม. 56

ข.4 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 5 มม. 57

ข.5 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 5 มม. 57

ข.6 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 5 มม. 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ข.7 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 5 มม. 58

ข.8 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 5 มม. 59

ข.9 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 100 Hz ระยะ 5 มม. 59

ข.10 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 5 มม. 60

ข.11 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 5 มม. 60

ข.12 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 5 มม. …………………….....61

ข.13 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 5 มม. 61

ข.14 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 5 มม. ………………………..62

ข.15 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 5 มม. ……………………...62

ข.16 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 5 มม. ……………………...63

ข.17 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 5 มม. ……………………...63

ข.18 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 2.5 มม. 64

ข.19 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 2.5 มม. 64

ข.20 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 2.5 มม. 65

ข.21 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 2.5 มม. ……………………..65

ข.22 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 2.5 มม. 66

ข.23 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 2.5 มม. 66

ข.24 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 2.5 มม. 67

ข.25 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 2.5 มม. ……………………...67

ข.26 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 2.5 มม. 67

ข.27 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 2.5 มม. 68

ข.28 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 2.5 มม. 69

ข.29 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 2.5 มม. ……………………69

ข.30 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 2.5 มม. ……………………..70

ข.31 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 2.5 มม. ……………………70

ข.32 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 2.5 มม. 71

ข.33 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 2.5 มม. 71

ง.1 การถดถอยแบบพหุนามโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชั่นพหุนามจากข้อมูลที่กำหนดมา..................76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารเคมีเป็นกระบวนการผลิต การควบคุมปริมาณสารถือเป็นหัวใจสำคัญของผลผลิตในอุตสาหกรรมนั้นๆ ตัวอย่างเช่นอุตสาหกรรมการชุบโลหะมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องทราบถึงปริมาณน้ำยาที่ใช้ชุบโลหะ หากน้ำยาที่ติดบนผิวโลหะน้อยเกินไปมีผลให้ผิวผลิตภัณฑ์ไม่คงทน ถ้ามากไปมีผลเสียในแง่ต้นทุนผลิตด้วยเหตุนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณสารเคมีดังกล่าว ตัวแปรที่บ่งชี้ปริมาณสารเคมีก็คือความเข้มข้น การตรวจวัดหรือทดสอบความเข้มข้นมีทั้งกระบวนการทางเคมีและฟิสิกข์ กระบวนการทางเคมีเรียกกระบวนการไทรเตรทซึ่งวิธีนี้เป็นการบอกปริมาณความเข้มข้นโดยใช้ปฏิกิริยาสารเคมี ส่วนทางด้านฟิสิกข์มีวิธีตรวจสอบความเข้มข้นดังต่อไปนี้ หลักการแบบใช้การหักเหของแสงผ่านเข้าสู่วัสดุตามดัชนีการหักเห ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารเคมีชนิดนั้นๆ หลักการอิเล็คโตรสแตติกใช้วัดค่าความเข้มข้นของไอเสียในชั้นบรรยากาศเป็นส่วนมาก หลักการแบบความนำไฟฟ้าใช้คุณสมบัติความเป็นตัวนำของสารเคมี และสุดท้ายหลักการแบบค่าควมจุไฟฟ้าใช้ตรวจวัดค่าความเข้มข้นที่มีส่วนประกอบ ส่วนในค่าคงที่ไดอิเล็คตริกที่แตกต่างกัน

จากหลักการข้างต้นมีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นหลักการเครื่องมือวัดความเข้มข้นเช่น เครื่องมือวัดสเปรคโตรสโคปี้, เครื่องมือวัดไทรเตรท, เครื่องมือวัดค่า P-H และเครื่องมือวัดค่าความนำของไฟฟ้า ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กต้นทุนต่ำเครื่องมือวัด 2 ชนิดแรกไม่เหมาะสมเนื่องจากมีราคาแพงมาก เครื่องมือวัด P-H สามารถบอกรายละเอียดได้แค่ความเป็นกรดเป็นด่างเท่านั้น ส่วนเครื่องมือวัดค่าความนำไม่สามารถตรวจวัดได้ในกรณีที่สารเคมีมีสภาพความเป็นฉนวนมากกว่าเป็นสภาพความนำ วิธีการที่ผู้ผลิตนิยมใช้กันคือจ้างพนักงานมาทดสอบโดยวิธีไทเตรท ซึ่งขาดความแน่นอนเนื่องจากทักษะของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นหลักการค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นเทคโลยีต้นทุนต่ำและมีความน่าเชื่อถือได้ จึงมีความน่าสนใจนำไปศึกษาในงานตรวจวัดค่าความเข้มข้น

เพราะฉะนั้นหากประดิษฐ์หรือออกแบบหัววัดที่มีราคาถูก และมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง ที่สามารถทดแทนกระบวนการทดสอบอันเกิดจากพนักงานได้ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความผิดพลาดอันเกิดจากผู้ปฏิบัติงาน ตัวอย่างของหัววัดก็สามารถผลิตขึ้นมาเป็นกรณีศึกษาในกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน

1.2 จุดมุ่งหมายและความสำคัญของการศึกษา

- ออกแบบประดิษฐ์หัววัดที่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้น ของสารละลายประเภทเอทิลแอลกอฮอล์เป็นกรณีศึกษา
- หาสภาวะของหัววัดที่ให้ผลลัพธ์มีค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวภายใต้สภาวะการทดสอบ
- สร้างสมการฟังก์ชั่นค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าความเข้มข้นของหัววัดจากผลการทดลอง เพื่อหาช่วงการใช้งานของหัววัด

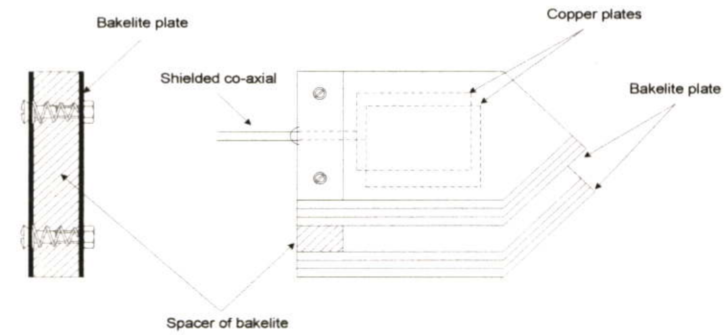
1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานการศึกษาอยู่ภายใต้การหลักการที่ว่าด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็คตริกเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดหากสารเคมีมีโครงสร้างเปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็คตริกก็แตกต่างกันโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก็เป็นเหตุผลหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย

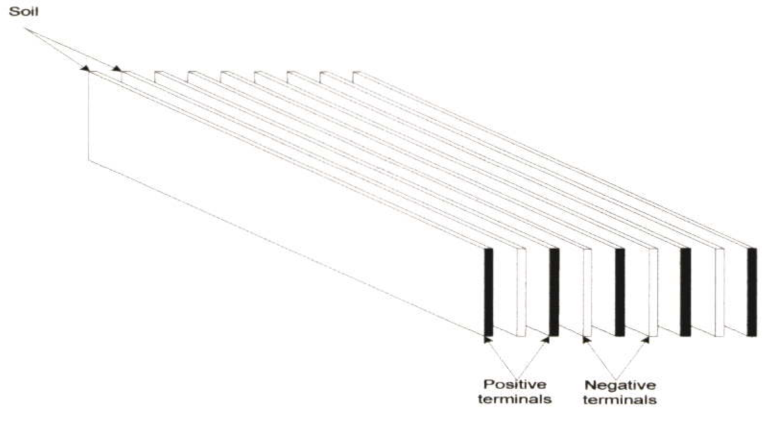
การนำหลักการของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาเป็นแนวคิดเบื้องต้น โดยหัววัดมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะขนาน เคลือบด้วยพลาสติกฉนวน ใช้หลักความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารเคมีต่อค่าคงที่ไดอิเล็คตริกเป็นคุณลักษณะเชื่อมโยง[1] อันเป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยมีผู้ศึกษาและวิจัยหัววัดโดยใช้หลักการตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นขนาน แต่ตรวจจับปริมาณในรูปแบบที่แตกต่างจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เช่น

Saxena and Tayal (1981) การวัดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการวัดค่าร้อยละของความชื้นของดินหรือคอนกรีต โดยหลักการของหัววัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็คตริก (Dielectric Constants) ของตัวอย่างระหว่างดินหรือคอนกรีตที่ชื้นและที่แห้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ประกอบในดินหรือคอนกรีตที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ สามารถทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็คตริกของผสมนั้นเปลี่ยนแปลง อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดค่าปริมาณดังกล่าวคือทรานสดิวเซอร์แบบเก็บประจุ (Capacitive Transducer) ทรานสดิวเซอร์ดังกล่าวประกอบด้วยแผ่นโลหะแบบขนานที่มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 7.5×2.0 ตารางเซนติเมตรโดยระยะห่างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 0.5 เซนติเมตรและถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนเพื่อลดค่าความเก็บประจุที่ขอบโลหะ (Fringing Field Capacitance) [2]



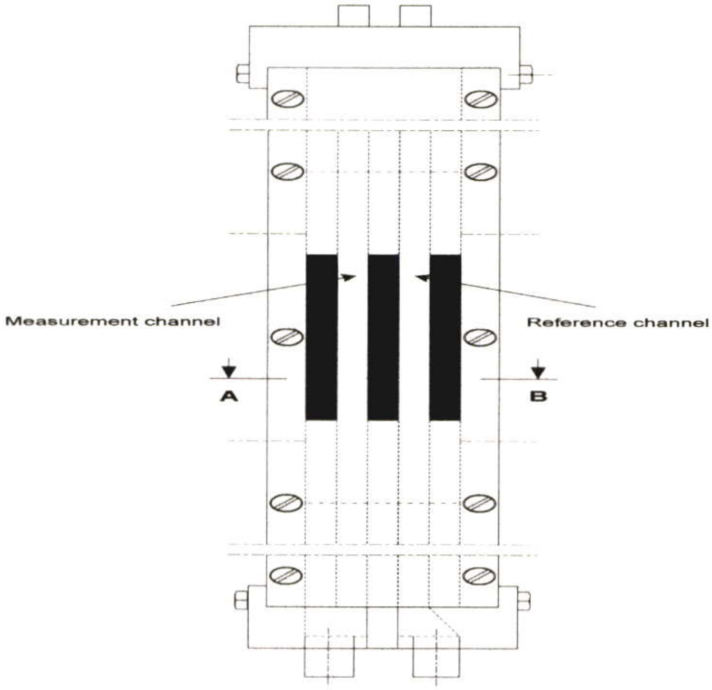
รูปที่ 1.1 หัววัดที่นำเสนอโดย Saxena and Tayal

Posada ,J. et.al. (1999) งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการนำเสนอการวัดปริมาณน้ำภายในดินเพื่อใช้งานในการชลประทาน หลักการของหัววัด (Sensor) ใช้แนวคิดของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็คตริกโดยมีขอบเขตของตัวอย่างงานวิจัยเป็นน้ำ ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็คตริกสูงสุดและดินแห้งที่มีค่าคงที่ไดอิเล็คตริกต่ำสุด ลักษณะของหัววัดเป็นแบบแผ่นโลหะขนาน (Parallel-plate Lossy Capacitor) ที่มีดินเป็นค่าคงที่ไดอิเล็คตริกอยู่ระหว่างแผ่นโลหะ ใช้วัสดุที่เป็นแผ่นทองแดงหนาขนาด 3.175 มิลลิเมตรจำนวน 15 แผ่นมีระยะห่าง 1 เซนติเมตร โดยมีการต่อขั้วบวกและขั้วลบที่แผ่นโลหะสลับกันไปดังรูปที่ 1.2 [3]



รูปที่ 1.2 หัววัดที่นำเสนอโดย Posada ,J. et.al.

Lijun Xu. et.al. (2000) บทความนี้เป็นการกล่าวอ้างถึงวิธีการวัดค่าความเข้มข้นของแก๊ส โดยใช้วิธีของการเก็บประจุเป็นพื้นฐานในการวัด บทความนี้นำเสนอวิธีการวัดแบบแผ่นโลหะขนาน (Parallel Plate) มาใช้งาน เหตุผลเพราะสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะจะมีความเป็นเนื้อเดียวและข้อดีคือไม่ตอบสนองทางด้านตำแหน่งของหัววัดเมื่อนำไปใช้งานในระบบแบบสถิต (Static) บทความนี้มุ่งเน้นไปทางการหาตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ค่าความเก็บประจุของหัววัดเปลี่ยนแปลง หัววัดที่บทความนี้ออกแบบและทดลองขึ้นเพื่อลดค่าความแปรปรวนของตัวแปรจากสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุดเช่น อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น มีลักษณะดังรูปที่ 1.3 [4]



รูปที่ 1.3 หัววัดที่นำเสนอโดย Lijun Xu. et.al

1.5 ขอบเขตการศึกษาวิจัย

- สารละลายที่ใช้ทดลองเป็นกรณีศึกษาคือเอทิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นที่ 95% สูงสุดและต่ำสุด 5%โดยเปลี่ยนระดับความเข้มข้นครั้งละ 10%
- เปรียบเทียบผลจากวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดเป็นโลหะตัวนำใช้งานทั่วไป ประเภททองแดงและโลหะชนิดพิเศษ สแตนเลส
- การทดลองการตอบสนองทางความถี่ต่อวงจรสมมูลของหัววัดอยู่ในช่วง 100 Hz ถึง 2 kHz
- แบ่งชนิดของหัววัดเป็น 2 ชนิดภายใต้โลหะชนิดเดียวกันเพื่อทดสอบผลกระทบเรื่องระยะห่างต่อผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไป
- การทดลองอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องทดลองประมาณ 23 องศาเซลเซียส

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

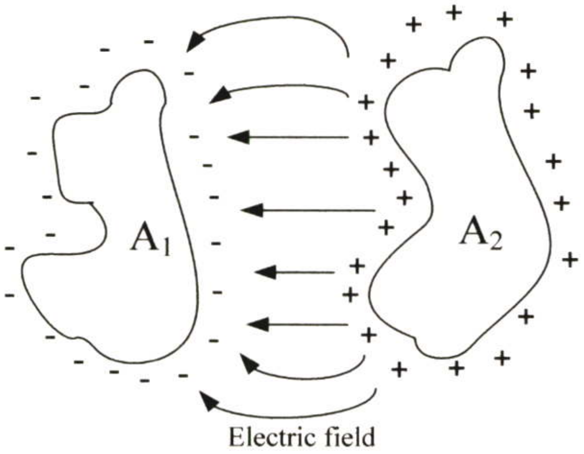
- ออกแบบและสร้างหัววัด
- ทดสอบหัววัดที่สภาวะไดอิเล็คตริกเป็นอากาศจากเครื่องมือทดสอบดูผลตอบสนองความถี่แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จาการคำนวณ
- ทดสอบหัววัดที่สภาวะไดอิเล็คตริกเป็นสารละลายจากเครื่องมือทดสอบดูผลตอบสนองความถี่แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณ
- ทดสอบหัววัดที่สภาวะไดอิเล็คตริกเป็นสารละลายจากเครื่องมือทดสอบ ดูผลตอบสนองค่าความเข้มข้น
- หาสภาวะที่หัววัดแสดงผลลัพธ์เป็นค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากการทดลองกรณีศึกษาวัดค่าความเข้มข้นสารละลาย
- ทดสอบหัววัดในเรื่องของอุณหภูมิที่ควบคุมและไม่ได้ควบคุม
- เปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าที่วัดได้กับสูตรการแปลงผันของวงจรสมมูล จากแบบขนานแปลงเป็นแบบอนุกรม
- ประดิษฐ์สมการความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าความเข้มข้น จากผลของการทดลองหัววัด เพื่อหาช่วงใช้งานที่เป็นเชิงเส้น

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงแนวความคิดเบื้องต้นจากทฤษฎีตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเป็นหัววัด เนื้อหาประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน, ผลกระทบของ Fringing Field ต่อค่าความจุไฟฟ้า, ไดอิเล็คตริก (Dielectric) ของวัสดุโดยจะอธิบายในระดับมหาภาค (Macroscopic) และวงจรสมมูลที่แสดงผลจากเครื่องมือวัด R-L-C ซึ่งเป็นคุณลักษณะการแสดงผลของเครื่องมือวัด

2.1 ทฤษฎีตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

แนวความคิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเบื้องต้นอธิบายโดยกำหนดให้ตัวนำ A_1 มีประจุไฟฟ้า(Q^-) และตัวนำ A_2 มีประจุไฟฟ้า (Q^+) กระจายทั่วพื้นผิวตัวนำ โดยจำนวนประจุทั้งสองมีค่าเท่ากันและสภาวะแวดล้อมรอบตัวนำไม่มีประจุไฟฟ้าใดๆอยู่เลย ผลรวมประจุไฟฟ้าของระบบจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ สนามไฟฟ้า (Electric Field) มีทิศทางจากตัวนำ A_2 ถึงตัวนำ A_1 ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าลักษณะเบื้องต้น

ระหว่างตัวนำทั้งสองมีค่าความต่างศักย์เท่ากับ U ค่าความจุไฟฟ้าของสองตัวนำมีค่าเท่ากับสัดส่วนของขนาดผลรวมประจุไฟฟ้าทั้งหมดบนตัวนำในแต่ละตัวต่อขนาดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ ดังสมการที่2.1

$$C = \frac{Q}{U} \tag{2.1}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

Q คือ ประจุไฟฟ้าที่กระจายบนผิวของตัวนำ (คูลอมบ์)

U คือ ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ (V)

ค่า Q หาได้จากการอินทิเกรต (Integrate) ฟลั๊กไฟฟ้ารอบพื้นที่ผิวตัวนำ ค่า U คือการนำประจุบวกจำนวนหนึ่งประจุเคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวก สมการที่2.1เขียนใหม่ได้เป็น

$$C = \frac{\oint_S \varepsilon \vec{E} d\vec{S}}{-\int_{-}^{+} \vec{E} d\vec{L}} \tag{2.2}$$

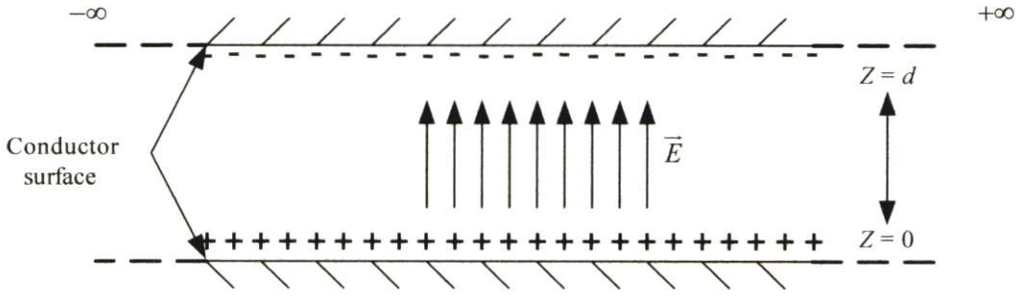
เมื่อ S คือ พื้นที่ผิวตัวนำ (m^2)

E คือ สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ (V/m)

ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็คตริกของวัสดุระหว่างตัวนำทั้งสอง (F/m)

L คือ ระยะทางที่ประจุบวกเคลื่อนที่ (m)

ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยที่ชื่อว่าฟารัด หนึ่งฟารัดมีค่าเท่ากับหนึ่งคูลอมบ์ต่อโวลท์ หากกำหนดให้แผ่นตัวนำเป็นแบบคู่ขนานที่มีความกว้างเป็นอนันต์ มีระยะห่างเท่ากับ d ดังรูปที่2.2



รูปที่ 2.2 คุณลักษณะตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานความกว้างเท่ากับอนันต์

กำหนดให้แผ่นตัวนำด้านล่างมีพิกัดที่ $Z = 0$ และแผ่นตัวนำด้านบนมีพิกัดที่ $Z = d$ มีประจุไฟฟ้ากระจายทั่วพื้นที่ผิวบนแผ่นตัวนำทั้งสองเท่ากับ $\pm \rho_S$ สมการของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเท่ากับ

$$\vec{E} = \frac{\rho_S}{\varepsilon} \vec{a}_z \tag{2.3}$$

เมื่อ ρ_S คือ จำนวนประจุไฟฟ้าที่กระจายทั่วพื้นที่ผิว (คูลอมบ์ / m^2)

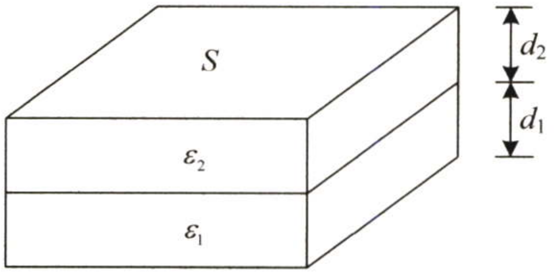
ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างระนาบบนและล่างคือ

$$U = -\int_{upper}^{lower} \vec{E}.d\vec{L} = -\int_{d}^{0} \frac{\rho_S}{\varepsilon} dz = \frac{\rho_S . d}{\varepsilon} \tag{2.4}$$

จากที่ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ต้นว่าแผ่นตัวนำมีความกว้างเป็นอนันต์ ประจุที่กระจายบนพื้นที่ผิวแผ่นตัวนำก็มีค่าเป็นอนันต์เช่นเดียวกัน ฉะนั้นต้องกำหนดให้แผ่นตัวนำมีพื้นที่จำกัดเท่ากับ S แต่มีข้อแม้ว่าขนาดต้องมากกว่าความห่างของแผ่นตัวนำ d มากพอสมควรเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Fringing Field โดยจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ประจุบนพื้นที่ผิวตัวนำมีค่าเท่ากับ $Q = \rho_S S$ ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำระนาบขนานคือ

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\rho_S S}{\frac{\rho_S d}{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon S}{d} \tag{2.5}$$

2.1.1 ในกรณีมีวัสดุระหว่างแผ่นระนาบของระบบซ้อนกัน



รูปที่ 2.3 ระนาบวัสดุ 2 ชั้นซ้อนกันในแนวนอน

จากสมการที่ 2.3 สนามไฟฟ้าภายในวัสดุต่างชนิดจะมีค่าไม่เท่ากันแม้จะอยู่ในระนาบเดียวกันขึ้นอยู่กับค่า ε แต่มีค่าฟลั๊กไฟฟ้า (D) เท่ากันทั้งระบบ โดยความสัมพันธ์ของฟลั๊กไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าคือ

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \tag{2.6}$$

นำสมการที่ 2.6 แทนในสมการที่ 2.3 เห็นได้ว่าฟลั๊กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับจำนวนประจุไฟฟ้าที่กระจายบนแผ่นระนาบของตัวนำทั้งหมดดังนั้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุชั้นที่ 1 และ 2 จึงมีค่าเท่ากับ

$$U_1 = \frac{\rho_S.d_1}{\varepsilon_1} \tag{2.7}$$

$$U_2 = \frac{\rho_S.d_2}{\varepsilon_2} \tag{2.8}$$

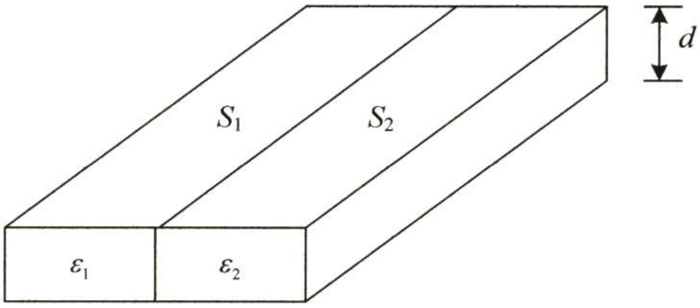
ความจุไฟฟ้ารวมทั้งระบบของระนาบวัสดุ 2 ชั้นซ้อนคือ

$$C = \frac{Q}{U_1 + U_2} = \frac{\rho_S.S}{\frac{\rho_S.d_1}{\varepsilon_1} + \frac{\rho_S.d_2}{\varepsilon_2}} = \frac{S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}} \tag{2.9}$$

โดยสามารถจัดรูปแบบให้ง่ายดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \tag{2.10}$$

2.1.2 ในกรณีมีวัสดุเป็นแผ่นระนาบวางขนานในระบบ



รูปที่ 2.4 ระนาบวัสดุ 2 ชั้นวางในแบบขนาน

จากรูปด้านบนก็ใช้ลักษณะการคิดที่คล้ายกันโดยที่

$$Q_1 = \frac{\varepsilon_1 U S_1}{d} \tag{2.11}$$

$$Q_2 = \frac{\varepsilon_2 U S_2}{d} \tag{2.12}$$

โดยที่ความต่างศักย์ในระบบมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นค่าความจุไฟฟ้าของระนาบวัสดุ 2 ชั้นวางในแบบขนานมีค่าเท่ากับ

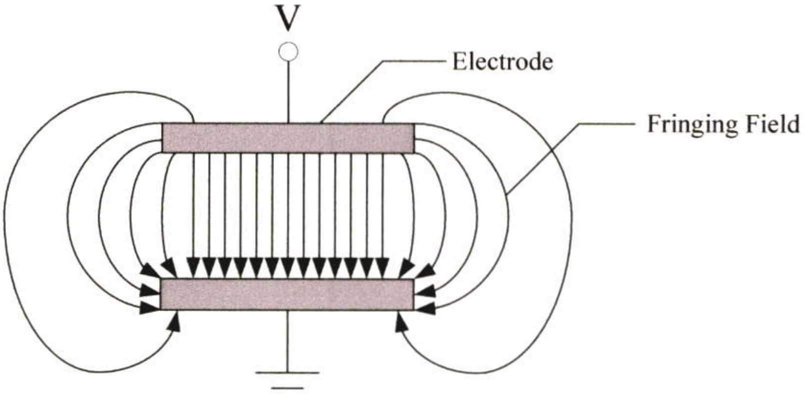
$$C = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = \frac{\varepsilon_1.S_1}{d} + \frac{\varepsilon_2.S_2}{d} \tag{2.13}$$

หรือ

$$C = C_1 + C_2 \tag{2.14}$$

2.2 ผลกระทบ Fringing Field ของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

ตัวเก็บประจุแบบขนานที่ใช้ตรวจจับปริมาณต่างๆ หากมีการออกแบบให้ความกว้างและความยาวของแผ่นตัวนำหรืออิเล็คโทรด (Electrode) มีขนาดไม่มากกว่าระยะห่างของแผ่นอิเล็คโทรดมากๆ ผลที่ตามมาคือค่า Fringing Field เป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้าที่ทำให้ผิดเพี้ยนจากค่าทฤษฎีตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Fringing Field ของระนาบแผ่นตัวนำขนาน

จากรูปอธิบายได้ว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วอิเล็คโทรด เกิดสนามไฟฟ้าภายในอิเล็คโทรดที่เป็นรูปแบบตามทฤษฎีของการกระจายประจุแบบแผ่นขนานและมีสนามไฟฟ้าตามขอบแผ่นโลหะนอกปริมาตรซึ่งเรียกสนามไฟฟ้าตรงนี้ว่า Fringing Field สนามไฟฟ้าดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็คตริกของวัสดุที่ขั้นกลางอีกด้วย ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่เกิดจากผลกระทบของค่า Fringing Field ได้มีการอ้างอิงในหนังสือ [6] กำหนดไว้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะขนานต่อหน่วยความยาวมีค่าเท่ากับ

$$\frac{C}{l} = \varepsilon k_C \frac{w}{d} \tag{2.15}$$

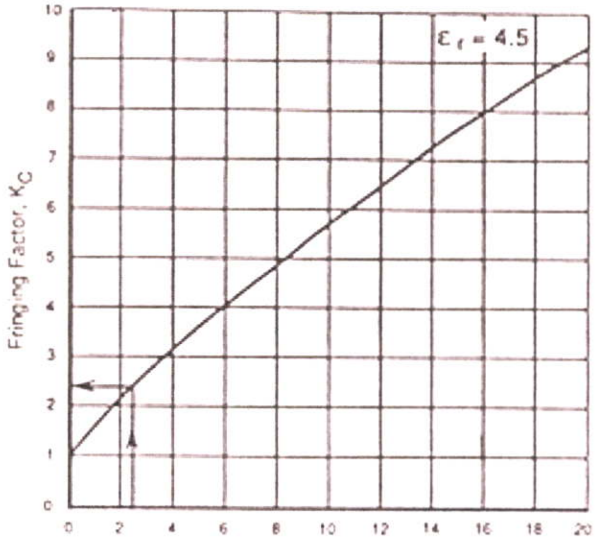
เมื่อ w คือ ความกว้างแผ่นอิเล็คโทรด (m)

l คือ ความยาวของแผ่นอิเล็คโทรด (m)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็คโทรด (m)

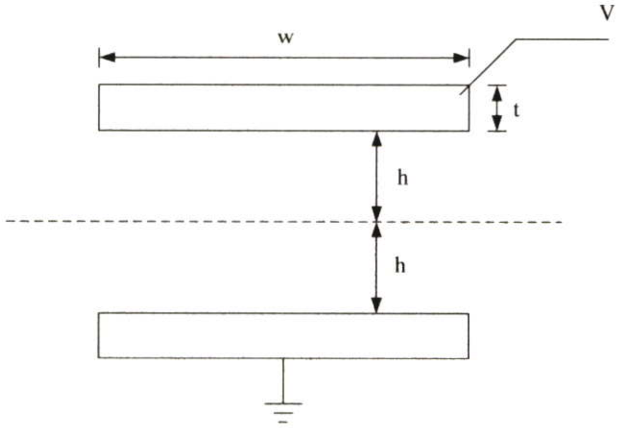
k_C คือ ตัวแปรที่เพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าจาก Fringing Field ตามชนิดไดอิเล็คตริก

โดยที่ค่า k_C ขึ้นอยู่กับ $\frac{w}{d}$ จะมีค่ามากกว่า1ขึ้นไป แต่ถ้าหากค่า w/d <<1 ค่าของ k_C ประมาณเท่ากับ1



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างค่า k_C ที่มีค่า $\varepsilon = 4.5$

นอกจากการพิจารณาด้วยกราฟคุณลักษณะของไดอิเล็คตริกแล้ว ยังมีการนำเสนอในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์โดยได้รวบรวมไว้ในรายงาน[7] โดยกล่าวไว้ว่าค่าความจุไฟฟ้าต่อความยาวแบบแผ่นขนานที่มีความหนาของแผ่นตัวนำดังรูปที่ 2.7 ที่ H.Yang 2000 อ้างไว้ในหนังสือ Handbook of Sensors and Actuators [8] มีค่าความจุไฟฟ้าโดยประมาณเท่ากับสมการที่ 2.16



รูปที่ 2.7 แผ่นโลหะขนานที่มีความหนาขนานกัน

$$\frac{C}{l} = \varepsilon \frac{w}{h}\left[1+\frac{2h}{\pi w}\ln\left(\frac{\pi w}{h}\right)+\frac{2h}{\pi w}\ln\left(1+\frac{2t}{h}+2\sqrt{\frac{t}{h}+\frac{t^2}{h^2}}\right)\right] \qquad (2.16)$$

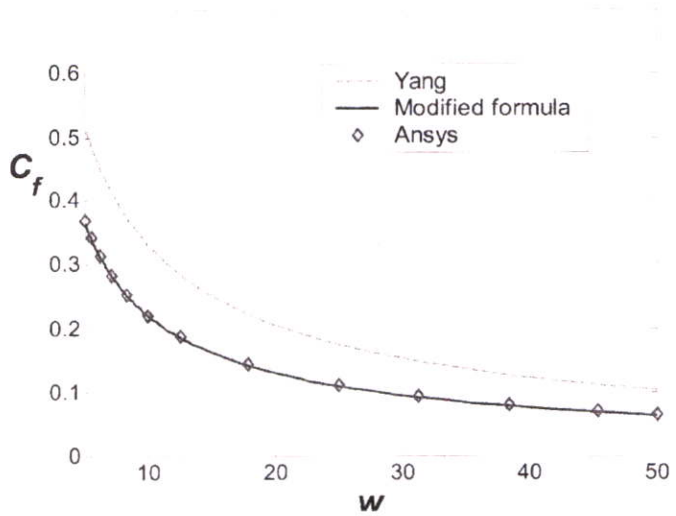
จากสมการที่ 2.16 พบว่าประกอบไปด้วย 3 เทรอม เทรอมแรกคือความหมายของค่าความจุไฟฟ้าตามทฤษฎีของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นขนาน เทรอมที่สองคือค่า Fringing Field ที่มีขนาดเป็นแบบ Finite Dimensions ของแผ่นโลหะและเทรอมที่ 3 คือค่า Fringing Field อันเกิดมาจากความหนาของแผ่นโลหะตัวนำจากผลการทดลองเปรียบเทียบการจำลอง Finite Elements กับสมการที่ 2.16 ตามที่ได้อ้างอิงไว้ใน [7] แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 2.16 ที่ได้นำเสนอยังไม่มีความแม่นยำพอมีค่าความผิดพลาด 4-12 % จึงต้องมีการปรับปรุงสมการใหม่โดยพิจารณาจากสมการของ Palmer 1927 [9] ที่ได้นำเสนอไว้โดยกำหนดให้ไม่มีความหนาของแผ่นโลหะตามสมการที่ 2.17

$$\frac{C}{l} = \varepsilon\frac{w}{h}\left[1+\frac{h}{\pi w}+\frac{h}{\pi w}\ln\left(\frac{2\pi w}{h}\right)\right] \tag{2.17}$$

สมการของ Palmer เมื่อเปรียบเทียบกับการจำลอง Finite Elements ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0-2 % เมื่อนำมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับเรื่องความหนาของแผ่นโลหะ จะได้สมการใหม่ที่เป็นการรวมกันระหว่างสมการ 2.16 และ 2.17 คือสมการที่ 2.18

$$\frac{C}{l} = \varepsilon\frac{w}{h}\left[1+\frac{h}{\pi w}+\frac{h}{\pi w}\ln\left(\frac{2\pi w}{h}\right)+\frac{h}{\pi w}\ln\left(1+\frac{2t}{h}+2\sqrt{\frac{t}{h}+\frac{t^2}{h^2}}\right)\right] \tag{2.18}$$

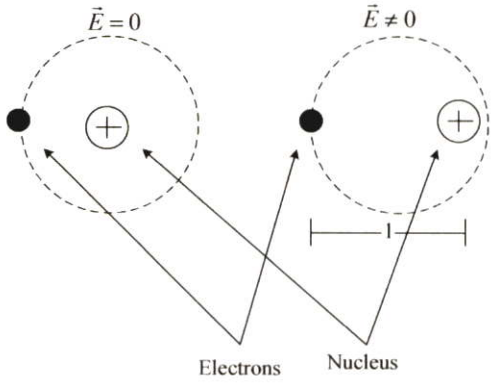
โดยมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0-0.3 % แสดงการเปรียบเทียบสมการดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบสมการที่ปรับปรุงกับค่าทางการคำนวณ

2.3 คุณลักษณะทางกายภาพของไดอิเล็คตริกภายในตัวเก็บประจุ

การโพลาร์ไรเซชั่น (Polarization) คือสภาวะความเป็นขั้วของอะตอมหรือโมเลกุลภายในสสาร โดยเกิดจากพลังงานที่ถูกดูดซับจากวัสดุสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็คตริก (Dielectric) หรือกล่าวอีกอย่างก็คือสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในไดอิเล็คตริก ทำให้พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพันธะอิเล็คตรอนภายในอะตอมหรือไอออนเปลี่ยนไป เมื่อมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในไดอิเล็คตริก ตัวอิเล็คตรอนจะถูกดูดจากขั้วบวกของแผ่นอิเล็คโทรด และถูกผลักจากขั้วลบของอิเล็คโทรดอีกแผ่นหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ตามมาก็คืออะตอมหรือไอออนกลายเป็นไดโพล (Dipole) ตัวหนึ่ง เพราะว่าศูนย์กลางของพันธะอิเล็คตรอนและนิวเคลียสที่ประกอบด้วยประจุบวก จะถูกจัดตำแหน่งใหม่ตามระยะห่าง l ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไดโพลของอะตอม

กระบวนการจัดขั้วของอนุภาคทำให้เกิดโมเมนต์ทางไฟฟ้า (Electric Moment) ตามสมการที่ 2.19

$$\vec{\mu} = Q\vec{l} \tag{2.19}$$

เมื่อ $\vec{\mu}$ คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้า (คูลอมบ์.m)

Q คือ ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

$\vec{l}$ คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็คตรอนและนิวเคลียส (m)

ผลรวมของโมเมนต์ทางไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตรของไดอิเล็คตริกที่ถูกจัดขั้ว จะเป็นจำนวนที่ถูกเรียกว่า การโพลาร์ไรเซชั่นตามสมการที่ 2.20

$$\vec{J} = k\vec{E} \tag{2.20}$$

เมื่อ J คือ การโพราไรเซชั่น (V/m)

k คือ Dielectric Susceptibility

ค่า Dielectric Susceptibility มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็คตริก ซึ่งเป็นคุณสมบัติของไดอิเล็คตริกแต่ละชนิดคือ

$$\varepsilon = 1 + 4\pi k \tag{2.21}$$

ในโครงสร้างโมเลกุลที่เกิดการโพลาร์ไรเซชั่นขึ้นมา ไม่ว่าจะเป็นไดอิเล็กตริกประเภทก๊าซ ของเหลวหรือของแข็ง โมเลกุลจะกลายสภาพเป็นโมเมนต์ไดโพลไฟฟ้า (Electric Dipole Moment) หากป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยโมเลกุลเหล่านี้เรียกว่าโมเลกุลแบบมีขั้ว (Polar Molecules) หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าสนามไฟฟ้าทำให้โครงสร้างโมเลกุลไม่สมมาตร ในกรณีที่ยังไม่ได้จ่ายสนามไฟฟ้า ผลรวมโมเมนต์ทางไฟฟ้าของไดโพลทุกๆโมเลกุลจะมีค่าเท่ากับศูนย์เพราะการเคลื่อนที่ๆสับสนของอนุภาคภายในสารนั้นๆ ไดโพลจึงมีการหันเหอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอกให้แก่ตัวสารจะเกิดเหตุการณ์ดังต่อไปนี้ขึ้น เหตุการณ์แรกมีแรงดึงไดโพลอันเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้า แล้วทำให้ประจุบวกและลบมีระยะห่างเพิ่มมากขึ้นค่าโมเมนต์ไดโพลไฟฟ้าก็มีค่ามากขึ้นตาม เหตุการณ์ที่สองการหักเหของไดโพลมีทิศทางตามสนามไฟฟ้าโดยที่ประจุลบหันไปทางขั้วบวกและประจุบวกหันไปทางขั้วลบ การหักเหของไดโพลมีค่าไม่คงที่นั้นก็เพราะว่าผลรวมของโมเมนต์ไดโพลแต่ละส่วนมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แรงดึงที่กระทำกับไดโพลคือการหักเหของพวกมันจึงเป็นผลตอบสนอง ทำให้ทิศทางของตำแหน่งอิเล็กตรอนกระจายตัวเป็น Electronic Polarization เรียกการหักเหของไดโพลโมเลกุลดังกล่าวว่า ไดโพลโพลาร์ไรเซชั่น ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุลภายในสารนั้นๆ ความสามารถในการเกิดไดโพลโมเมนต์ก็ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสาร สารที่มีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลต่ำๆ เช่นก๊าซโมเลกุลของมันมีลักษณะการเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าได้ง่าย แต่ถ้าเป็นโมเลกุลที่มีแรงเหนี่ยวสูงเช่นของแข็งการเรียงตัวของมันเกิดขึ้นได้ยากหรือไม่เกิดขึ้นเลย

คุณสมบัติที่สำคัญของไดอิเล็กตริกที่มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็คตริก คืออุณหภูมิและความถี่ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้เกิดผลกระทบเป็นสองอย่างของไดโพลโพลาร์ไรเซชั่น อย่างแรกคือแรงในการหักเหพันธะโมเลกุลอ่อนค่าลง อย่างที่สองคือความปั่นป่วนจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้การหักเหโมเลกุลมีการการกระทบกระทั่งอย่างไม่เป็นระเบียบ ผลที่ตามมาคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าน้อยลงโดยได้แสดงตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

ก๊าซแบบมีขั้ว

$$\alpha_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dt} \tag{2.22}$$

ก๊าซแบบไม่มีขั้ว

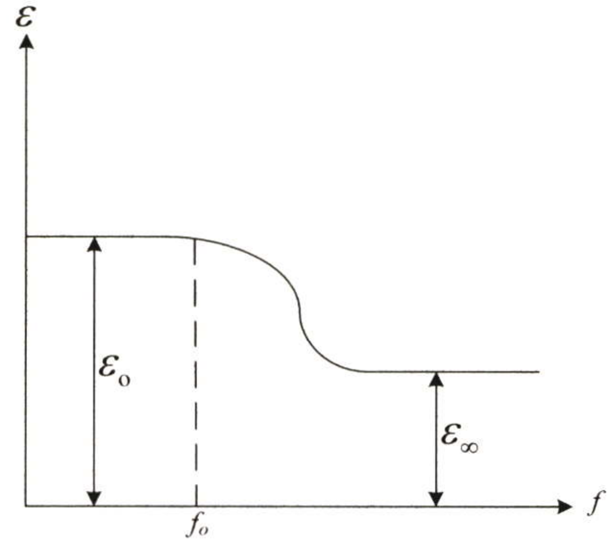
$$\alpha_{\varepsilon} = -\frac{(\varepsilon - 1)}{T} \tag{2.23}$$

ของเหลวและของแข็ง

$$\alpha_{\varepsilon} = -\frac{(\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2)}{3\varepsilon}\beta_{v} \tag{2.24}$$

เมื่อ α_{ε} คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็คตริก
β_{v} คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการกระจายตัวของเนื้อสาร
T คือ อุณหภูมิ (K)

ในกรณีของความถี่นั้นเมื่อเพิ่มความถี่ไปเรื่อยๆจะพบว่าที่ความถี่ค่าๆหนึ่ง เมื่อเลยจากความถี่ค่านี้ไปแล้วค่าคงที่ไดอิเล็คตริกจะลดลงดังรูป



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความถี่

ที่ความถี่ f_0 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริคมีค่าประมาณ ε_o โดยอ้างอิงจากแรงดันไฟฟ้ากระตรงที่จ่ายเข้าไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ความถี่น้อยๆนั้น ไดโพลโมเลกุลมีเวลาเพียงพอที่จะให้พวกมันหักเหตาม

สนามไฟฟ้าในแต่ละขั้ว แต่หากเพิ่มความถี่ที่มีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้มวลของไดอิเล็คตริกเปรียบเสมือนมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากไดโพลไม่สามารถหักเหได้ทันตามเวลาที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่า f_o สามารถหาค่าได้ตามสมการต่อไปนี้

$$f_0 = \frac{kT}{8\pi^2\eta r^3} \tag{2.25}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ Boltzman

T คือ ค่าอุณหภูมิ (K)

η คือ ค่าความหนืด

r คือ รัศมีโมเลกุลโดยสมมุติให้เป็นรูปทรงกลม

2.4 ความไม่เป็นอุดมคติของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วเรามักคิดว่าตัวเก็บประจุนั้น ประกอบด้วยเพียงแค่ค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวดังสมการค่าความจุไฟฟ้าที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา เหตุเพราะว่าค่าคงที่ไดอิเล็คติกประกอบด้วยค่าทางแกนจริงและแกนจินตภาพ เมื่อพลังงานจากแหล่งจ่ายถูกจ่ายให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าพลังงานดังกล่าวจะไม่มีแต่เพียงพลังงานย้อนคืน (Reversible Energy) เพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่ยังมีพลังงานเล็กๆเกิดขึ้นมาด้วยเรียกว่าพลังงานแบบย้อนคืนไม่ได้ (Nonreversible Energy) เป็นพลังงานที่ตัวเก็บประจุไม่สามารถคายพลังงานไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเป็นพลังงานสูญเปล่าของไดอิเล็คตริก

$$\vec{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2.26}$$

สมการที่ 2.26 เป็นสมการค่าความไม่เป็นอุดมคติของค่าคงที่ไดอิเล็คตริก พจน์ค่าจริงคือเทรอมของพลังงานแบบย้อนกลับได้พจน์ค่าจินตภาพคือเทรอมของพลังงานสูญเปล่า ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{C} = (\varepsilon' - j\varepsilon'')C_O \tag{2.27}$$

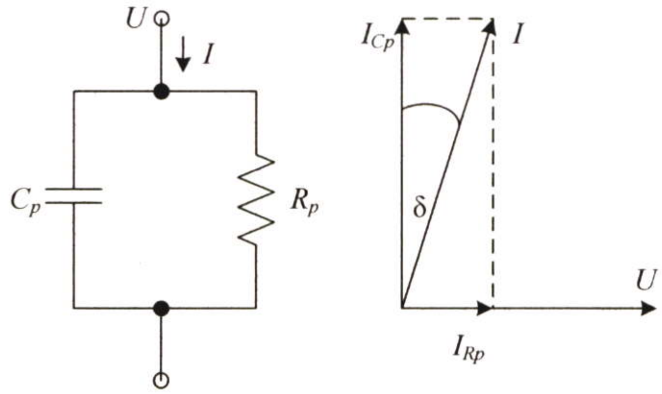
เมื่อ C_O คือค่าความจุไฟฟ้าของรูปทรงตัวนำที่มีสูญญากาศเป็นไดอิเล็คตริก ค่า $Y(\omega)$ ของตัวเก็บประจุจึงมีค่าเท่ากับ

$$Y(\omega) = j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')C_O$$

$$Y(\omega) = \omega\varepsilon''C_O + j\omega\varepsilon'C_O \tag{2.28}$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อนำเครื่องมือวัดค่า R-L-C มิเตอร์มาวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ สามารถแสดงผลได้สองแบบคือวงจรขนานและวงจรอนุกรมของค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทาน โดยเริ่มพิจารณาที่วงจรขนานก่อนดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลแบบขนานและเฟสไดอะแกรม

สมการ $Y(\omega)$ ของวงจรสมมูลแบบขนานมีลักษณะดังต่อไปนี้

$$Y(\omega) = \frac{1}{R_P} + j\omega C_P \tag{2.29}$$

เมื่อนำสมการที่ 2.28 และ 2.29 มาเปรียบเทียบกัน ค่าของ C_Pและ R_P มีค่าเท่ากับ

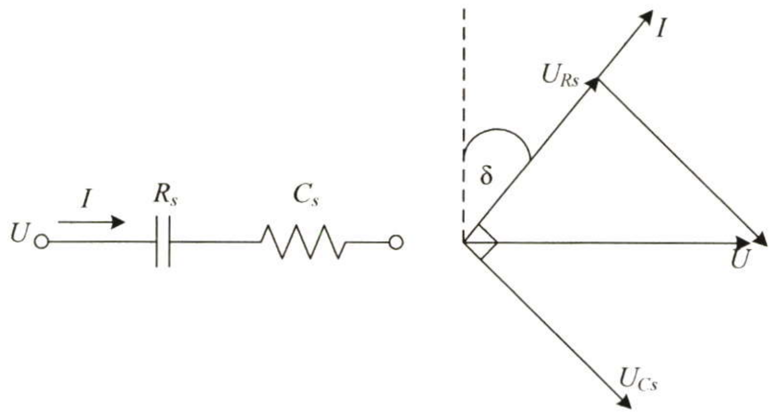
$$R_P = \frac{1}{\omega\varepsilon'' C_O} \tag{2.30}$$

$$C_P = \varepsilon' C_O \tag{2.31}$$

เฟสไดอะแกรมเป็นการอธิบายความไม่เป็นอุดมคติของตัวเก็บประจุ เพราะกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุนำหน้าแรงดันไม่ถึง 90 องศา โดยมีส่วนหนึ่งอยู่ในรูปของ I_{Rp} หรือพลังงานสูญเปล่านั้นเอง ต่อไปจะมาพิจารณาตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญมากต่อความไม่เป็นอุดมคติของตัวเก็บประจุนั้นก็คือค่า Loss Tangent ($\tan\delta$) ตัวแปร $\tan\delta$ เป็นตัวแปรที่บ่งบอกว่าตัวเก็บประจุนั้นๆมีความไม่เป็นอุดมคติมากน้อยขนาดใด ตามอุดมคติค่ากระแสไฟฟ้านำหน้าแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศา มุม δ เป็นตัวบ่งบอกว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีความคลาดแคลื่อนจากอุดมคติมากน้อยเพียงใด โดยหาค่าได้จากเฟสไดอะแกรมรูปที่ 2.11

$$\tan\delta = \frac{|I_{Rp}|}{|I_{Cp}|} = \frac{1}{\omega R_P C_P} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{2.32}$$

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลแบบขนานของหัววัดที่แสดงผลโดยเครื่องมือวัดมาแล้วนั้น ต่อไปพิจารณาการแสดงผลวงจรสมมูลแบบอนุกรม



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลแบบอนุกรมและเฟสไดอะแกรม

สมการ C_S และ R_S มีค่าดังต่อไปนี้[13]

$$C_S = \varepsilon' C_O \left\{1 + (\tan\delta)^2\right\} \tag{2.33}$$

$$R_S = \frac{\varepsilon''}{\omega|\vec{\varepsilon}|^2 C_O} \tag{2.34}$$

$$\tan\delta = \frac{|U_{Cs}|}{|U_{Rs}|} = \omega R_S C_S \tag{2.35}$$

ค่า C_S และค่า C_P จะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดก็ต่อเมื่อค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อยมากๆในกรณีที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติ ส่วนค่า R_P มีค่าเท่ากับอนันต์ ค่า R_S เท่ากับศูนย์

ในเรื่องผลตอบสนองค่าความถี่ ค่า R_P และค่า R_S ในสมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.33 สังเกตุเห็นได้ว่ามีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของค่า C_S และค่า C_P ในสมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.33 ไม่ตอบสนองความถี่ ซึ่งขัดแย้งกับกับผลการศึกษาและวิจัยใน [10,11] โดยงานวิจัยดังกล่าวระบุว่าค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความไม่เป็นระบียบในการเรียงตัวของไดโพลภายในไดอิเล็คตริก ดังนั้นเราจึงต้องปรับปรุงสมการที่แสดงผลลัพธ์ออกมาใหม่ เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยเริ่มต้นที่สมการของ Curie's Law ที่มองตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่ง ที่จ่ายแรงดัน U_0 ไฟฟ้าเข้าไปแล้วดูผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้า

$$i(t) = \frac{U_o}{h_1 t^n} \quad 0 < n < 1 , t > 0 \tag{2.36}$$

จากนั้นหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของอุปกรณ์ต่อผลตอบสนองความถี่(วิธีการดูในภาคผนวก ก.)

$$\frac{I(j\omega)}{U(j\omega)} = H(j\omega) = C_O\varepsilon'\omega^n \cos(\frac{\pi n}{2}) + jC_O\varepsilon'\omega^n \sin(\frac{\pi n}{2}) \tag{2.37}$$

นำสมการที่ 2.37 เทียบกับสมการที่ 2.29

$$R_P = \frac{1}{\omega^n \varepsilon' C_O \cos(\frac{\pi n}{2})} \tag{2.38}$$

$$C_P = \frac{\varepsilon' C_O \sin(\frac{\pi n}{2})}{\omega^{1-n}} \tag{2.39}$$

n เป็นตัวแปรบ่งบอกถึงค่าความจุไฟฟ้าต่อผลตอบสนองความถี่ เมื่อค่า $n = 1$ ตัวเก็บประจุจะมีคุณลักษณะเป็นอุดมคติและค่าความจุไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ แต่โดยทั่วไปแล้วไดอิเล็คตริกแต่ละชนิดมีค่า n ไม่เท่ากับค่า 1 ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไดอิเล็คตริกแต่ละชนิด[12] มุม δ มีค่าเท่ากับ $\pi\left(\frac{1-n}{2}\right)$, $0 < n < 1$

ในกรณีที่วงจรสมมูลเป็นแบบอนุกรม

$$C_S = \frac{\varepsilon' C_O}{\sin\left(\frac{\pi n}{2}\right)\omega^{1-n}} \tag{2.40}$$

$$R_S = \frac{\cos\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{\varepsilon' C_O \omega^n} \tag{2.41}$$

และสูตรการแปลงผันระหว่างวงจรสมมูลแบบอนุกรมและขนานมีค่าดังต่อไปนี้ (วิธีการดูในภาคผนวก ก.)

$$C_P = \frac{C_S}{1+\tan^2\delta} \text{ และ } R_P = R_S\left(1+\frac{1}{\tan^2\delta}\right) \tag{2.42}$$

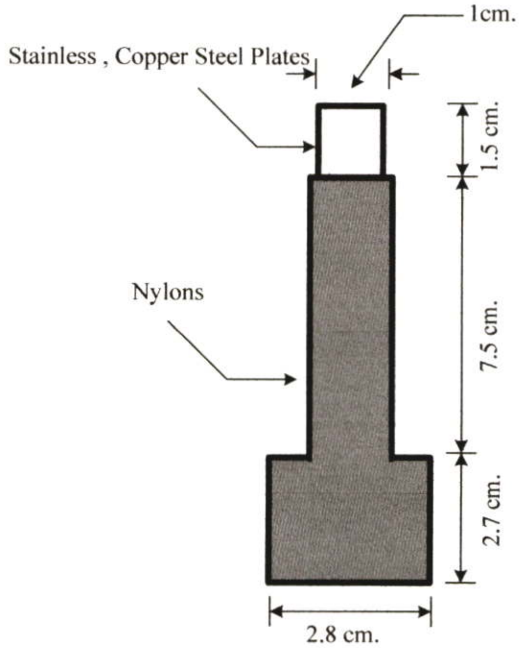
บทที่3

การออกแบบและสร้างตัวหัววัด

บทนี้เป็นการกล่าวถึง การออกแบบและการสร้างหัววัดแบบต่างๆที่ใช้ทดสอบ และขั้นตอนในการทดลองในแต่ละสภาวะตามขอบเขตของการศึกษา โดยอ้างอิงจากทฤษฎีในบทที่ 2 นำมาเป็นข้อมูลประกอบการสร้างหัววัด

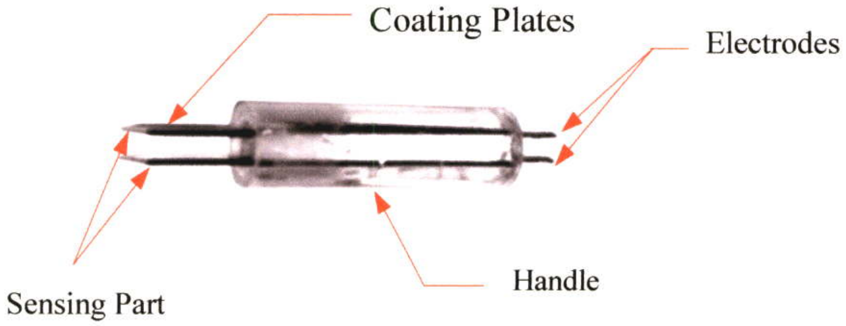
3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างหัววัด

หัววัดนำมาใช้ในการทดสอบนี้ ใช้แนวคิดทางอุดมคติของตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดแผ่นขนานออกแบบมีลักษณะเป็นแผ่นตามรูปที่ 3.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือ วัสดุตัวนำใช้งานกันทั่วไปคือทองแดง และวัสดุชนิดที่มีคุณสมบัติทางด้านความคงทนและการนำไฟฟ้ามากกว่าทองแดง นั้นก็คือสแตนเลส เหตุผลในการออกแบบรูปร่างลักษณะของแผ่นตัวนำต้องพิจารณาภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายที่ใช้เป็นกรณีศึกษาก่อนเป็นอันดับแรก ภาชนะที่ใช้บรรจุเป็นบิ๊กเกอร์ขนด 100 ml. มีความสูง 20 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. ปริมาณสารละลายที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 100 ml. ซึ่งเป็นขนาดความสูงประมาณ 3.3 cm.จากก้นแก้ว ผู้วิจัยจึงต้องออกแบบให้



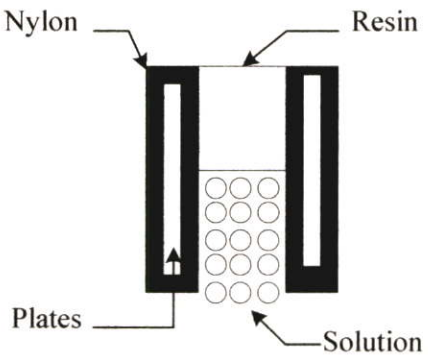
รูปที่ 3.1 ลักษณะแผ่นโลหะตัวนำเคลือบไนลอน

แผ่นตัวนำมีลักษณะดังกล่าวให้เหมาะสมกับบี๊กเกอร์ จากนั้นนำแผ่นโลหะดังกล่าวไปเคลือบด้วยไนลอนซึ่งมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนต่อปฏิกิริยาสารเคมีได้ดี นอกจากนั้นยังมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีของตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางอุดมคติ ความหนาของไนลอนที่เคลือบเฉลี่ย 0.4 mm. เป็นขนาดมาตรฐานทั่วไปของโรงชุบพลาสติก ลักษณะหัววัดตามรูปที่ 3.1 แบ่งการใช้งานเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกใช้ทำด้ามจับโดยการหล่อยึดติดกับวัสดุเป็นเรซิ่นมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและอีกส่วนใช้ตรวจจับค่าของสารละลาย รูปร่างลักษณะของหัววัดที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์มีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หัววัดที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

หัววัดที่ใช้ทดสอบได้ออกแบบมาเป็น 2 ขนาด คือขนาด A มีความห่างระหว่างแผ่นโลหะเคลือบเท่ากับ 5 mm. และขนาด B มีความห่างระหว่างแผ่นโลหะเคลือบเท่ากับ 2.5 mm.จากการกำหนดระยะระหว่างแผ่นเคลือบอ้างจากทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2 ที่กำหนดว่าค่า Fringing Field ของแผ่นตัวนำแบบขนาน ซึ่งเราต้องการออกแบบให้หัววัดที่สร้างขึ้นมามีค่าให้น้อยที่สุดตามสัดส่วนความกว้างของแผ่นตัวนำต่อระยะห่าง d/w = 0.1 โดยประมาณ ฉะนั้นขนาด A จึงมีค่าประมาณ 2.5 mm. และขนาด B กำหนดให้เป็น 2 เท่าของ A มีค่าประมาณ 5 mm. ในรูปที่ 3.3 เป็นภาพตัดตามขวางของหัววัดประกอบการทดสอบสารละลาย



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางของหัววัด

3.2 ขั้นตอนการทดสอบหัววัดในสภาวะบรรยากาศห้องทดลอง

การทดลองนี้คือการทดลองหาค่าวงจรสมมูลหัววัด ภายใต้ไดอิเล็คตริกเป็นอากาศต่อความถี่ที่แปรเปลี่ยนของเครื่องมือทดสอบ เพื่อนำค่าเหล่านี้ไปทดสอบหาความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลแบบขนานและอนุกรมตามสมการ ที่อ้างอิงไว้ในบทที่ 2 เพื่อพิสูจน์ผลลัพธ์จากเครื่องมือทดสอบ โดยมีขั้นตอนต่อไปนี้

1. เก็บตัวอย่างสารละลายตามความเข้มข้นที่กำหนดอยู่ในภาชนะที่มิดชิดป้องกันการระเหย
2. เขย่าขวดสารละลายก่อนการทดลอง เพื่อให้ความเข้มข้นกระจายตัวให้ทั่ว
3. เทสารละลายลงไปในภาชนะจากนั้นจุ่มหัววัดลงในแนวตรงในสารละลาย
4. ทิ้งระยะเป็นเวลา 20 วินาทีเพื่อให้สารละลายเริ่มคงตัวแล้วบันทึกผล
5. ยกหัววัดออกแล้วเปลี่ยนค่าความเข้มข้นถัดไป

3.3 ขั้นตอนการทดสอบหัววัดในสภาวะความเข้มข้นสารละลาย

การทดสอบความเข้มข้นสารละลายเป็นกรณีศึกษา ผู้วิจัยเลือกเอทิลแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 95% เจือจางระดับความเข้มข้นโดยน้ำกลั่นทีละ 10% จนถึงความเข้มข้นต่ำสุด 5% แบ่งประเด็นในการทดลองเป็น 3 ประเด็นคือ

3.3.1 ประเด็นเรื่องสัดส่วนระยะห่างต่อความกว้าง (*d/w*) ของแผ่นตัวนำ

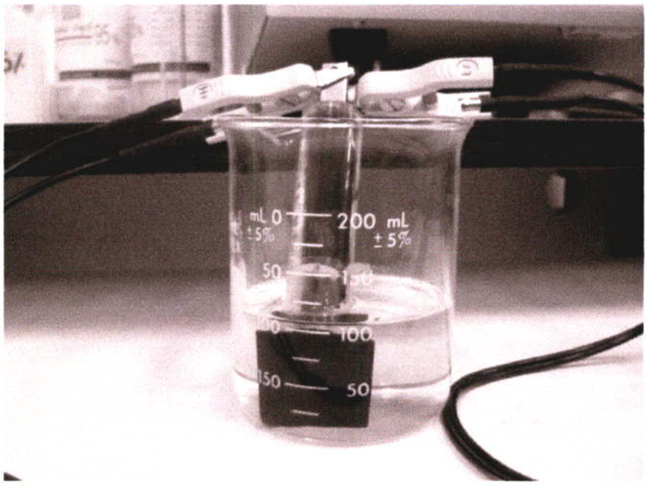
การทดลองนี้เป็นการกำหนดผลของความห่างต่อสัดส่วนความกว้าง อันเป็นผลกระทบต่อวงจรสมมูลภายในหัววัด โดยแบ่งหัววัดออกเป็น 2 ชนิดคือหัววัดชนิด A ระยะห่างระหว่างโลหะเท่ากับ 5 มิลลิเมตรและหัววัดชนิด B ระยะห่างระหว่างโลหะเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

3.3.2 ประเด็นเรื่องความผลตอบสนองความถี่ต่อค่าความจุไฟฟ้า

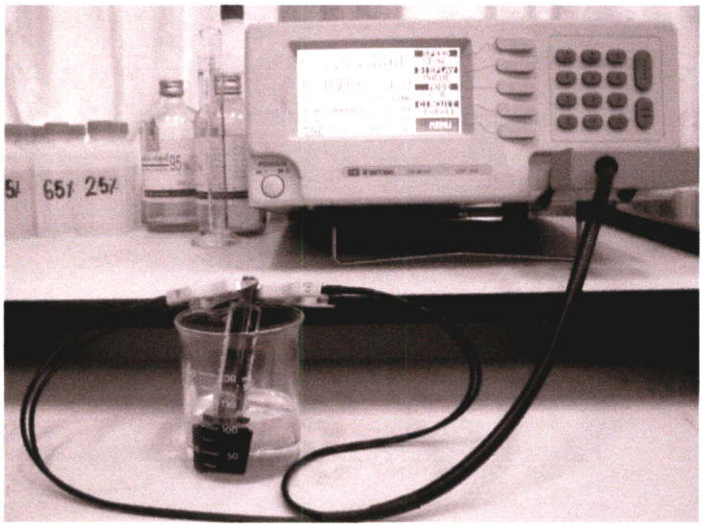
การทดลองนี้จะกำหนดให้ความเข้มข้นคงที่ แล้วสังเกตุดูผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 100Hz – 2kHz โดยมีขั้นการเปลี่ยนแปลงความถี่ครั้งละ 500Hz

3.3.3 ประเด็นเรื่องผลตอบสนองค่าความเข้มข้นต่อค่าความจุไฟฟ้า

การทดลองนี้กำหนดค่าความถี่ให้คงที่ สังเกตุผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นต่อค่าวงจรสมมูลจากเครื่องมือทดสอบ รูปที่ 3.4 เป็นการแสดงการทดสอบหัววัดภายในห้องทดลอง



รูปที่ 3.4 หัววัดภายใต้สภาวะทดสอบ



รูปที่ 3.5 ลักษณะเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐานยี่ห้อ Good Will รุ่น CTR สามารถปรับความถี่ตั้งแต่ 100 Hz สูงสุด 2 kHz รายละเอียดของเครื่องมือวัด R-L-C ดูจากภาคผนวก จ. ด้านหลัง

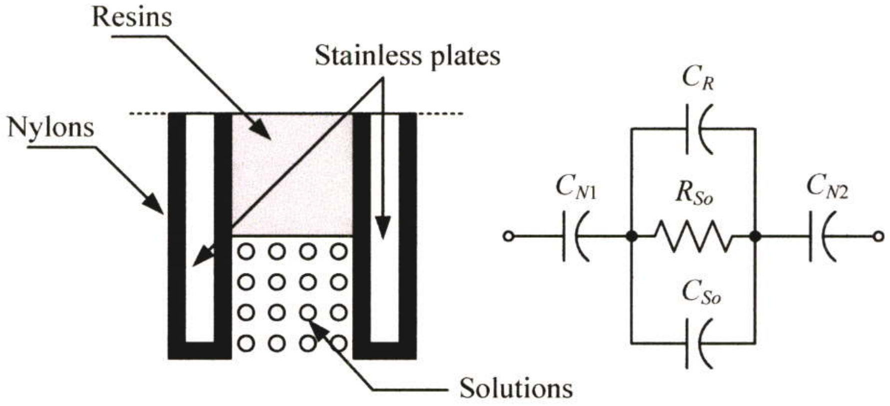
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลลัพธ์วงจรสมมูลของหัววัดและการเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณ

ผลการทดลองหัววัดที่ได้จากการทดสอบของเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐาน แสดงผลอยู่ในรูปค่าความจุไฟฟ้า (C_P) ขนานกับค่าความต้านทาน (R_P) โดยมีข้อสมมุติฐานกำหนดว่าหัววัดทดสอบในสภาวะและชนิดต่างๆต้องแสดงผลอยู่ในรูปค่าความจุไฟฟ้าเพียงเท่านั้นเนื่องจากผู้วิจัยต้องการประดิษฐ์หัววัดโดยใช้หลักการตัวเก็บประจุไฟฟ้าฉะนั้นผลลัพธ์ที่ออกมาควรจะมีค่าเป็นอุดมคติมากที่สุด

ก่อนที่จะหาสภาวะของหัววัดที่เป็นอุดมคติและย่านการใช้งาน เราจะทดลองเปรียบเทียบค่าของหัววัด โดยมองโครงสร้างต่างๆของหัววัดให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลไฟฟ้ากับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของหัววัดในรูปแบบวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

จัดวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหัววัดอยู่ในรูปแบบอิมพิแดนซ์ที่ประกอบด้วยส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

$$Z(\omega) = R_e(\omega) + I_m(\omega) \tag{4.1}$$

$$R_{e[Z(\omega)]} = \frac{R_{So}}{1+\omega^2 C_R^2 C_{So}^2} \tag{4.2}$$

$$I_{m[Z(\omega)]} = -\, j\, \frac{(1+\omega^2 C_M^2 R_{So}^2 + \omega C_N C_M R_{So}^2}{\omega C_N + \omega^3 C_N C_M^2 R_{So}^2} \tag{4.3}$$

เมื่อ $Re_{[Z(\omega)]}$ คือจำนวนจริง(Ω)

$Im_{[Z(\omega)]}$ คือจำนวนจินตภาพ(Ω)

C_N, C_{N2} คือค่าความจุไฟฟ้าของไนลอน $\varepsilon = 8$ ($C_{N1}//C_{N2} = C_N$)

C_R คือค่าความจุไฟฟ้าของเรซิ่น $\varepsilon = 3.8$

C_{So}, R_{So} คือคุณสมบัติของสารทดสอบ ε=25 (ที่ความเข้มข้นสาร 95%),อากาศ ε=1 และไม่เกิดค่า R_{So}

C_M คือค่า $C_S + C_R$

เมื่อนำขนาดความกว้างยาวและระยะห่างของหัววัดมาคำนวณตามสมการ $c = \frac{\varepsilon A}{d}$ ส่วนค่า R_S คำนวณมาจากสมการ $\tan\delta = \frac{1}{\omega RC}$ ซึ่งเป็นสมการความไม่เป็นอุดมคติของไดอิเล็คตริก ในสารทดสอบชนิดเอทิลแอลกอฮอล์ลมีค่า $\tan\delta$ =0.1 [5] จะให้ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัด ตามการคำนวณดังตารางที่ 4.1

ตารางที่4.1 ค่าการเก็บประจุของวัสดุประกอบเป็นหัววัดที่คำนวณได้

ชนิด(ระยะห่าง)	C_N (pF)	C_R (pF)	C_{So} อากาศ (pF)	ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดที่ไดอิเล็คตริกเป็นอากาศ $(C_R+C_{So})//C_N$ (pF)	C_{So} สารละลาย (pF)
A(5 mm.)	133	5.38	1.33	6.387	32.65
B(2.5mm.)	133	10.76	2.66	13.08	65

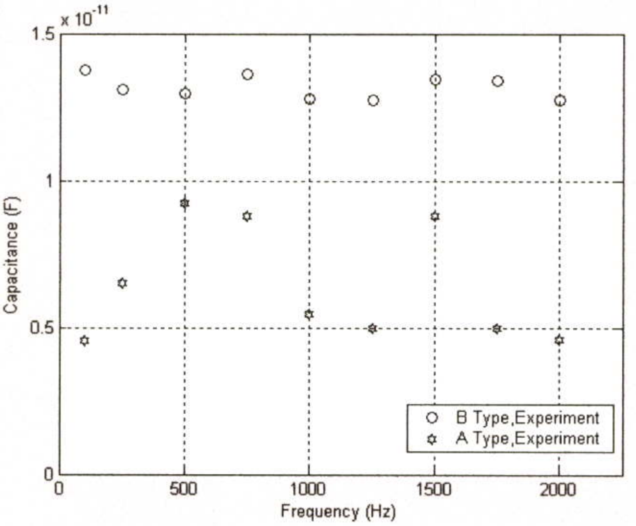
ต่อไปคือผลจากเครื่องมือวัด R-L-C แสดงผลในรูปค่าความต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุเมื่อนำมาจัดรูปแบบอิมพิแดนซ์มีส่วนจริงและจินตภาพดังต่อไปนี้ดังต่อไปนี้

$$Re[Z(\omega)] = \frac{R_P}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{4.4}$$

$$I_m[Z(\omega)] = -j\frac{\omega C_P R_P}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{4.5}$$

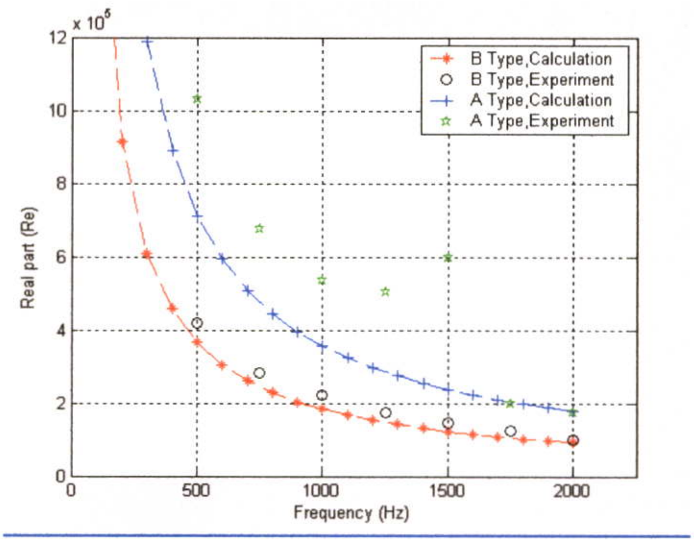
เมื่อ C_P คือค่าความจุไฟฟ้าที่แสดงโดยเครื่องมือวัด R-L-C

R_P คือค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แสดงโดยเครื่องมือวัด R-L-C

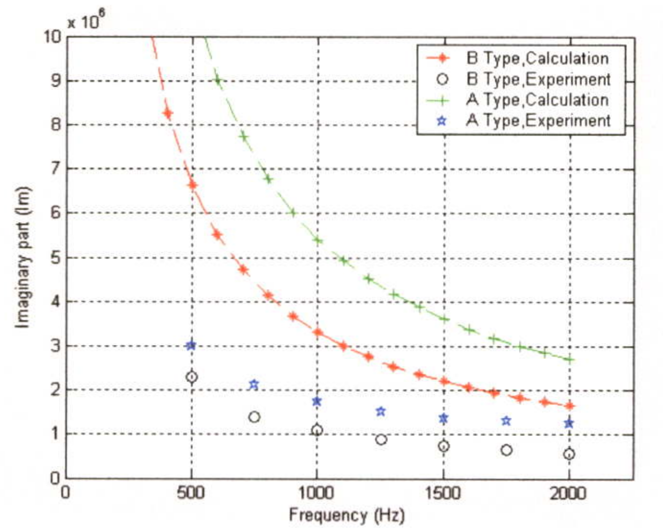


รูปที่ 4.2 ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดแบบ A และ B ในสภาวะบรรยากาศจากเครื่องมือวัด R-L-C

การทดสอบหัววัดชนิดสแตนเลสที่ความถี่ตั้งแต่ 100 Hz - 2 kHz ผลการทดลองที่ได้มีเพียงเฉพาะค่า C_P เท่านั้น เนื่องจาก R_P มีค่ามากเกินกว่าที่ย่านของเครื่องมือวัดสามารถที่จะแสดงได้ ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตัวหัววัดแบบ B และ Aในกรณีของอากาศ (ไม่เกิดค่า R_{So}) จึงรวมผลลัพธ์เฉพาะค่าความจุไฟฟ้าจากรูปที่ 4.1มีค่ากับ 13.08 pF และ 6.387 pF ตามลำดับ จากผลการทดลองหัววัดแบบ B จะให้เสถียรภาพที่สูงกว่าหัววัดแบบ A ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของหัววัดจากค่าที่คำนวณได้ แบบ B จะอยู่ระหว่าง 10% - 30% ส่วนแบบ A มีช่วงของการแกว่งตัวสูงระหว่าง 10% - 60% จากการทดลองพบว่า ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะตัวนำจะมีผลกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่ได้จากการวัด ส่วนในรูปที่ 4.3 และ 4.4 เป็นผลการทดสอบ หัววัด กับสารเคมีชนิดเอทิลแอลกอฮอล์ เปรียบเทียบกับค่าจริงและค่าจินตภาพ จากรูปในขณะที่เพิ่มความถี่ผลที่ได้จากการวัดจะลดต่ำลงสอดคล้องกับค่าทางสมมุติฐานโดยเฉพาะหัววัดแบบ A จะลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ในช่วงความถี่ 1.5 kHz แต่ในส่วนของจินตภาพจะเห็นได้ชัดว่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการทดลองอยู่มาก



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าจริง $Re_{[Z(\omega)]}$ ของหัววัดชนิดสแตนเลสที่วัดจริงกับค่าสมมุติฐานของเอทิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าจริง $Im_{[Z(\omega)]}$ ของหัววัดชนิดสแตนเลสที่วัดจริงกับค่าสมมุติฐานของเอทิลแอลกอฮอล์ล

ผลการทดลองตัวอย่างหัววัดชนิดสแตนเลส ในเรื่องการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง พบว่าที่สภาวะสารเป็นอากาศวงจรสมมูลประกอบด้วยค่าความจุไฟฟ้า

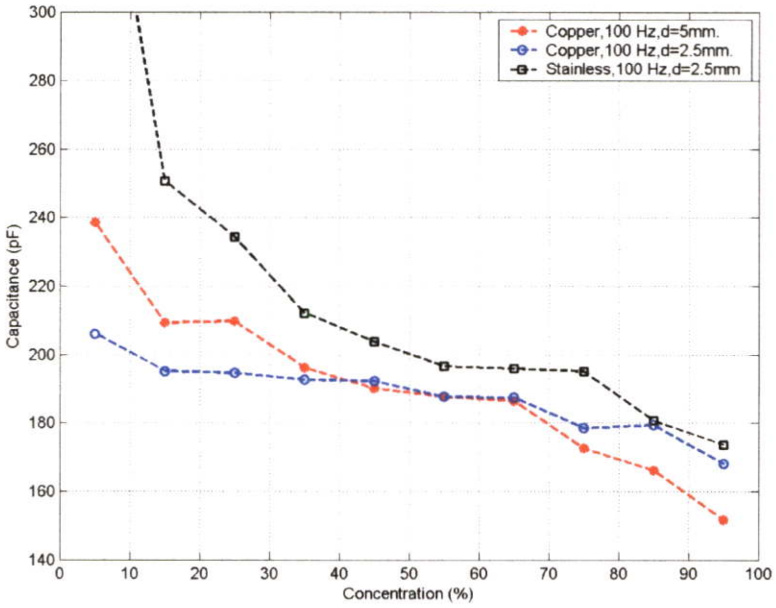
เพียงเท่านั้น เนื่องจากอากาศเป็นไดอิเล็คตริกที่มีค่าความนำต่ำกว่าสารละลาย ผลการเปรียบเทียบจึงมีความใกล้เคียงมากกว่าสารละลายที่เป็นของเหลวที่มีความไม่เป็นอุดมคติของไดอิเล็คตริกสูงกว่า ผลก็คือเมื่อเปรียบผลลัพธ์ของสารละลายมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าอากาศมาก

การทดลองต่อไปคือการหาสภาวะที่หัววัดแสดงผลออกมาในรูปค่าความจุไฟฟ้าเพียงเท่านั้น โดยเปรียบเทียบจากวัสดุชนิดสแตนเลสและทองแดงที่ระยะห่างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 2.5 mm.และ 5 mm. เปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบครั้งละ 500 Hz จากความถี่ต่ำสุดไปสูงสุดของเครื่องมือวัด R-L-C ภายใต้อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 23 องศาเซลเซียส โดยก่อนเริ่มการทดลองจุ่มลงในสารละลาย ได้บันทึกค่าในสภาวะก่อนเริ่มจุ่มเป็นเวลา 20 วินาทีของหัววัดดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 4.2 ค่าเริ่มต้นก่อนจุ่มหัววัดลงในสารละลายที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส

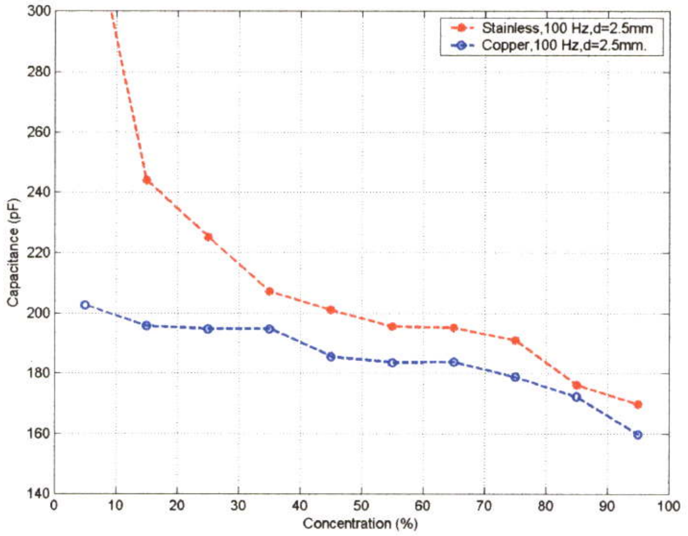
ชนิดของหัววัด	ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ				
	100 Hz	500 Hz	1000 Hz	1500 Hz	2000 Hz
ทองแดง 2.5 mm.	26.9 pF	20.4 pF	16.93 pF	15.56 pF	14.7 pF
สแตนเลส 2.5 mm.	28.1 pF	18.89 pF	15.97 pF	14.83 pF	14.20 pF
ทองแดง 5 mm.	11 pF	10.5 pF	10.4 pF	10.3 pF	10.3 pF
สแตนเลส 5 mm.	9.4 pF	8.75 pF	8.6 pF	8.58 pF	8.56 pF

จากผลการทดลองก่อนจุ่มสารละลาย ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุชนิดสแตนเลสมีค่าโดยเฉลี่ยน้อยกว่าทองแดง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตรมีค่าเท่ากับ 13.08 pF หัววัดชนิดทองแดงมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการคำนวณเท่ากับ 71.8% ชนิดสแตนเลสมีคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการคำนวณเท่ากับ 67.25% ที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรมีค่าจากการคำนวณเท่ากับ 6.387 pF หัววัดชนิดทองแดงมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการคำนวณเท่ากับ 75% ชนิดสแตนเลสมีคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการคำนวณเท่ากับ 46.3% และเมื่อนำหัววัดมาทดลองหาค่าความเป็นอุดมคติโดยแสดงผลในรูปของค่าความจุไฟฟ้า โดยแสดงผลในรูปที่ 4.5 คือที่ความถี่ 100 Hz ระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตรของวัสดุชนิดมองแดงกับสแตนเลส และที่ความถี่ 100 Hz ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรของวัสดุชนิดมองแดงที่แสดงผลเฉพาะค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



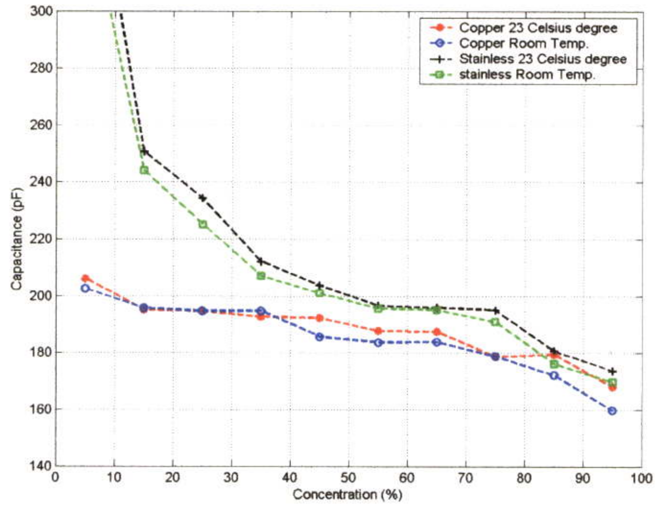
รูปที่ 4.5 ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.6 เป็นการแสดงผลค่าความจุไฟฟ้าของหัววัด โดยไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดลองโดยอุณหภูมิขณะนั้นอยู่ที่ 27 – 33 °C ผลที่แสดงเฉพาะค่าความจุไฟฟ้ามีเพียงระยะห่างเท่ากับ 2.5 mm.ของวัสดุตัวนำทั้ง 2 ชนิดเท่านั้นที่ความถี่ 100 Hz จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น (เอทิลแอลกอฮอล์ล) โดยเติมน้ำกลั่นซึ่งเป็นสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็คตริกมากกว่าสารตั้งต้น ผลรวมของไดอิเล็คตริกรวมจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเจือจางความเข้มข้น[1] เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ขณะที่ความถี่ 100 Hz ซึ่งเป็นความถี่ทดสอบน้อยที่สุดของเครื่องมือวัด โดยปรากฏค่าวงจรสมมูลของหัดวัดเฉพาะค่าความจุไฟฟ้า (C_P) เพียงเท่านั้นส่วนค่าความต้านทาน (R_P) จะมีค่าสูงในระดับที่เครื่องมือวัดไม่สามารถแสดงผลได้ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ 2.30 คือ $R_P = \dfrac{1}{\omega\varepsilon'' C_O}$ ที่ค่า ω ลดลงจะแปรผกผันให้ค่า R_P เพิ่มมาขึ้นส่วนระยะห่างของตัวนำขนาด 5 mm. นั้นค่าความต้านทานที่แสดงออกมาในระดับเมกกะโอห์ม แต่ยังอยู่ในขอบเขตที่เครื่องมือวัดยังสามรถแสดงผลได้ จึงเป็นเหตุผลให้ค่าดังกล่าวไม่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.6 ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดโดยปราศจากการควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 4.7 คือการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากสภาวะการควบคุมอุณหภูมิและค่าจากอุณหภูมิห้องของรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิห้องค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าเนื่องมีอุณหภูมิสูงกว่าเป็นผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็คตริกและค่าความจุไฟฟ้าลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.21 เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแล้วพบว่ามีค่าไม่เกิน 3% โดยเฉลี่ยตลอดทั้งย่านความเข้มข้น



รูปที่ 4.7 เปรียบผลลัพธ์ระหว่างการควบคุมอุณหภูมิและไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิ

4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและสูตรการแปลงผัน

หัวข้อที่แล้วคือผลการทดลองของหัววัดที่แสดงผลอยู่ในรูปวงจรสมมูลแบบขนาน ที่มีค่าเป็นอุดมคติมากที่สุดนั้นก็คือแสดงผลเฉพาะค่าความจุไฟฟ้า การแสดงผลวงจรสมมูลของเครื่องมือวัดสามารถแสดงได้ 2 ลักษณะ คือ แบบอนุกรมหรือแบบขนานดังที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1 เพื่อยืนยันความสัมพันธ์การแปลผันของวงจรทั้งสองและความชัดเจนของหัววัด ผู้วิจัยจึงทดสอบหัววัดให้แสดงผลทั้งวงจรขนานและอนุกรมเลือกข้อมูลที่มีค่าเป็นอุดมคติมากที่สุดนำเสนอในหัวข้อที่ 4.1 โดยไม่นำข้อมูลดังกล่าวมานำเสนอในหัวข้อนี้ เนื่องจากเครื่องมือวัดไม่สามารถแสดงผลในรูปของ R_P ที่เกิดขึ้นภายในตัวหัววัดได้ ด้วยเหตุนี้ข้อมูลจึงไม่สามารถหาค่า R_S ได้จากสมการที่ 2.42

การนำเสนอในหัวข้อนี้คือการเปรียบข้อมูล ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่แสดงผลจากเครื่องมือวัดโดยนำค่าวงจรสมมูลแบบขนานที่ได้จากเครื่องมือวัด แทนในสมการที่ 2.32 คือ $\tan\delta = \dfrac{1}{\omega C_p R_p}$ และ 2.42 คือ $C_P = \dfrac{C_S}{1+\tan^2\delta}$ และ $R_P = R_S\left(1+\dfrac{1}{\tan^2\delta}\right)$ เมื่อได้ค่า C_S และ R_S แล้วนำไปเปรียบกับค่าที่แสดงผลในรูปวงจรสมมูลแบบอนุกรมจากเครื่องมือวัด R-L-C แสดงผลในรูปแบบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (เปรียบเทียบค่าที่วัดกับสูตรการแปลงผันวงจรสมมูล C_S และ R_S ดูภาคผนวก ข.)

ตัวอย่างการคำนวณเปรียบเทียบของหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรที่ระดับความเข้มข้นสาร 15% วัดค่า R_P และ C_P เฉลี่ย 5 ครั้งได้เท่ากับ 4.483 MΩ และ 127.5 pF ในขณะเดียวกันวัดค่า R_S และ C_S เฉลี่ย 5 ครั้งได้เท่ากับ 317.16 kΩ และ 137.46 pF ตามลำดับความถี่ที่เครื่องมือวัด R-L-C ใช้ทดสอบคือ 1000 Hz จากนั้นคำนวณหาค่า R_S และ C_S ตามสมการที่ได้อ้างอิงไว้

$$\tan\delta = \frac{1}{2\times 3.141\times 10^3\times 4.483\times 10^6\times 127.5\times 10^{-12}} = 0.2786$$

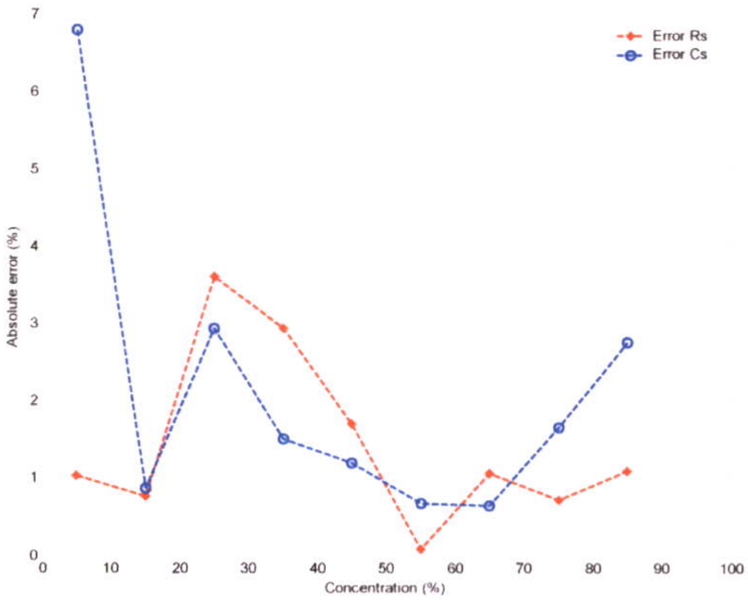
$$C_s = 127.5\times 10^{-12}\left(1+0.2786^2\right) = 137.39 \text{ pF}$$

$$R_s = \frac{4.483\times 10^6}{\left(1+\dfrac{1}{0.2786^2}\right)} = 322.91\text{k}\Omega$$

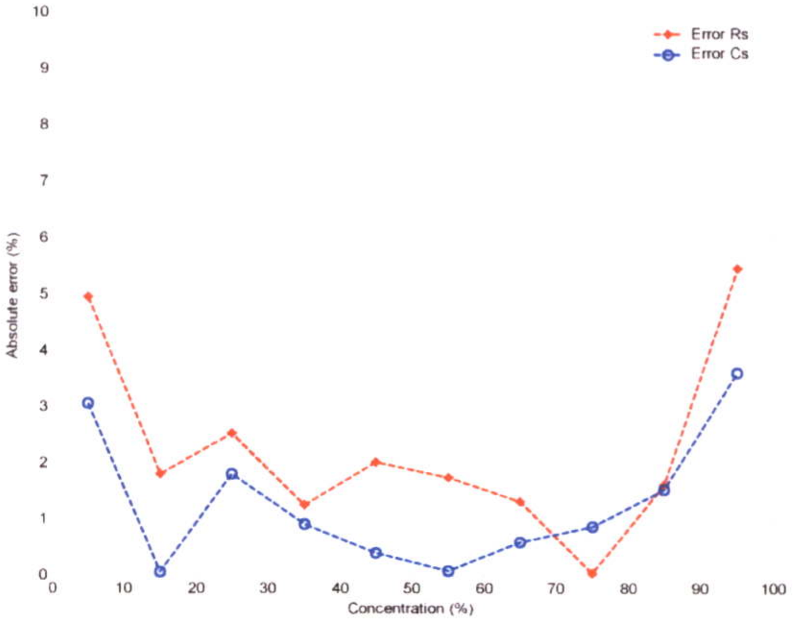
ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ของ $C_S = \dfrac{|137.39-137.46|}{137.46}\times 100 = 0.051\%$

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ของ $R_S = \dfrac{|322.91-317.16|}{317.16}\times 100 = 1.813\%$

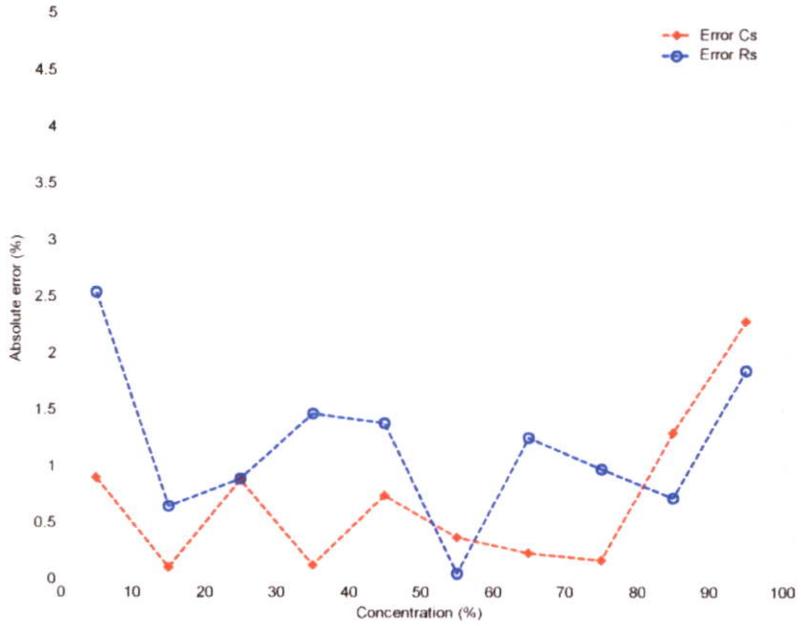
4.2.1 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดทองแดงใช้เป็นตัวนำมีระยะระหว่างแผ่น 5 มิลลิเมตร



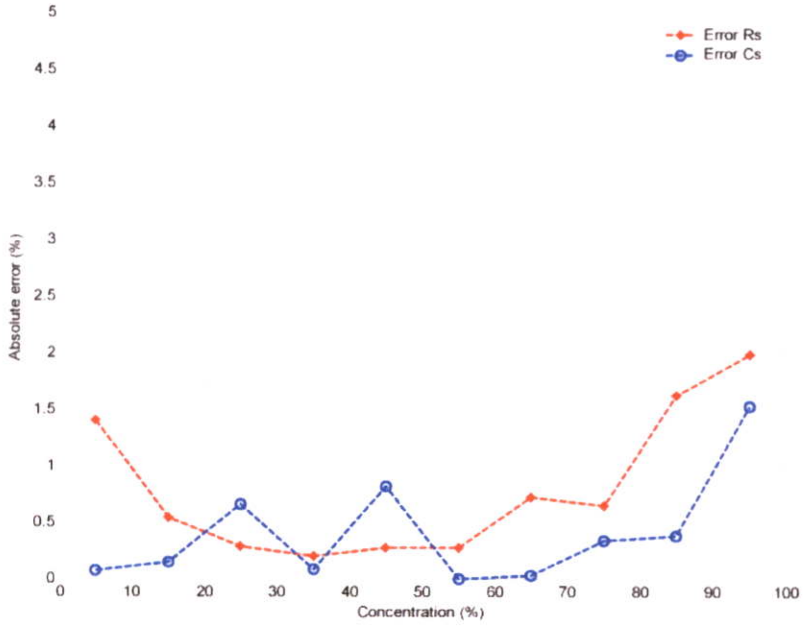
รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz

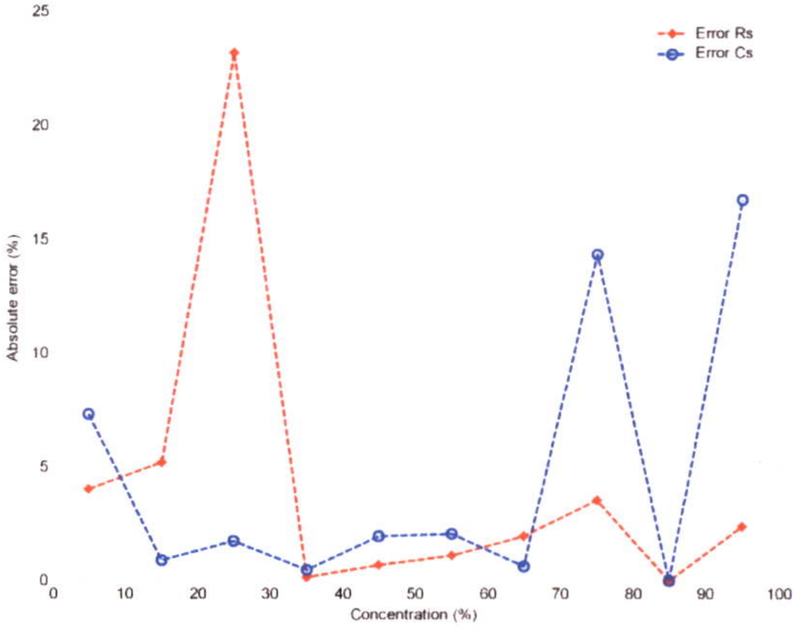


รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz

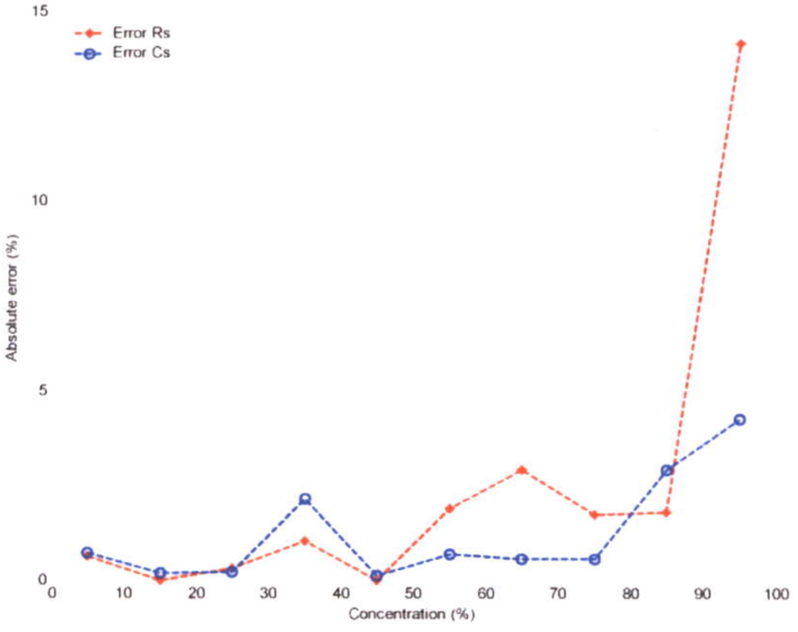


รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz

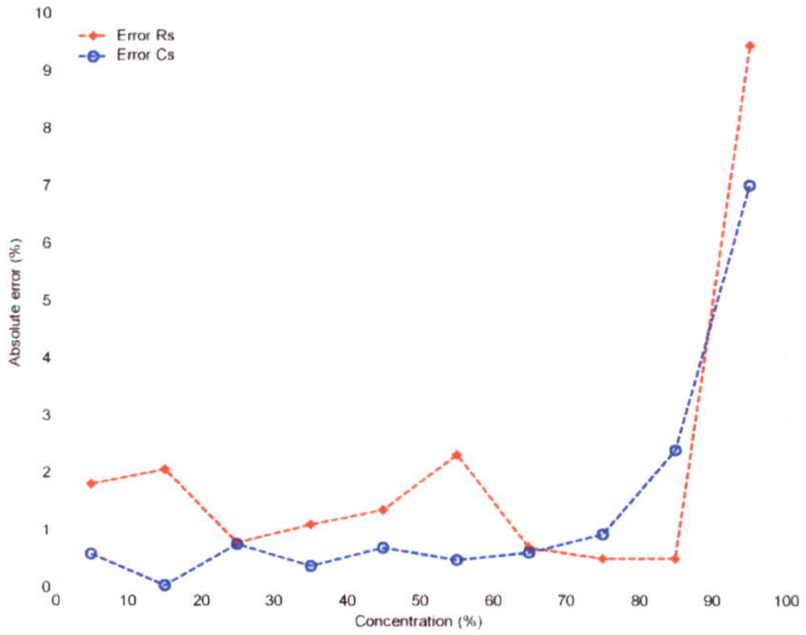
4.2.2 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดสแตนเลสใช้เป็นตัวนำมีระยะระหว่างแผ่น 5 มิลลิเมตร



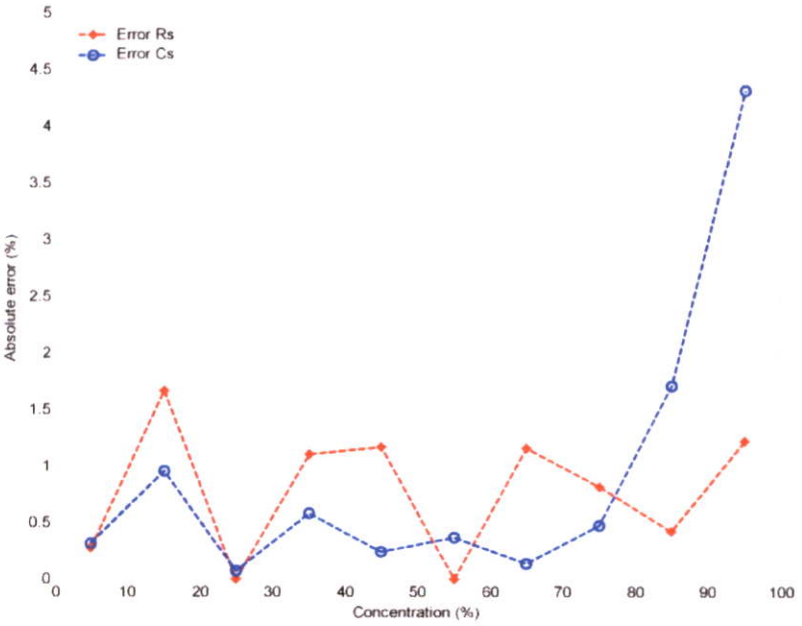
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 100 Hz



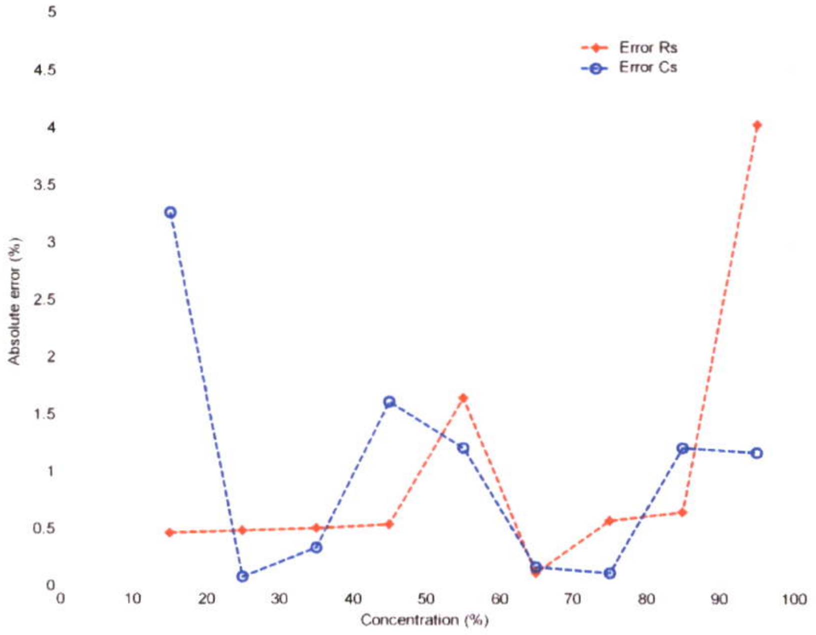
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz

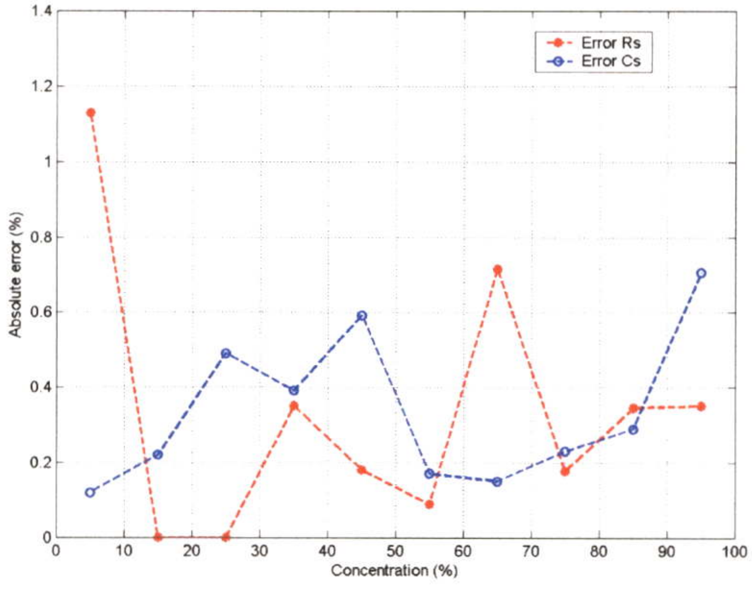


รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz

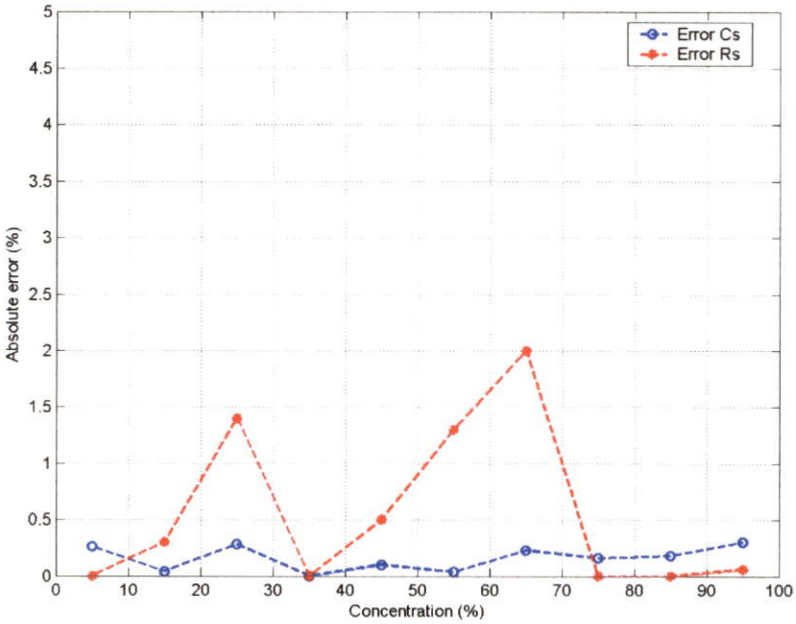


รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz

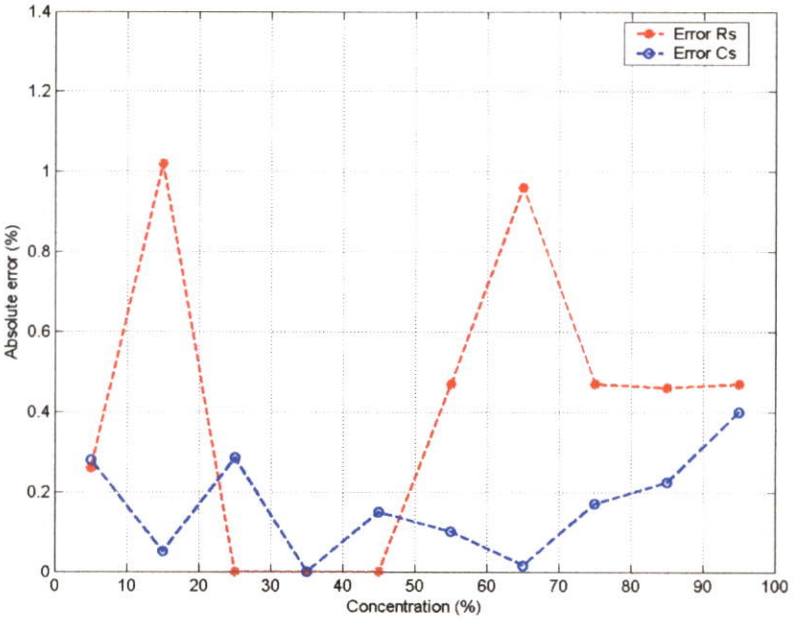
4.2.3 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดทองแดงใช้เป็นตัวนำมีระยะระหว่างแผ่น 2.5 มิลลิเมตร



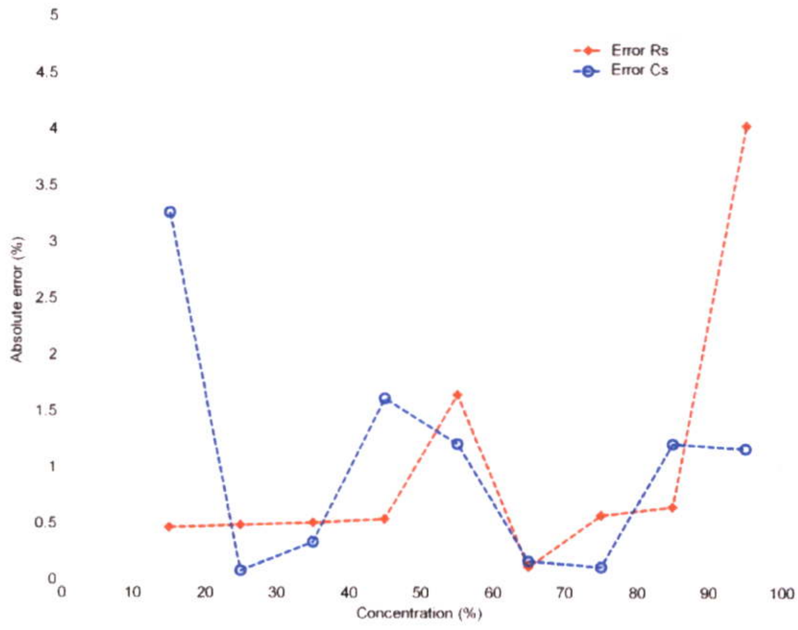
รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz

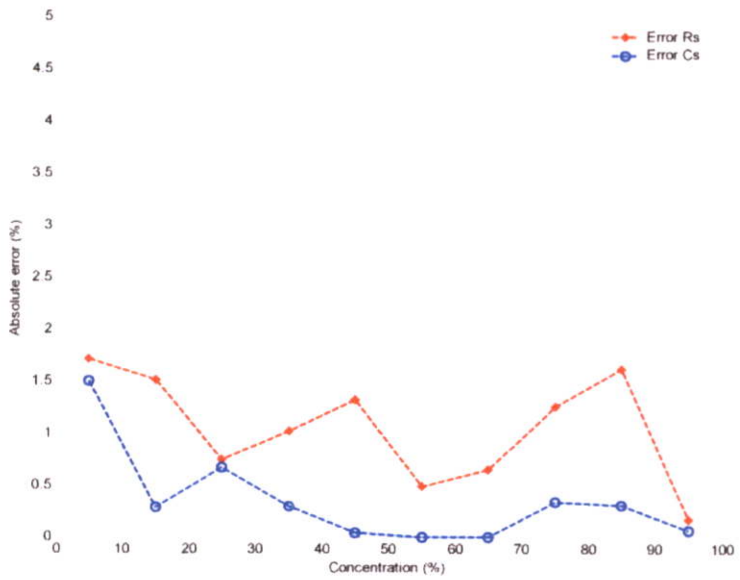


รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz

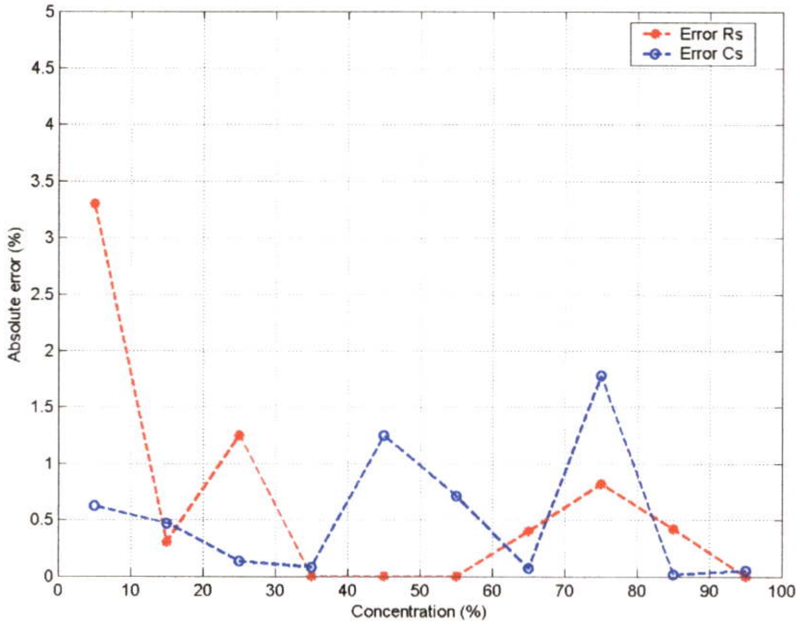


รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของทองแดง 2.5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz

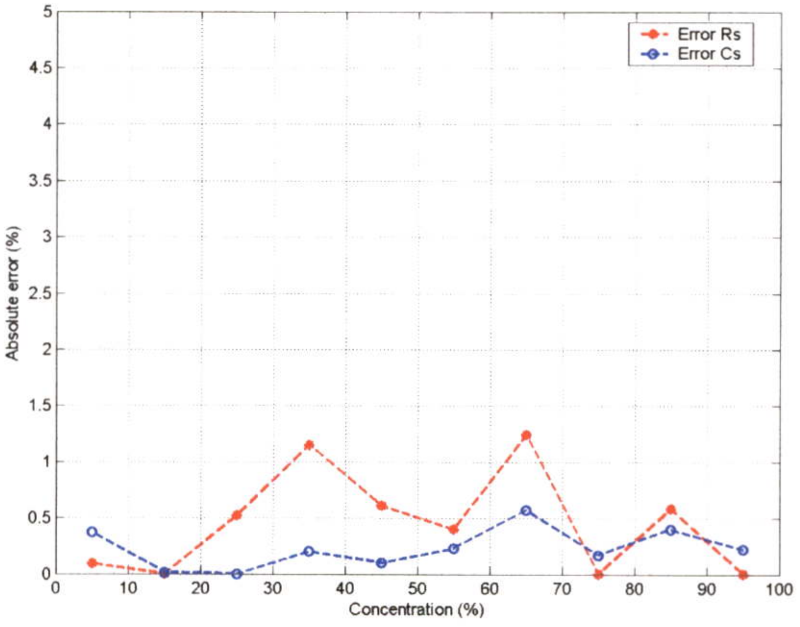
4.2.4 ผลการเปรียบเทียบของวัสดุชนิดสแตนเลสใช้เป็นตัวนำมีระยะระหว่างแผ่น 2.5 มิลลิเมตร



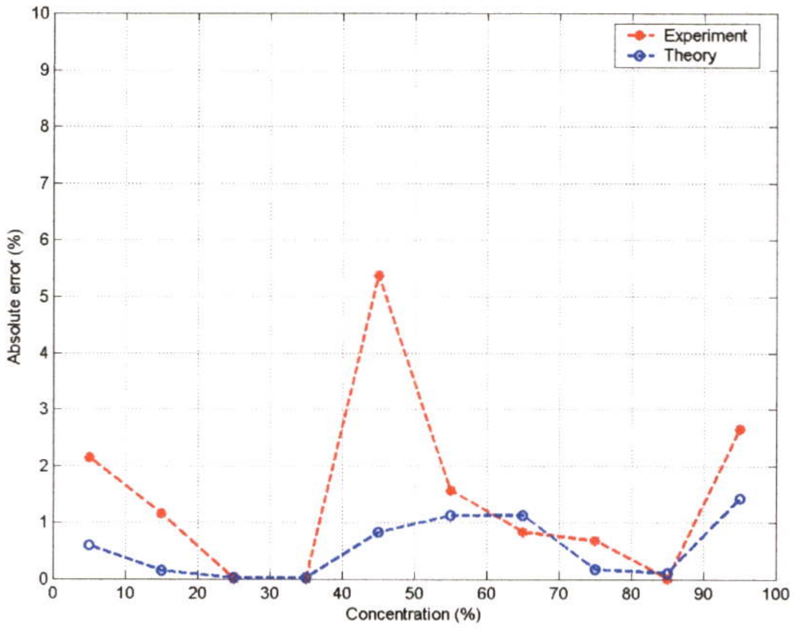
รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 1000 Hz



รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 1500 Hz



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของสแตนเลส 2.5 มม.ที่ความถี่ 2000 Hz

จากผลการทดลองที่ระยะห่างแผ่นตัวนำ 5 มม. มีผลค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์โดยเฉลี่ยมากกว่าระยะ 2.5 มม. โดยที่ระยะ 2.5 มม.มีค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยประมาณ 1.5 % ในขณะที่ค่า 5 มม.มีค่าอยู่ที่ประมาณ 5 % ของวัสดุทั้ง 2 ชนิด

4.3 ความสามารถในการซ้ำค่าเดิมของหัววัด

ความสามารถในการซ้ำค่าเดิมหาได้มาจากการนำผลลัพธ์ที่ต้องการในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งมีคุณลักษณะที่หัววัดแสดงค่าวงจรสมมูลออกมาเฉพาะค่าความจุไฟฟ้าเพียงเท่านั้น มาคำนวณทางสถิติเพื่อกำหนดความเชื่อมั่นต่อผลลัพธ์ จำนวนครั้งในการทดสอบในแต่ละย่านความเข้มข้นมีจำนวนเท่ากับ 5 ครั้ง โดยผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สมการคำนวณดูในภาคผนวก ค. ตารางที่ 4.2 - 4.4 ด้านล่างเป็นข้อมูลจากการคำนวณทางสถิติของหัววัดตามสภาวะของการทดลอง

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะทางสถิติงองหัววัดตัวนำประเภททองแดงระยะห่าง 5 มม. ที่ความถี่ 100 Hz

ค่าความเข้มข้น(%)	$\overline{X}$ (pF)	$S(x)$	U(pF)
95	151.60	14.587	13.048
85	166.0	4.0	3.5778
75	172.6	8.29	7.419
65	186.39	5.366	4.80
55	187.6	4.56	4.079
45	190.0	9.38	8.39
35	196.19	1.78	1.60
25	209.80	7.69	6.88
15	209.39	10.80	9.66
5	238.6	2.19	1.959

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะทางสถิติของหัววัดตัวนำประเภททองแดงระยะห่าง 2.5 มม. ที่ความถี่ 100 Hz

ค่าความเข้มข้น(%)	$\overline{X}$ (pF)	$S(x)$	U(pF)
95	167.96	8.034	7.18
85	179.32	6.45	5.772
75	178.51	6.39	5.72
65	187.425	2.72	2.44
55	187.63	3.42	3.06
45	192.29	3.28	2.93
35	192.68	6.69	5.988
25	194.62	4.337	3.88
15	195.15	2.519	2.253
5	206.10	27.04	24.43

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะทางสถิติของหัววัดตัวนำประเภทสแตนเลสระยะห่าง 2.5 มม. ที่ความถี่ 100 Hz

ค่าความเข้มข้น(%)	$\overline{X}$ (pF)	$S(x)$	U(pF)
95	173.819	6.358	5.687
85	180.62	2.124	1.899
75	195.14	3.106	2.77
65	195.94	2.56	2.29
55	196.58	1.42	1.27
45	203.79	5.631	5.036
35	212.22	3.077	2.752
25	234.31	5.391	4.822
15	250.77	3.44	3.082
5	368.17	6.52	5.83

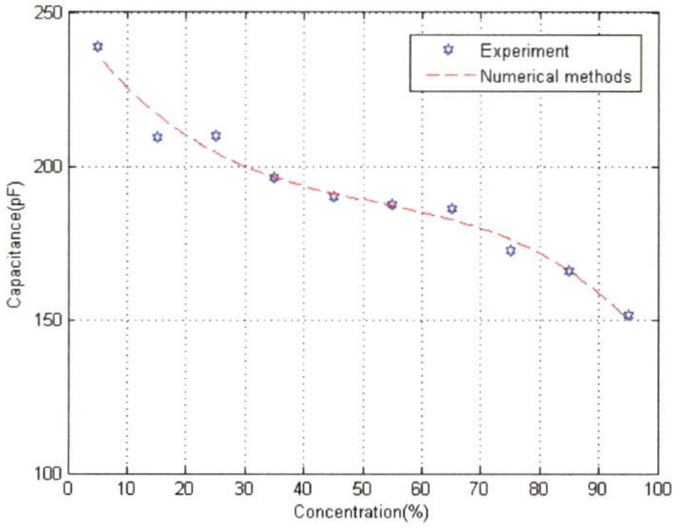
จากผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความสามารถในการซ้ำค่าเดิมของหัววัด (U) พบค่าระยะความห่างของตัวนำที่ระยะ 5 มม.ของวัสดุชนิดทองแดงมีค่าความไม่แน่นอนโดยเฉลี่ยตลอดทั้งย่านวัดมากที่สุด ส่วนค่าความไม่แน่นอนโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดคือระยะความห่าง 2.5 มม.ของวัสดุชนิดสแตนเลส

4.4 ฟังก์ชั่นความสัมพันธ์ของหัววัดจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากกาทดลองเป็นข้อมูลที่กระจายตัวแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองในงานทางด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจำนวนมากเหล่านี้ต้องนำมาหาแนวโน้มช่วงใช้งานจากการประมาณค่า ให้อยู่ในรูปแบบของสมการโดยประดิษฐ์ฟังก์ชั่นพหุนามในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$g(m) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + ... + a_mx^m \qquad (4.6)$$

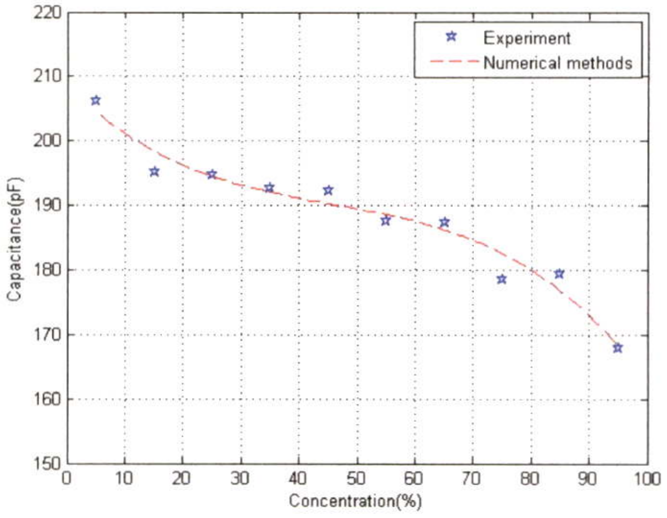
โดย $a_0, a_1, a_2, ..., a_m$ เป็นค่าคงที่ไม่รู้ค่าซึ่งต้องคำนวณโดยการประดิษฐ์โปรแกรมช่วยหาค่าทางคอมพิวเตอร์(ข้อมูลเพิ่มเติมดูในภาคผนวก ง.) จากรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่เราต้องการจากหัววัด จึงนำข้อมูลมาประดิษฐ์ฟังก์ชั่นดังรูปที่ 4.25 – 4.27



รูปที่ 4.25 ฟังก์ชั่นที่สร้างมาจากข้อมูลของหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะ 5 มิลลิเมตร

ฟังก์ชั่นของข้อมูลรูปที่ 4.25 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.7 คือ

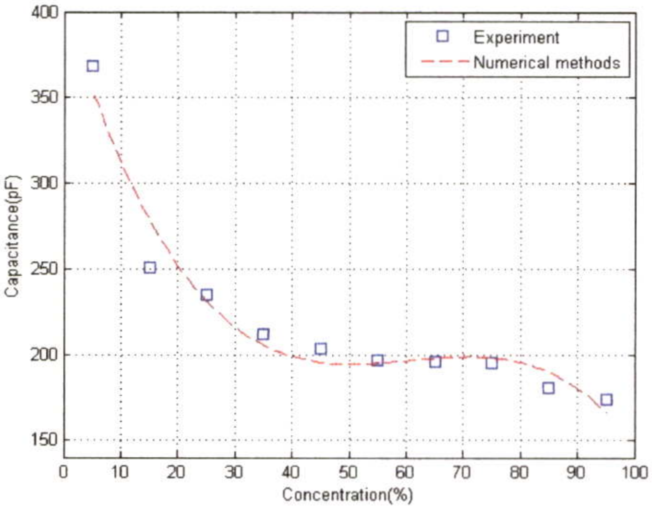
$$C(x) = 247.8 - 2.64x + 0.043x^2 - 0.000274x^3 \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.26 ฟังก์ชั่นที่สร้างมาจากข้อมูลของหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตร

ฟังก์ชั่นของข้อมูลรูปที่ 4.26 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.8 คือ

$$C(x) = 208.466629 - 0.885894x + 0.015x^2 - 0.000116x^3 \tag{4.8}$$



รูปที่ 4.27 ฟังก์ชั่นที่สร้างมาจากข้อมูลของหัววัดชนิดสแตนเลสที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตร

ฟังก์ชั่นของข้อมูลรูปที่ 4.27 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.9 คือ

$$C(x) = 403.624756 - 10.882008x + 0.184581x^2 - 0.001014x^3 \tag{4.9}$$

เมื่อ $C(x)$ คือฟังก์ชั่นค่าความจุไฟฟ้า

x คือค่าความเข้มข้นสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ล

จากรูปที่ 4.25 – 4.27 พบว่าแนวโน้มของหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรมีช่วงการใช้งานที่ 35%-65% ชนิดทองแดงที่ระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตรมีช่วงการใช้งานที่ 25%-55% ส่วนสแตนเลสอันสุดท้ายที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรมีช่วงใช้งานที่ 15%-55%

4.5 วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 4.1 เป็นจุดประสงค์หลักของผลการทดลองคือ หัววัดมีค่าความต้านทานภายในมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จากผลการทดลองมีอยู่สภาวะเดียวเท่านั้นคือ 100 Hz โดยผลของค่าความต้านทานที่สามารถแสดงได้โดยเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 10 MΩ หากผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเกินกว่านี้เครื่องมือวัดจะแสดงคำว่า Over Range ขึ้นมา แต่ถ้าหากเป็นเครื่องมือวัดชนิดอื่นที่มีความสามารถในการวัดค่าความต้านภายในมากกว่า 10 MΩ ผลลัพธ์ที่ต้องนำไปหาค่าความไม่เป็นอุดมคติของตัวเก็บประจุจากสมการที่ 2.32 หากตัวเก็บประจุมีความใกล้เคียงกับอุดมคติ ค่าดังกล่าวต้องน้อยกว่าค่า1มากๆ ($\tan\delta <<1$) โดยในกรณีที่ $\tan\delta$น้อยกว่า 0.1สามารถพิจารณาตัดผลระทบจากค่าความต้านออกไปได้ [13]

เมื่อดูถึงเรื่องการนำไปใช้งานจากการทดลองที่ 4.3-4.4 เห็นได้ว่าหัววัดชนิดสแตนเลสระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตรมีย่านที่เป็นเชิงเส้นที่ค่าความเข้มข้น 15-55 เปอร์เซ็นต์ มีความละเอียดโดยเฉลี่ยประมาณ 8.6 pF ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดไม่เกิน 5 pF ส่วนหัววัดชนิดทองแดงระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตรมีย่านที่เป็นเชิงเส้นที่ค่าความเข้มข้น 25-55 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความละเอียดโดยเฉลี่ยประมาณ 2 pF ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ โดยผลกระทบทางด้านอุณหภูมิเมื่อไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิในห้องทดลองหัววัดชนิดทองแดงที่ระยะห่าง 5 มิลลิเมตรมีค่าความต้านทานลดลงไปอย่างมาก แต่ในส่วนที่ระยะห่าง 2.5 มิลิเมตรทั้งชนิดทองแดงและสแตนเลสค่าความต้านทานยังคงอยู่ในพิกัดส่วนค่าความจุไฟฟ้าลดลงโดยเฉลี่ยไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์เหตุผลเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็คตริกลดค่าลงดังที่อธิบายในบทที่ 2 ส่วนเหตุผลที่ระยะ 5 มิลลิเมตรมีผลกระทบทางด้านอุณหภูมิมากกว่าที่ระยะ 2.5 เนื่องจากมีค่า Fringing Field และมีปริมาตรในการตรวจวัดมากกว่าจึงมีเสถียรภาพต่อสิ่งรบกวนต่ำสังเกตจากค่าความไม่แน่นอนที่สูงกว่าระยะ 2.5 มิลลิเมตร

ต่อมาเปรียบเทียบที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตรของโลหะชนิดสแตนเลสและทองแดงพบว่าสแตนเลสมีคุณลักษณะที่ดีกว่าคือ มีย่านวัดที่เป็นเชิงเส้นมากกว่า มีความละเอียดต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นมากกว่าและค่าความไม่แน่นอนในการวัดน้อยกว่าดังที่ได้แสดงผลไปแล้ว ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากกรรมวิธีการผลิตหัววัด จากการนำแผ่นโลหะไปเคลือบไนลอนต้องมีการให้ความร้อนสูงแก่โลหะจนไนลอนสามารถติดเข้าผิวของวัสดุ ด้วยเหตุที่ทองแดงมี Tensile Strength ต่ำกว่าสแตนเลสจึงไม่สามารถทนได้ทำให้โครงสร้างเสียไป

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้การนำเสนอ การออกแบบและสร้างหัววัดค่าความเข้มข้นของสายละลายประเภทเอทิลแอลกอฮอล์ลเป็นกรณีศึกษา โดยใช้หลักการตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นทฤษฎีเบื้องต้น หัววัดที่สร้างขึ้นมาใช้วัสดุมาเปรียบเทียบ 2 ชนิดคือ วัสดุที่ใช้งานกันทั่วไปคือทองแดงและโลหะที่มีคุณสมบัติดีกว่าทองแดงคือสแตนเลส เครื่องมือวัดที่นำมาใช้ประกอบการทดลองคือเครื่องมือวัดมาตรฐาน R-L-C ยี่ห้อ Good Will ประเด็นในการทดสอบหัววัดประกอบไปด้วยเรื่องระยะความห่างระหว่างแผ่นตัวนำ และความถี่ที่ใช้ในการทดสอบที่มีผลกระทบต่อวงจรสมมูลของหัววัด สมมุติฐานของหัววัดที่ต้องการคือ วงจรสมมูลของหัววัดต้องแสดงให้อยู่ในรูปของค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

จากผลการทดลองที่ระยะความห่าง 5 มิลลิเมตรมีความเสถียรภาพน้อยกว่าที่ระยะความห่าง 2.5 มิลลิเมตร และที่ความถี่ 100 Hz ของระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตรของวัสดุทั้งสองชนิดให้ผลลัพธ์ออกมาในรูปของค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ชนิดสแตนเลสมีย่านการใช้งานอยู่ที่ 15-55 เปอร์เซ็นต์ ส่วนทองแดงมีย่านการใช้งานที่ 25-55 เปอร์เซ็นต์ แต่สแตนเลสมีข้อได้เปรียบที่มีค่าความละเอียดต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสูงกว่าและความไม่แน่นอนในการวัดต่ำกว่า ในเรื่องของอุณหภูมิมีผลกระทบต่อหัววัดเล็กน้อยโดยมีค่าลดลงไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่วัดได้

หัววัดที่แสดงผลออกมาเฉพาะค่าความจุไฟฟ้ามีข้อดีไม่เพียงแต่มีความเป็นอุดมคติเท่านั้น แต่หากพิจารณาถึงในแง่การนำไปต่อใช้งานของหัววัด หากนำไปต่อร่วมกับวงจรปรับขนาดสัญญาณ วงจรที่นิยมใช้คือวงจรบริดจ์ หากหัวเปรียบเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าค่าหนึ่งการปรับขนาดสัญญาณ ชดเชยสัญญาณและการหาสมดุลบริดจ์ก็ง่ายขึ้น เพราะอุปกรณ์ที่เข้ามาต่อในวงจรก็จะประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ถ้าหากเกิดส่วนของความต้านทานขึ้นมาด้วยความยุ่งยากในการเพิ่มอุปกรณ์ประเภทตัวต้านทาน และการปรับสมดุลบริดจ์ก็ยุ่งยากตามมาเนื่องจากต้องปรับทั้งแอมพลิจูดและผลต่างเฟสให้เท่ากัน

จาการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณกับหัววัดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมาในหัวข้อที่ 4.1 หากมีการพัฒนาหัววัดให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในการดิษฐ์หัววัดเช่น วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จะเป็นการประหยัดเวลาในการทดลองและให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] G.R. Govinda Raju, "Dielectric Constant of Binary of Liquids." *IEEE Proceeding*, October 2000.

[2] S.C. Saxena and G.M. Tayal, "Capacitive Moisture Meter." *IEEE Trans.Instrum.Meas.*, Vol.IECI-28, No.1, February 1981.

[3] J.F. Posada.et.al., "An Automated Data Acquisition System for Modeling the Characteristic of a Soil Moisture Sensor." *IEEE Trans.Instrum.Meas.*, Vol.40, No.5, October 1991.

[4] L. Xu.et.al., "Capacitance-Base Concentration Measurement for Gas-Particle System with Particle Loading." *Flow Meas. and Instrum.*, No.11, 2000.

[5] Hayt, W. and Buck, J. 2001. "Engineering Electromagnetic." Singapore : McGraw – Hill.

[6] Walker, C. 1990. "Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis." 537. Norwood : ARTECH HOUSE, Inc.

[7] V. Leus and D. Elata, "Fringing Field Effect in Electrostatic Actuators." *Technical Report ETR-2004-2*, Israel Institute of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, May 2004.

[8] M.H. Bao, "Handbook of Sensor and Actuators." Vol.8, pp. 144 – 145, 2000.

[9] H.B. Palmer, "Capacitance of Parallel-Plate Capacitor by the Schwatz – Christoffel Transformation." *Trans.AIEE.*, Vol.56, March 1927.

[10] A. Zabobini.et.al., "Automatic – Test Equipment for the Characterization of Aluminum Electrolytic Capacitor." *Trans.Instrum.Meas.*, Vol.55, No.2, April 2006.

[11] B. Lacquet and P. Swart, "A New Electrical Circuit Model for Porous Dielectric Humidity Sensors." *Sensors and Actuator B.*, Vol.17, pp. 41 – 46, 1993.

[12] P.S. Neelakanta. 1995. "Handbook of Electromagnetic Materials." Boca Raton : CRC.

[13] สำรวย สังข์สะอาด. 2528. "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง." กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

สมการความสัมพันธ์ช่วงจรสมูลขนานและอนุกรม

สมการความสัมพันธ์วงจรสมมูลขนานและอนุกรม

ก.1 สมการของ Curie's law

$$i(t) = \frac{U_O}{h_1 t^n} \quad 0 < n < 1 \,,\, t > 0 \qquad (ก.1)$$

แปลง Laplace Transform

$$I(s) = \frac{\Gamma(1-n)U_O}{h_1 s^{1-n}} \quad 0 < n < 1 \qquad (ก.2)$$

$\Gamma(1\text{-}n)$ คือแกรมมาฟังก์ชั่นได้มาจากการแปลง Laplace Transform ของ $\frac{1}{t^n}$ และ $n > -1$.

$$\Gamma(1-n) = \int_0^{\infty} t^{-n} e^{-t} dt \,,\, 0 < n < 1 \qquad (ก.3)$$

U_O คือ Unit step function แต่หากสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามเวลา $U(t) = U_O t$ เมื่อ $t > 0$ แปลงให้อยู่ในรูป Laplace Transform $U(s) = \frac{1}{s}$ ดังนั้น Transfer Function ของระบบนี้เท่ากับ

$$\frac{I(s)}{U(s)} = H(s) = \frac{\Gamma(1-n)s^n}{h_1} \,,\, 0 < n < 1 \qquad (ก.4)$$

เมื่อ h_1 เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $h_1 = \frac{hd}{A}$ d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ A คือพื้นตัวนำ h คือค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกและกำหนดให้ $\frac{\Gamma(1-n)}{h_1} = \varepsilon' C_O$ จึงได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \varepsilon' C_O s^n \qquad (ก.5)$$

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบ Sinusoidal, $s = j\omega$

$$\frac{I(j\omega)}{U(j\omega)} = \varepsilon' C_O (j\omega)^n$$

$$\frac{I(j\omega)}{U(j\omega)} = \varepsilon' C_O \omega^n e^{(\frac{j\pi n}{2})}$$

$$\frac{I(j\omega)}{U(j\omega)} = \varepsilon' C_O \omega^n (\cos\frac{\pi n}{2} + j\sin\frac{\pi n}{2})$$

$$\frac{I(j\omega)}{U(j\omega)} = H(j\omega) = \varepsilon' C_O \omega^n \cos(\frac{\pi n}{2}) + j\varepsilon' C_O \omega^n \sin(\frac{\pi n}{2}) \quad (ก.6)$$

ก.2 สมการความสัมพันธ์วงจรสมมูลแบบอนุกรมและขนาน

อิมพีแดนซ์ $Z(\omega)$วงจรสมมูลแบบขนานรูปที่ 2.11 คือ

$$Z(\omega) = \frac{R_P}{1 + j\omega C_P R_P} \quad (ก.7)$$

จัดให้อยู่ในรูปของส่วนจริง (Real Part) และส่วนจินตภาพ (Imaginary Part)

$$Z(\omega) = \frac{R_P - j\omega C_P R_P^2}{1 + \left(\omega C_P R_P\right)^2} \quad (ก.8)$$

อิมพีแดนซ์ $Z(\omega)$วงจรสมมูลแบบอนุกรมรูปที่ 2.12 คือ

$$Z(\omega) = R_S - j\frac{1}{\omega C_S} \quad (ก.9)$$

เปรียบเทียบส่วนจริงของวงจรสมมูลแบบอนุกรมและขนาน

$$R_S = \frac{R_P}{1 + \left(\omega C_P R_P\right)^2} \quad (ก.10)$$

จากสมการที่ 2.29 จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$R_P = R_S\left(1 + \frac{1}{\tan^2\delta}\right) \quad (ก.11)$$

เปรียบเทียบส่วนจินตภาพของวงจรสมมูลแบบอนุกรมและขนาน

$$\frac{\omega C_P R_P^2}{1+\left(\omega C_P R_P\right)^2} = \frac{1}{\omega C_S}$$

$$\frac{(\omega C_P R_P)^2}{C_P(1+\left(\omega C_P R_P\right)^2)} = \frac{1}{C_S} \qquad (ก.12)$$

จากสมการที่ 2.29 จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\frac{1}{\tan^2\delta}}{C_P\left(1+\frac{1}{\tan^2\delta}\right)} = \frac{1}{C_S}$$

$$C_P = \frac{C_S}{1+\tan^2\delta} \qquad (ก.13)$$

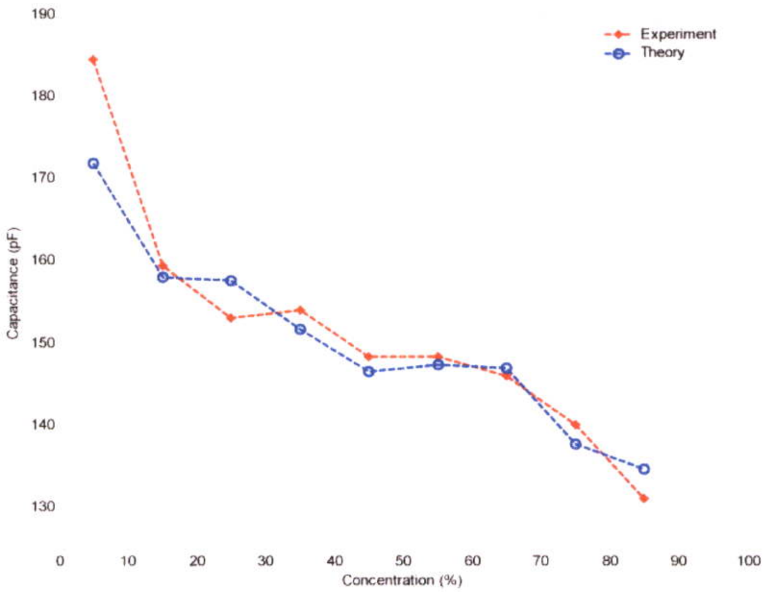
ภาคผนวก ข.

กราฟแสดงผลวงจรเปรียบเทียบค่าจากสูตรการแปลงผันและจากเครื่องมือวัด

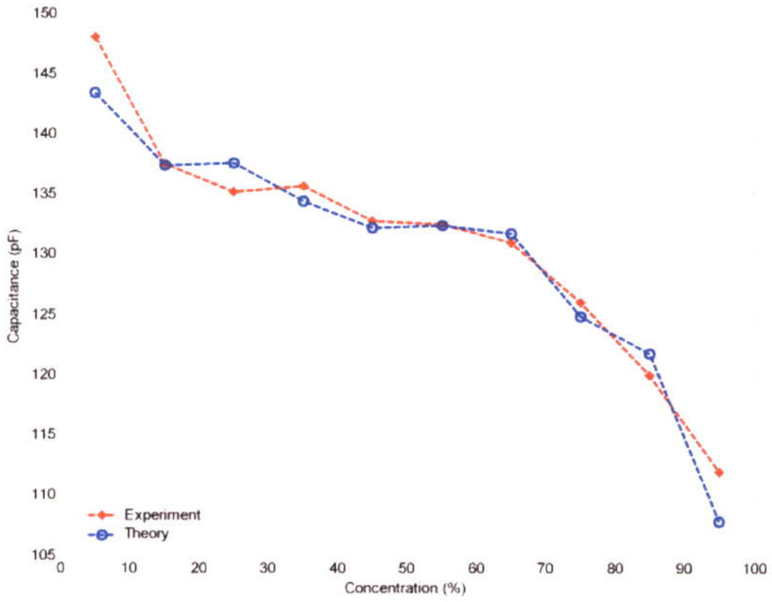
กราฟแสดงผลวงจรเปรียบเทียบค่าจากสูตรการแปลงผันและจากเครื่องมือวัด

บทนี้คือส่วนเพิ่มเติมจากบทที่ 4 หัวข้อ 4.2 ที่แสดงค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดสมบูรณ์ จากค่าที่คำนวณทางสมการและค่าจากเครื่องมือวัด โดยบทนี้จะแสดงค่าวงจรสมมูลแบบอนุกรมในสภาวะต่างๆ

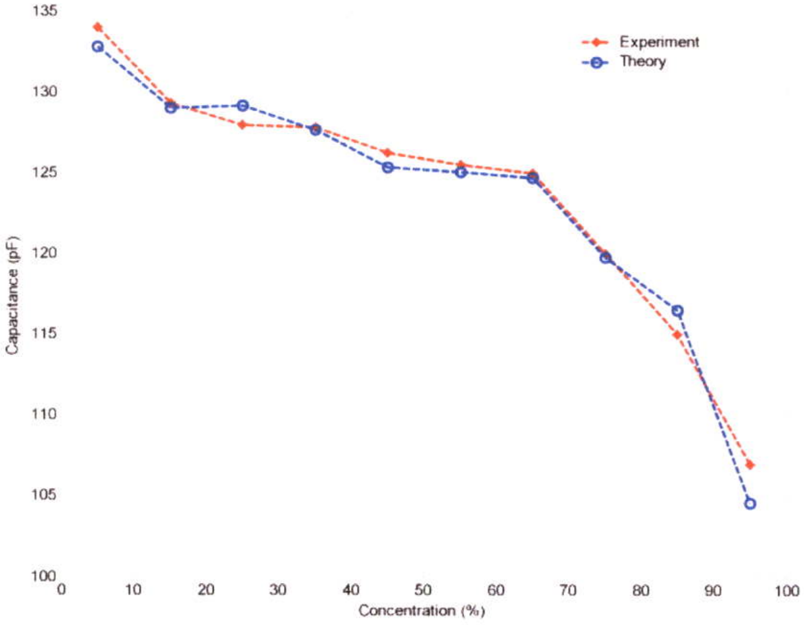
ข.1 วัสดุชนิดทองแดงระยะห่าง 5 มิลลิเมตร



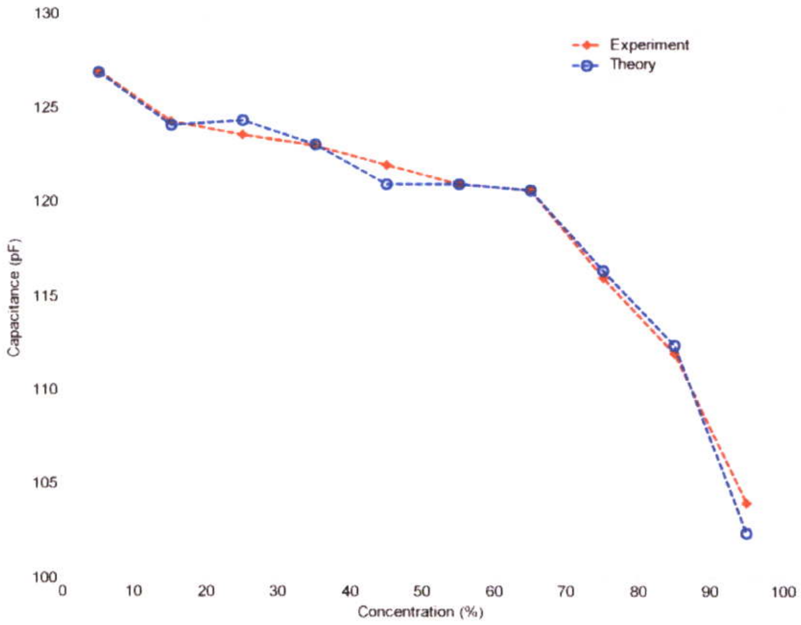
รูปที่ ข.1 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 5 มม.



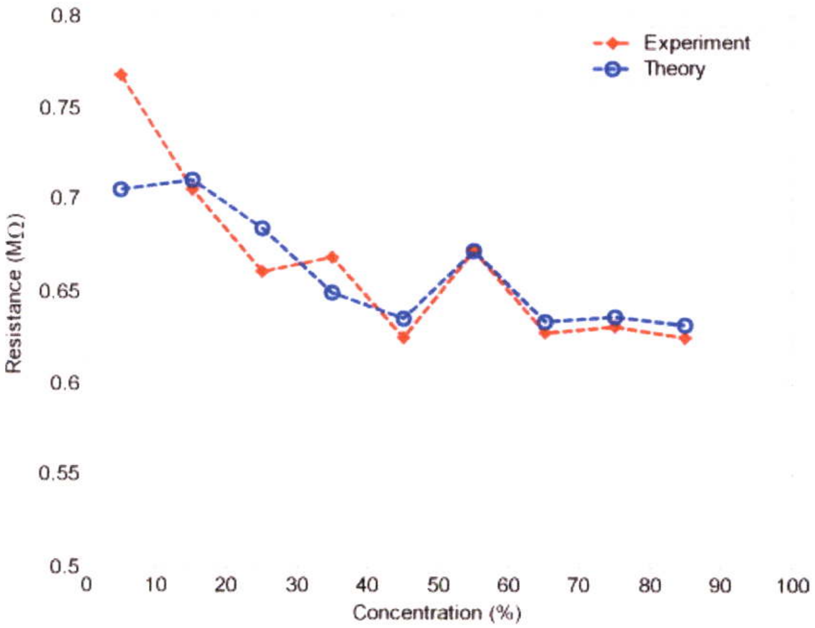
รูปที่ ข.2 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 5 มม.



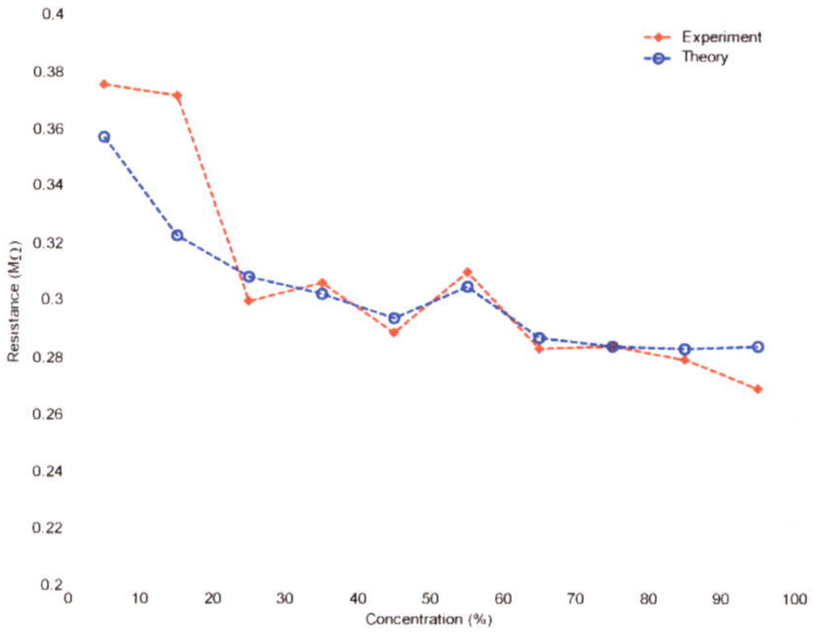
รูปที่ ข.3 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 5 มม.



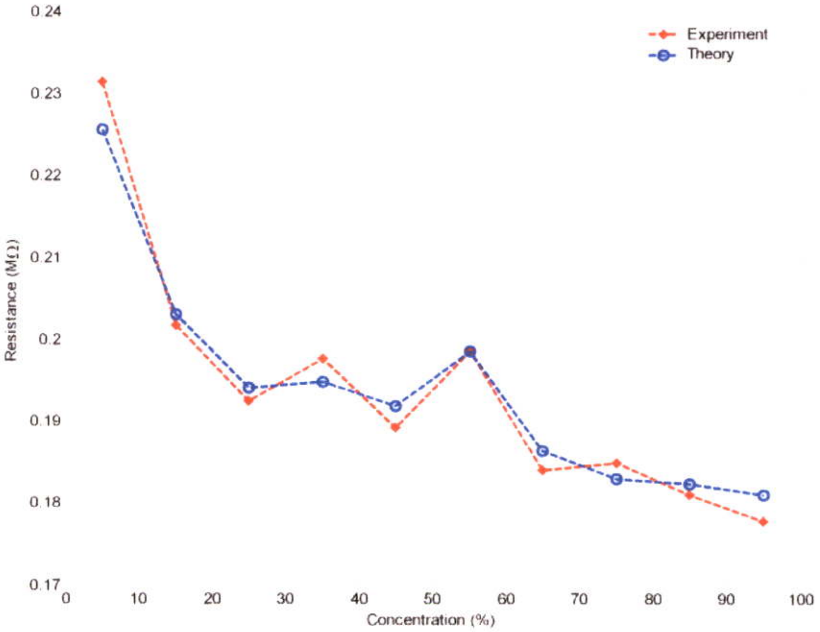
รูปที่ ข.4 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 5 มม.



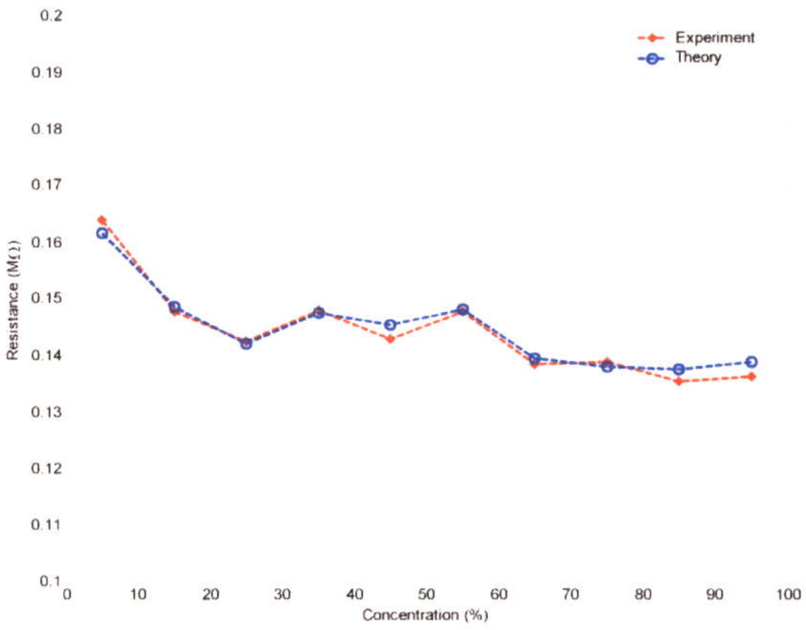
รูปที่ ข.5 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 5 มม.



รูปที่ ข.6 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 5 มม.

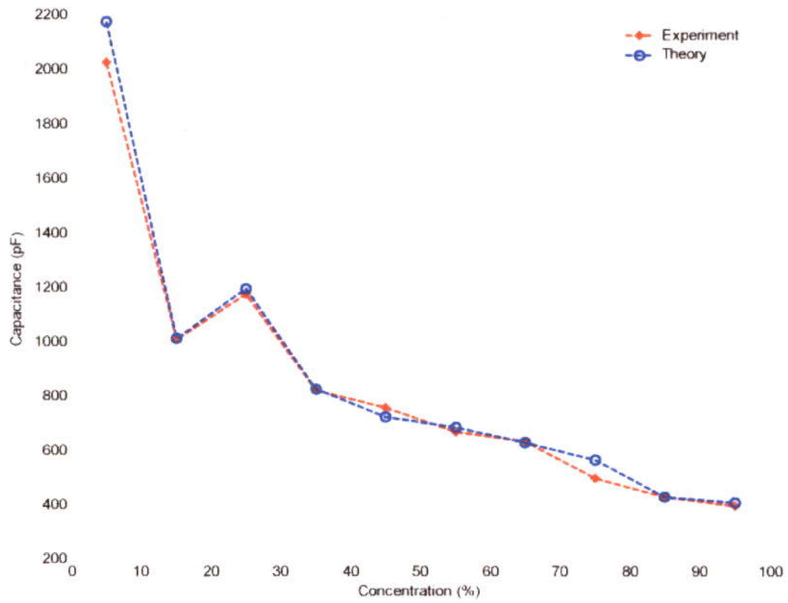


รูปที่ ข.7 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ระยะ 5 มม.

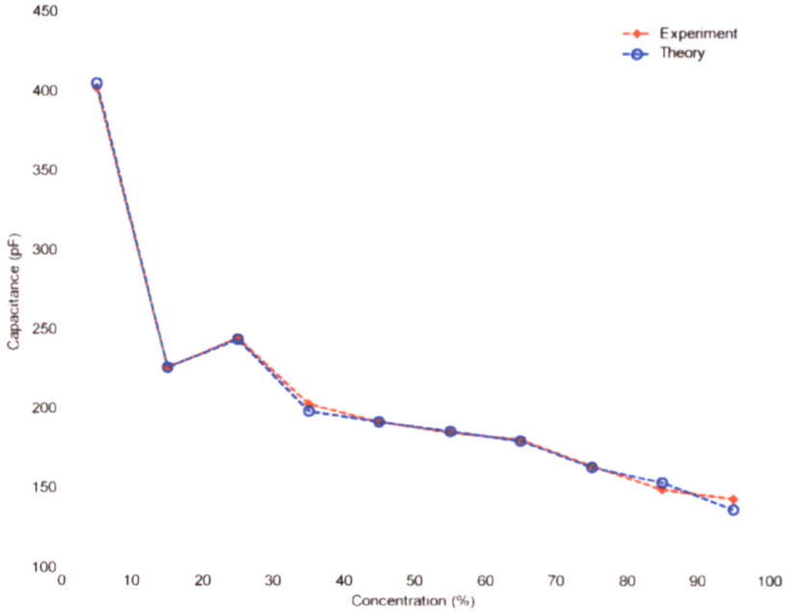


รูปที่ ข.8 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ระยะ 5 มม.

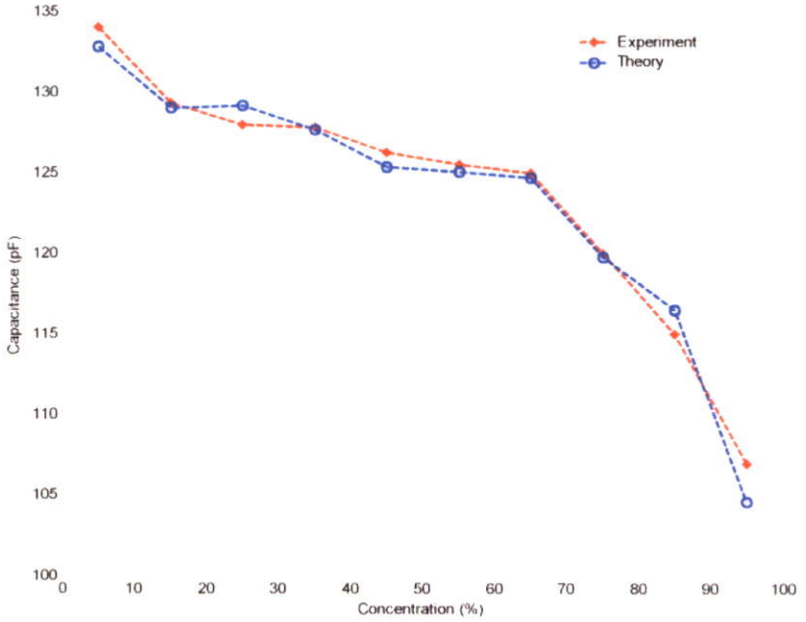
ข.2 วัสดุชนิดสแตนเลสระยะห่าง 5 มิลลิเมตร



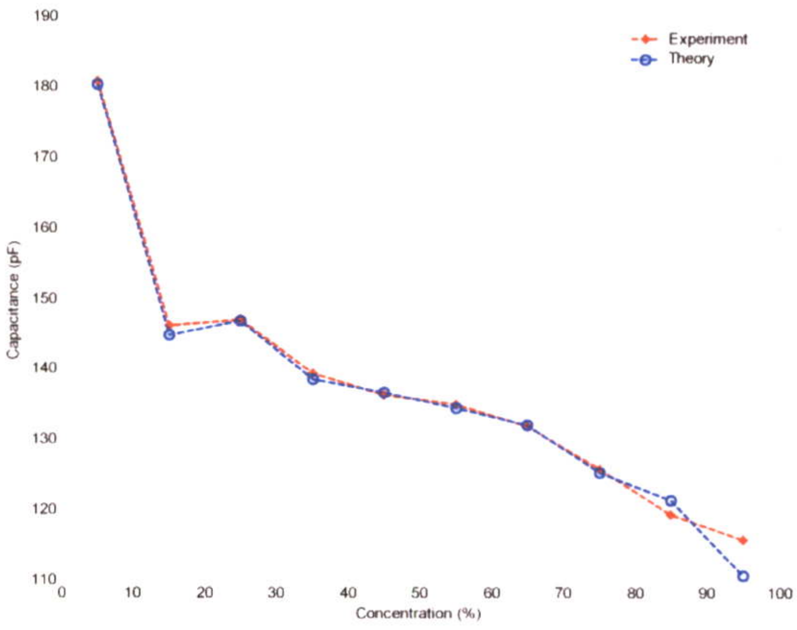
รูปที่ ข.9 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 100 Hz ระยะ 5 มม.



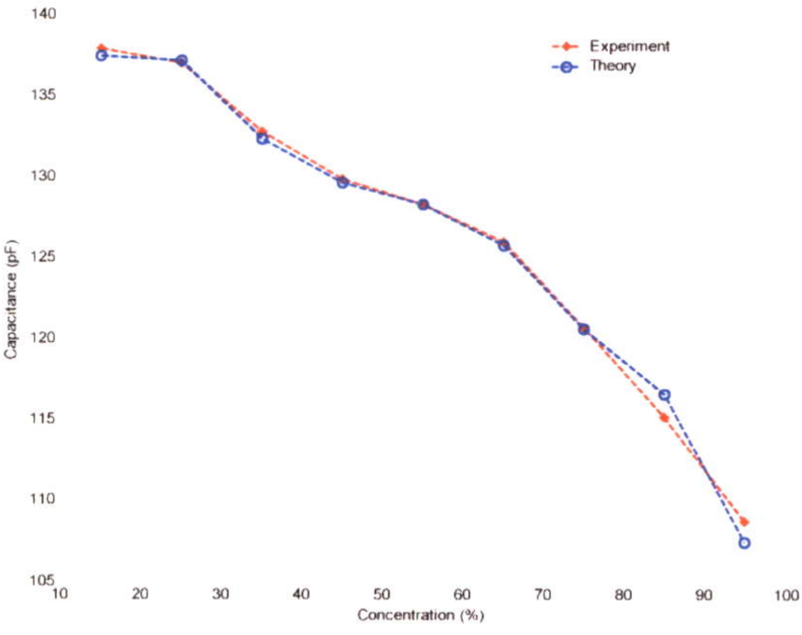
รูปที่ ข.10 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ระยะ 5 มม.



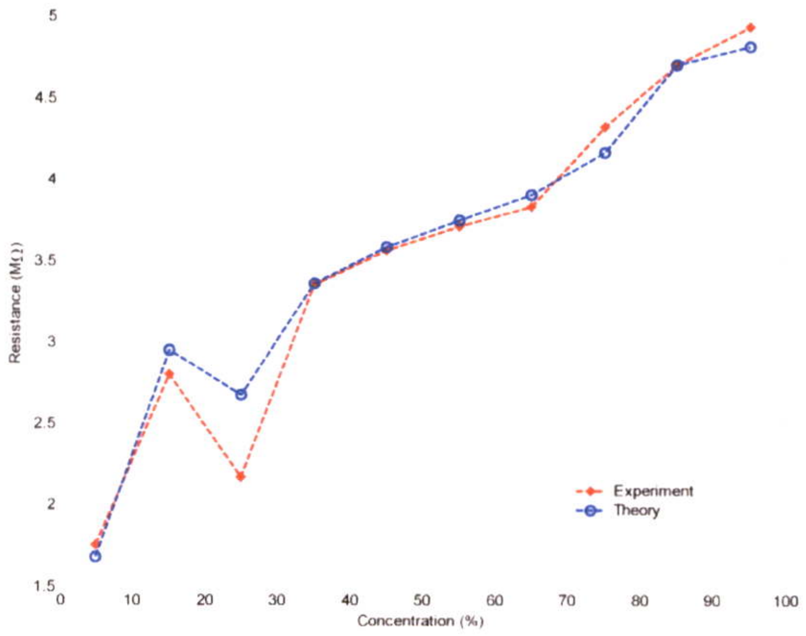
รูปที่ ข.11 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ระยะ 5 มม.



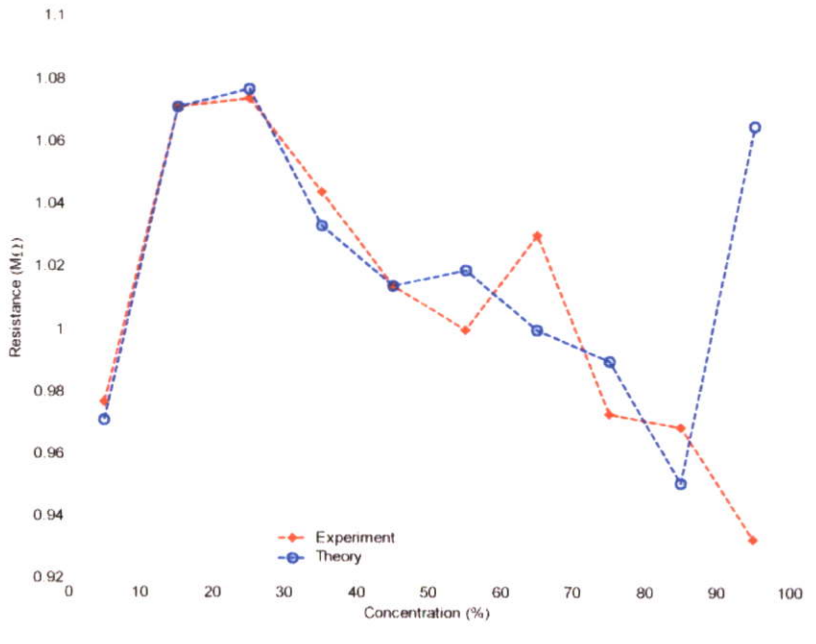
รูปที่ ข.12 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 5 มม.



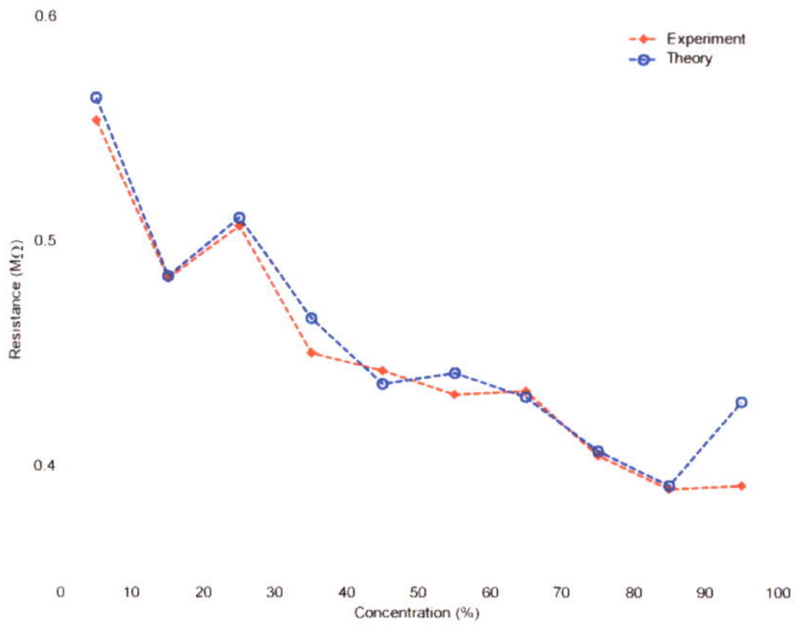
รูปที่ ข.13 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 5 มม.



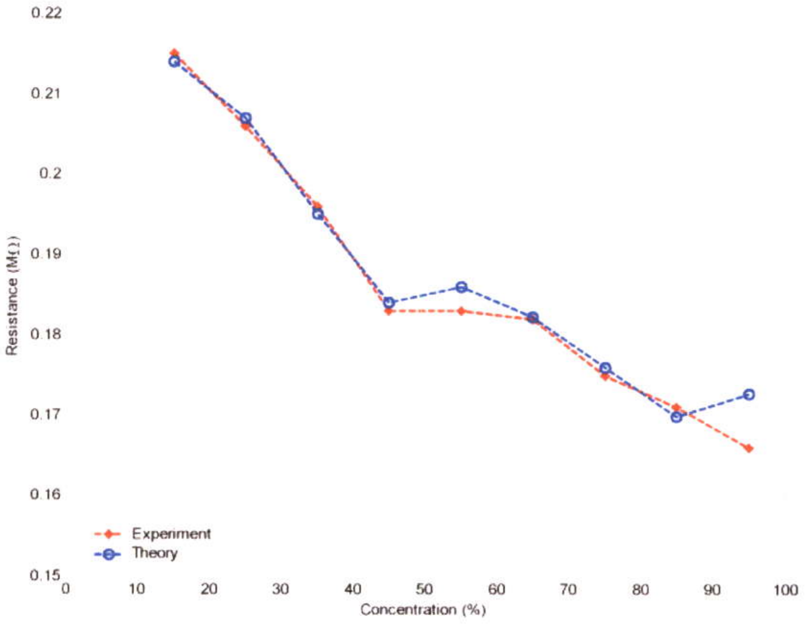
รูปที่ ข.14 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 5 มม.



รูปที่ ข.15 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 5 มม.

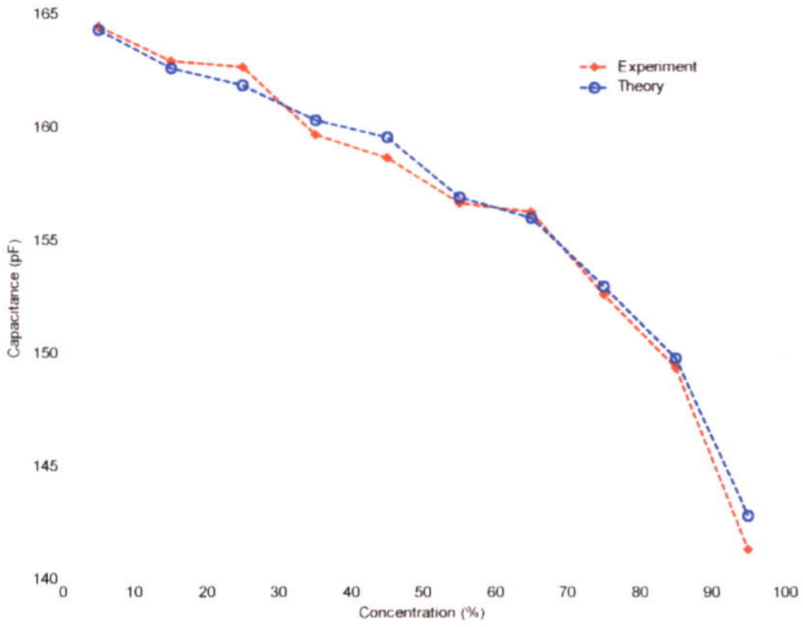


รูปที่ ข.16 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 5 มม.

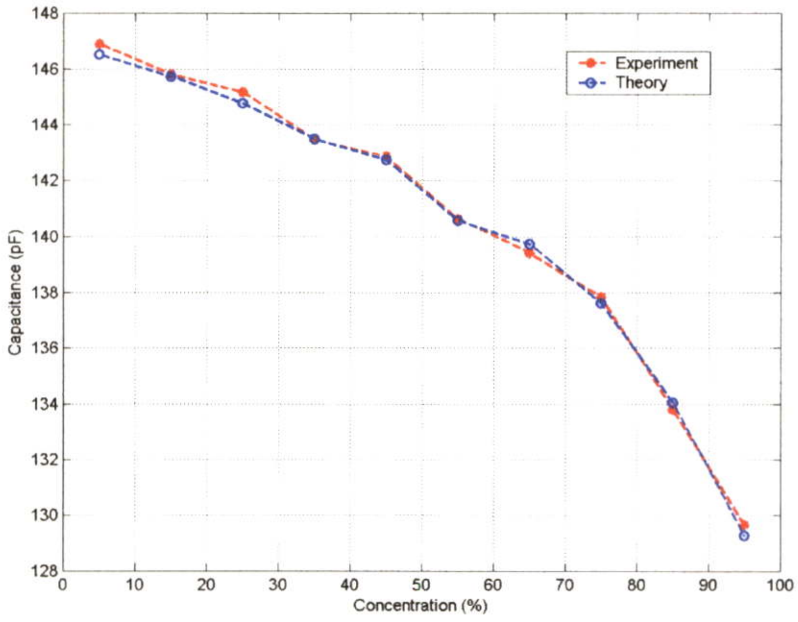


รูปที่ ข.17 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 5 มม.

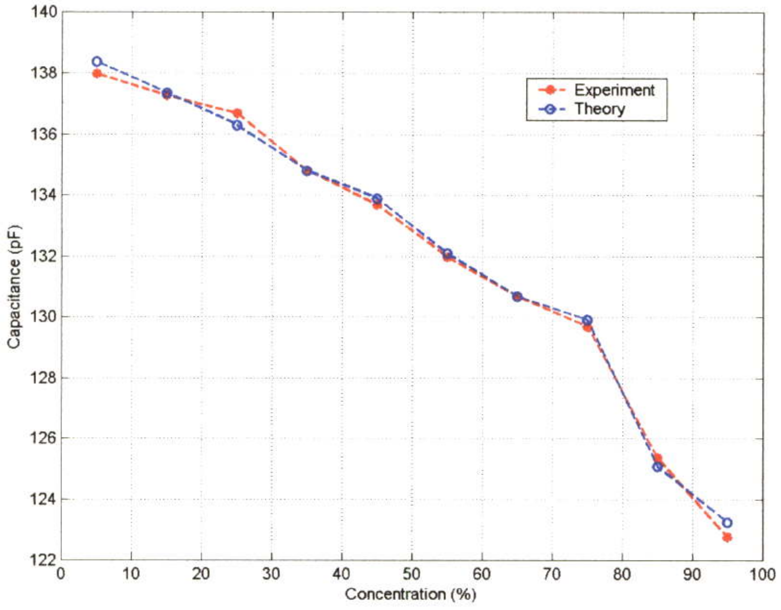
ข.3 วัสดุชนิดทองแดงระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตร



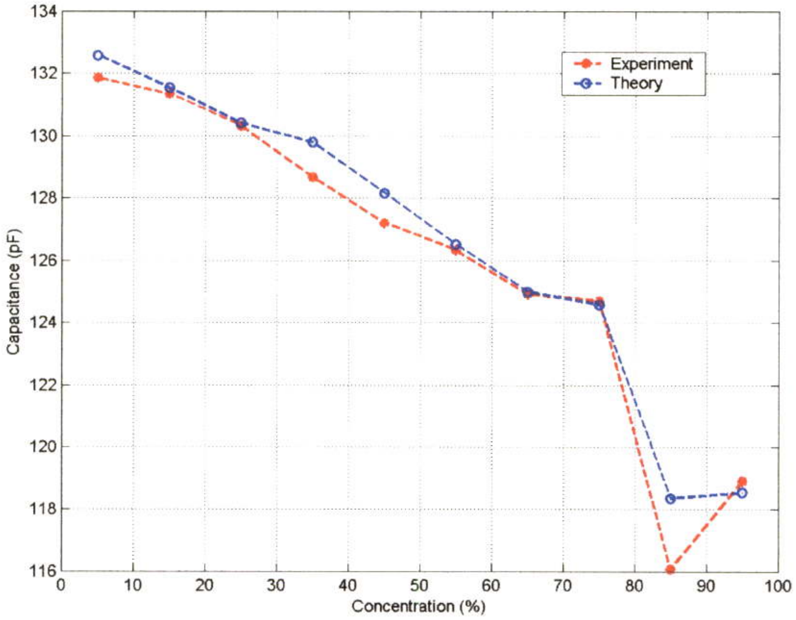
รูปที่ ข.18 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



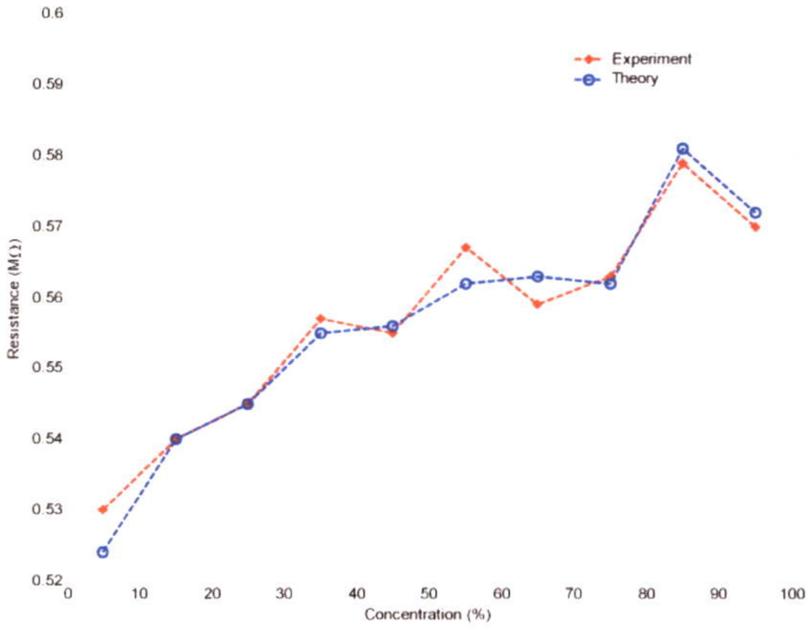
รูปที่ ข.19 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



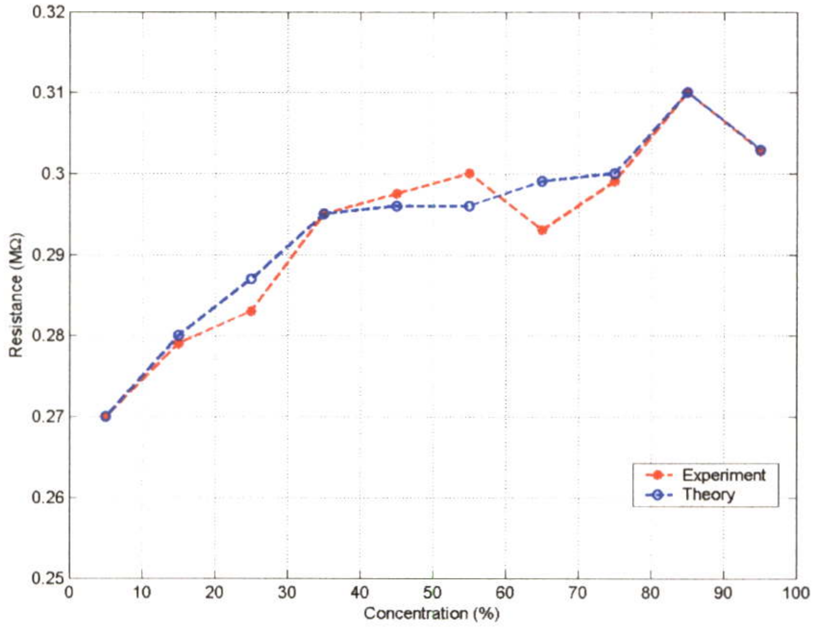
รูปที่ ข.20 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



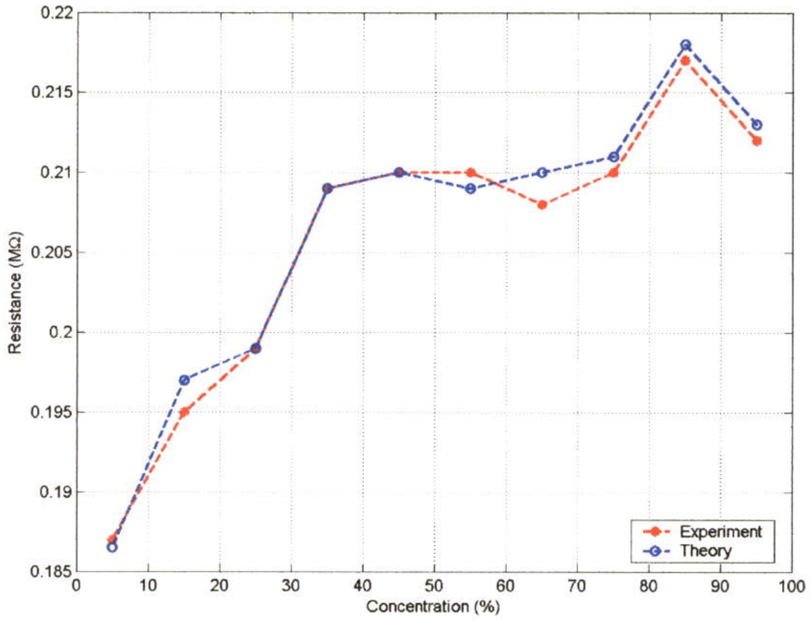
รูปที่ ข.21 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



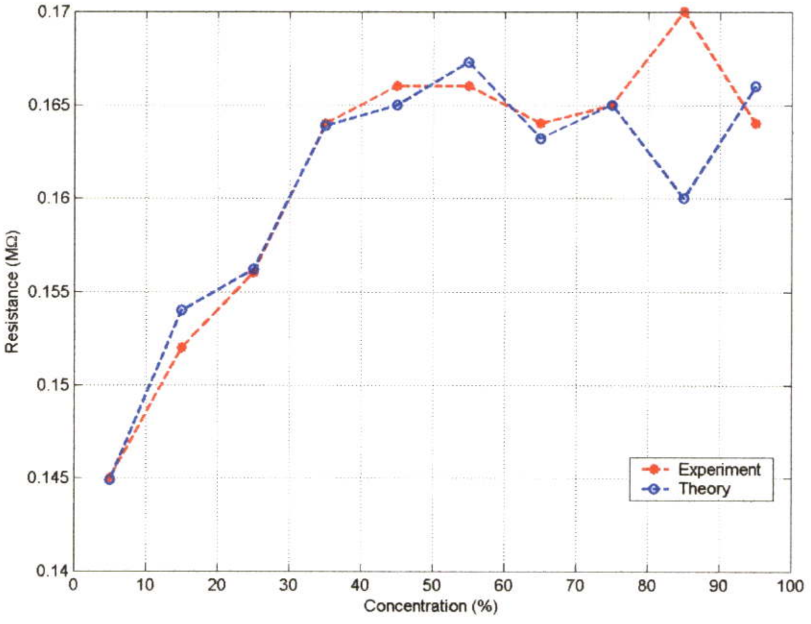
รูปที่ ข.22 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



รูปที่ ข.23 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.

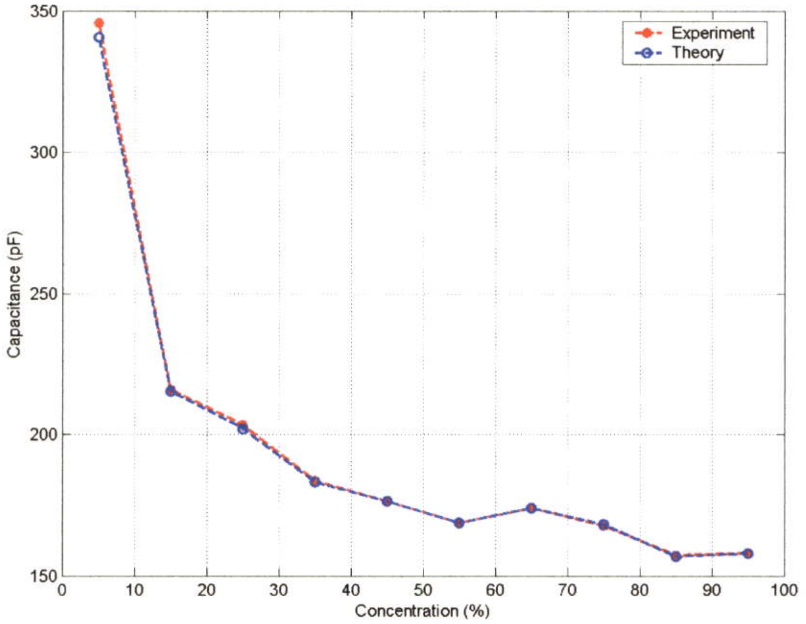


รูปที่ ข.24 การเปรียบเทียบค่า R_S ของทองแดงที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.

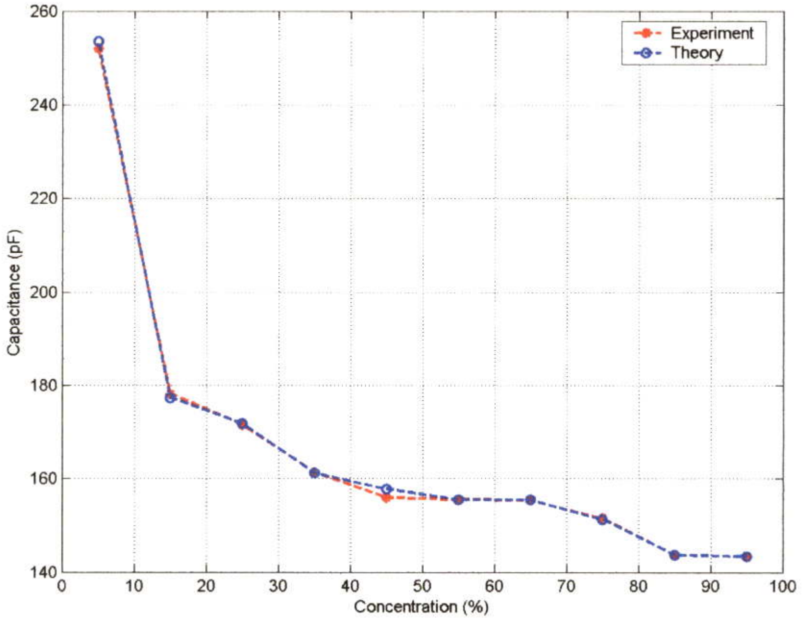


รูปที่ ข.25 การเปรียบเทียบค่า C_S ของทองแดงที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.

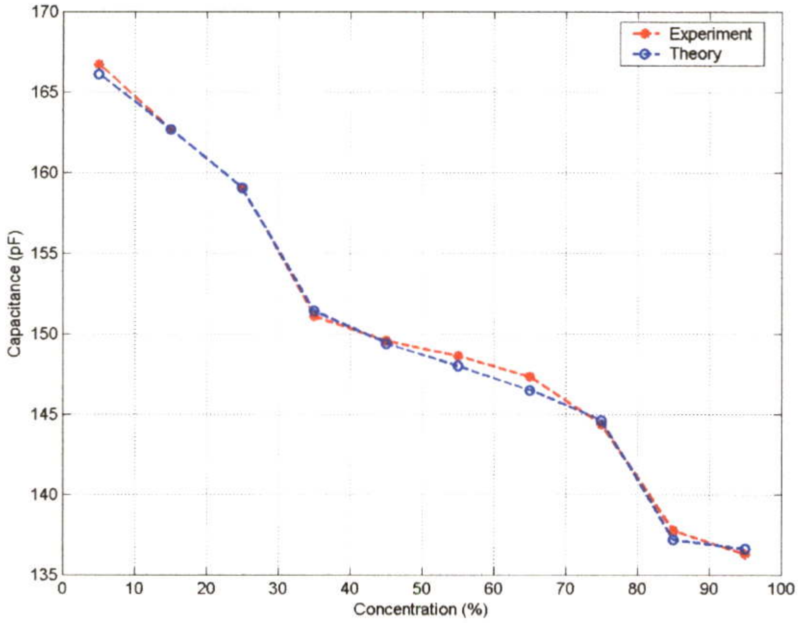
ข.4 วัสดุชนิดสแตนเลสระยะห่าง 2.5 มิลลิเมตร



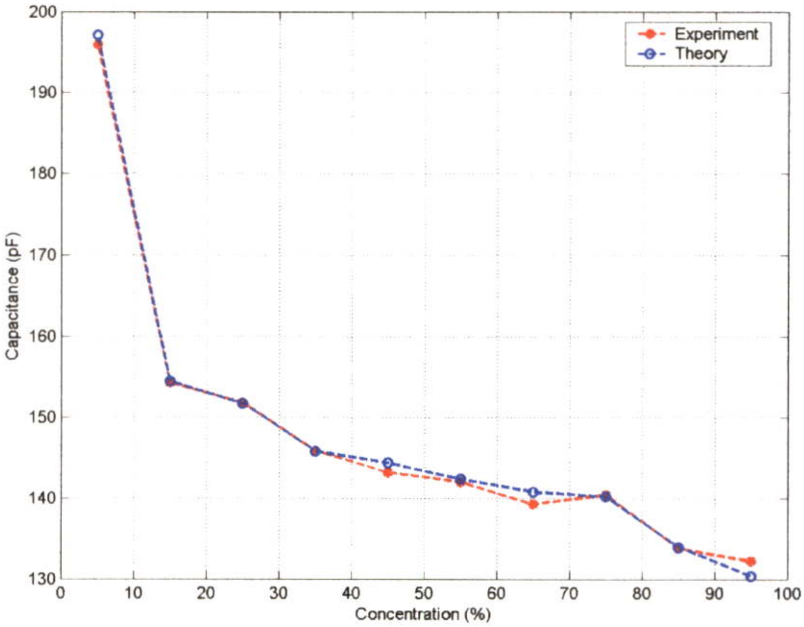
รูปที่ ข.26 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



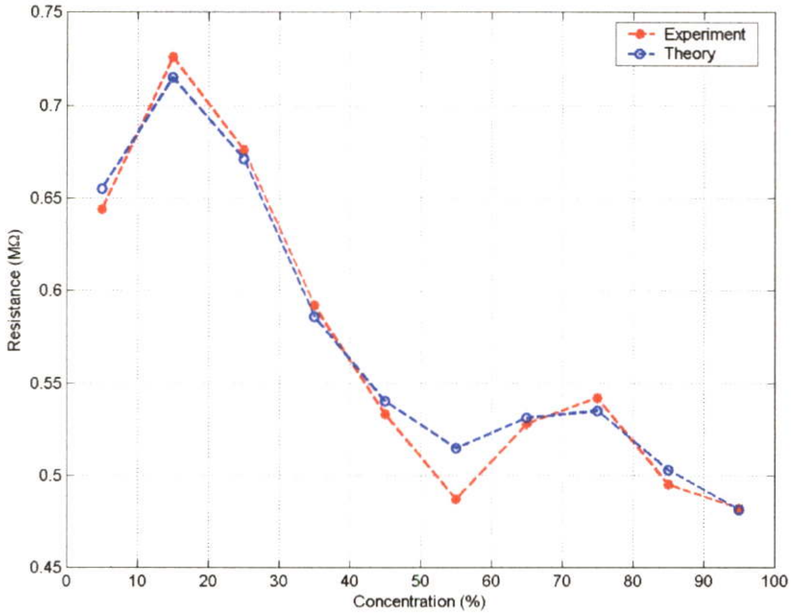
รูปที่ ข.27 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



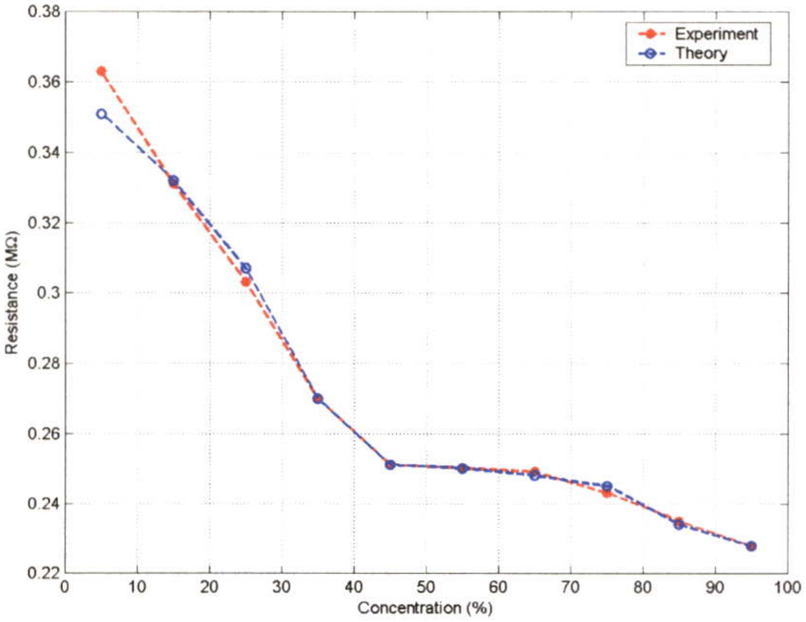
รูปที่ ข.28 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



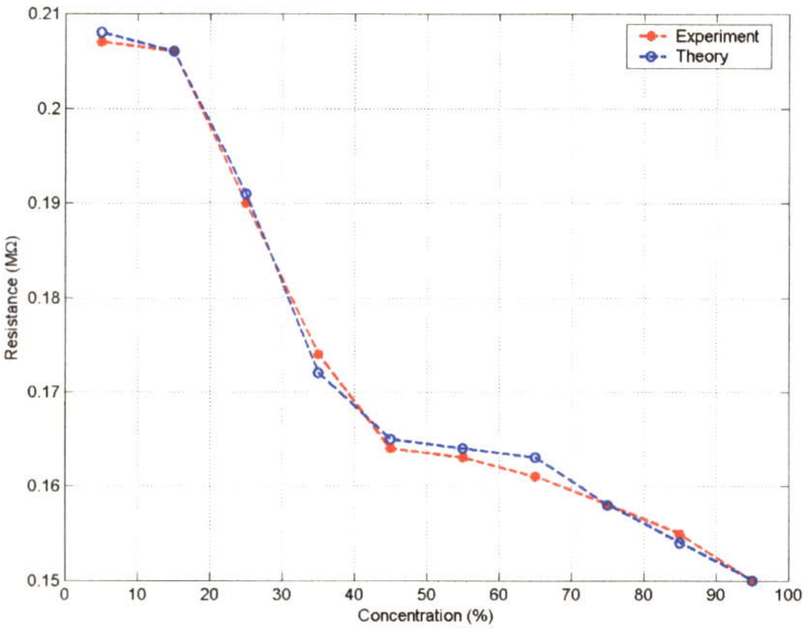
รูปที่ ข.29 การเปรียบเทียบค่า C_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



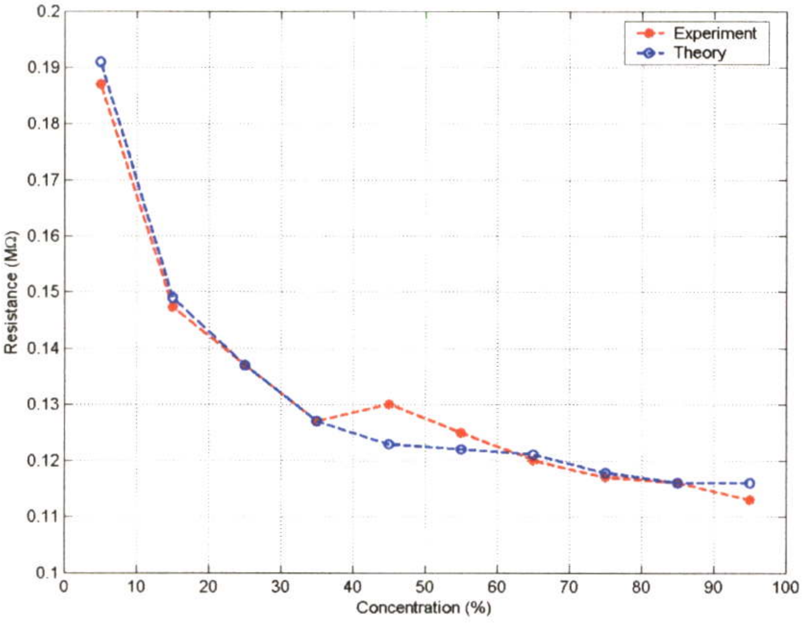
รูปที่ ข.30 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



รูปที่ ข.31 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



รูปที่ ข.32 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 1500 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.



รูปที่ ข.33 การเปรียบเทียบค่า R_S ของสแตนเลสที่ความถี่ 2000 Hz ที่ระยะ 2.5 มม.

ภาคผนวก ค.

สมการคำนวณหาค่าความสามารถในการซ้ำค่าเดิมของหัววัด

สมการคำนวณหาค่าความสามารถในการซ้ำค่าเดิมของหัววัด

ค่าความสามารถในการซ้ำค่าเดิม (Repeatability) เกิดจากความไม่แน่นอนของการวัดค่าในแต่ละครั้งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$U_C = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} \qquad \text{ง.1}$$

U_C คือค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล
โดยที่ค่า $S(x_i)$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) หาได้จากสมการที่ ง.2

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \qquad \text{ง.2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \text{ง.3}$$

n คือจำนวนครั้งในการทำซ้ำ
x_i คือข้อมูลในแต่ละครั้ง
$\bar{x}$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูล

ค่าความไม่แน่นอนที่ประมาณได้ดังกล่าว มีความน่าเชื่อถือได้ขนาดหนึ่งซึ่งยังมีความเหมาะสมไม่มากพอที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ทั้งที่ความไม่แน่นอนของการวัดที่เหมาะสมใช้ได้ในทางปฏิบัติควรมีความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% ของค่าที่ประเมินได้ดังกล่าว จึงต้องมาดำเนินการต่อโดยการหาตัวคูณที่เหมาะสมหรือระดับความเชื่อมั่นมาคูณกับค่าคงที่ U เพื่อให้ได้เป็น Expanded Uncertainty โดยประมาณจะได้ $k = 2$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนในการวัดหาได้จาก

$$U = \pm kU_C \qquad \text{ง.4}$$

การรายงานผลการสอบเทียบจะรายงานอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนดังต่อไปนี้

$$y = \bar{x} \pm U \qquad \text{ง.5}$$

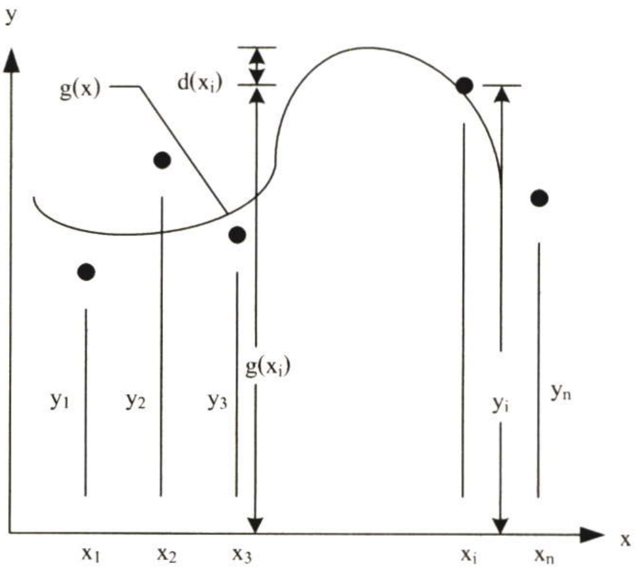
โดยมีระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือ $k = 2$

ภาคผนวก ง.

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมภาษาซีที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชั่น

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมภาษาซีที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชั่น

ขั้นตอนในการประดิษฐ์ฟังชั่นพหุนามที่จะประดิษฐ์ขึ้นมานี้ เริ่มจากการหาค่าความผิดพลาด E ทั้งหมดเกิดจาก n ข้อมูลในรูปแบบดังต่อไปนี้



รูปที่ ง.1 การถดถอยแบบพหุนามโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชั่นพหุนามจากข้อมูลที่กำหนดมา

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[d(x_i) \right]^2 \qquad (ง.1)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้ประกอบด้วยฟังก์ชั่นพหุนามดังแสดงในสมการ ง.2 ได้คือ

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - g(x_i) \right]^2$$

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \left(a_o + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_m x^m \right) \right]^2 \qquad (ง.2)$$

ในการหาตัวไม่รู้ค่า $a_o, a_1, a_2, \ldots, a_m$ รวมทั้งสิ้น $m+1$ ค่านั้นเราจะใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดซึ่งทำจากวิธีหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาด E โดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่รู้ค่าก่อให้เกิดระบบสมการ $m+1$ สมการย่อยนั้นก็คือ

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0$$
$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0$$
$$\frac{\partial E}{\partial a_2} = 0 \qquad (\text{ง}.3)$$
$$\vdots$$
$$\frac{\partial E}{\partial a_3} = 0$$

ดังตัวอย่างเช่นสมการแรกในระบบสมการนี้สามารถประดิษฐ์ได้ดังนี้

$$2\sum_{i=1}^{n}\left[y_i - \left(a_0 + a_i x_i + a_2 x_i^2 + ... + a_m x_i^m\right)\right](-1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} a_0 - \sum_{i=1}^{n} x_i a_1 - \sum_{i=1}^{n} x_i^2 a_2 - .... - \sum_{i=1}^{n} x_i^m a_m = 0$$

$$na_0 + (\sum_{i=1}^{n} x_i)a_1 + (\sum_{i=1}^{n} x_i^2)a_2 + ... + (\sum_{i=1}^{n} x_i^m)a_m = \sum_{i=1}^{n} y_i$$

เช่นเดียวกันกับสมการที่สอง ซึ่งคือ

$$2\sum_{i=1}^{n}\left[y_i - \left(a_0 + a_i x_i + a_2 x_i^2 + ... + a_m x_i^m\right)\right](-x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} y_i x_i - \sum_{i=1}^{n} x_i a_0 - \sum_{i=1}^{n} x_i^2 a_1 - \sum_{i=1}^{n} x_i^3 a_2 - .... - \sum_{i=1}^{n} x_i^{m+1} a_m = 0$$

$$(\sum_{i=1}^{n} x_i)a_0 + (\sum_{i=1}^{n} x_i^2)a_1 + (\sum_{i=1}^{n} x_i^3)a_2 ...... + (\sum_{i=1}^{n} x_i^{m+1})a_m = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i$$

และสมการอื่นๆที่เหลือก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน สมการทั้งหมดที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการที่ประกอบด้วย m+1 สมการย่อยได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^m \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 & \sum_{i=1}^{n} x_i^4 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^m & \sum_{i=1}^{n} x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^{n} x_i^{m+2} & & \sum_{i=1}^{n} x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^m y_i \end{bmatrix} \qquad (ง.4)$$

โดยเมทริกซ์จัตุรัสขนาด $(m+1)\times(m+1)$ ทางด้านซ้ายของระบบสมการนี้เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่รู้ค่า และเวกเตอร์ขนาด $(m+1)\times(m+1)$ ทางด้านขวาของระบบสมการก็รู้ค่าเช่นกันดังนั้นตัวไม่รู้ค่า $a_o, a_1, a_2, ..., a_m$ ทั้งหมด $(m+1)$ ค่า สามารถคำนวณหาได้จากระบบสมการโดยใช้ภาษาทางคอมพิวเตอร์ประดิษฐ์ขึ้น เพื่อจำกัดข้อผิดพลาดจากการคำนวณโยกำหนดให้กำลังสูงสุด $m = 3$ จำนวนเมทริกซ์จึงมีทั้งหมด 4 แถว 4 หลัก

/***/

Program for calculated a_0,a_1,a_2,a_3 coefficients.

/***/

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>

float Xi[10],Yi[10],sumXi,sumYi,sumXip2,sumYip2,sumXip3,sumYip3,sumXip4,sumYip4,
sumXip5,sumYip5,sumXip6,sumYip6,sumXip3Yi,sumXip2Yi,sumXiYi,a0[4],a1[4],a2[4],
a3[4],b[4],c0,c1,c2,c3;
int i;

void Enter_data()
{
	int j;
	printf("Please enter number of all datas\n");
	scanf("%d",&i);
	printf("Please enter data sets,Xi and Yi\n");
	for (j=1;j<=10;j++){
		printf("\nData X%d is:",j);
		scanf("%f",&Xi[j-1]);
		printf("\nData Y%d is:",j);
		scanf("%f",&Yi[j-1]);
	}
}

void Sum()
{
	int j;
	sumXi=0;
	sumYi=0;
	sumXip2=0;
```

```
        sumYip2=0;
        sumXip3=0;
        sumYip3=0;
        sumXip4=0;
        sumYip4=0;
        sumXip5=0;
        sumYip5=0;
        sumXip6=0;
        sumYip6=0;
        sumXiYi=0,sumXip2Yi=0,sumXip3Yi=0;
        for (j=1;j<=10;j++){
                sumXi = sumXi+Xi[j-1];
                sumYi = sumYi+Yi[j-1];
      sumXip2 = sumXip2+pow(Xi[j-1],2);
                sumYip2 = sumYip2+pow(Yi[j-1],2);
                sumXip3 = sumXip3+pow(Xi[j-1],3);
                sumYip3 = sumYip3+pow(Yi[j-1],3);
                sumXip4 = sumXip4+pow(Xi[j-1],4);
                sumYip4 = sumYip4+pow(Yi[j-1],4);
                sumXip5 = sumXip5+pow(Xi[j-1],5);
                sumYip5 = sumYip5+pow(Yi[j-1],5);
                sumXip6 = sumXip6+pow(Xi[j-1],6);
                sumYip6 = sumYip6+pow(Yi[j-1],6);
                sumXiYi = sumXiYi+(Xi[j-1]*Yi[j-1]);
                sumXip2Yi = sumXip2Yi+(pow(Xi[j-1],2)*Yi[j-1]);
                sumXip3Yi = sumXip3Yi+(pow(Xi[j-1],3)*Yi[j-1]);
        }
}

void Gauss_elimination_method()
{
        int j;
```

```
        float a4[4];
        a0[0]=i,a0[1]=sumXi,a0[2]=sumXip2,a0[3]=sumXip3;
        a1[0]=sumXi,a1[1]=sumXip2,a1[2]=sumXip3,a1[3]=sumXip4;
        a2[0]=sumXip2,a2[1]=sumXip3,a2[2]=sumXip4,a2[3]=sumXip5;
        a3[0]=sumXip3,a3[1]=sumXip4,a3[2]=sumXip5,a3[3]=sumXip6;
        b[0]=sumYi,b[1]=sumXiYi,b[2]=sumXip2Yi,b[3]=sumXip3Yi;
/* Forward elimination loop 1*/
/*  row 2*/
        a4[0]=(a1[0]*a0[0])/i,a4[1]=(a1[0]*a0[1])/i,a4[2]=(a1[0]*a0[2])/i,a4[3]=(a1[0]*a0[3])/i,
        a4[4]=(a1[0]*b[0])/i;
        a1[1]=a1[1]-a4[1],a1[2]=a1[2]-a4[2],a1[3]=a1[3]-a4[3],b[1]=b[1]-a4[4];
/*  row 3*/
        a4[0]=(a2[0]*a0[0])/i,a4[1]=(a2[0]*a0[1])/i,a4[2]=(a2[0]*a0[2])/i,a4[3]=(a2[0]*a0[3])/i,
        a4[4]=(a2[0]*b[0])/i;
        a2[1]=a2[1]-a4[1],a2[2]=a2[2]-a4[2],a2[3]=a2[3]-a4[3],b[2]=b[2]-a4[4];
/*      row 4*/
        a4[0]=(a3[0]*a0[0])/i,a4[1]=(a3[0]*a0[1])/i,a4[2]=(a3[0]*a0[2])/i,a4[3]=(a3[0]*a0[3])/i,
        a4[4]=(a3[0]*b[0])/i;
        a3[1]=a3[1]-a4[1],a3[2]=a3[2]-a4[2],a3[3]=a3[3]-a4[3],b[3]=b[3]-a4[4];
/*  /* Forward elimination loop 2*/
/*      row 3*/
        a4[1]=(a2[1]*a1[1])/a1[1],a4[2]=(a2[1]*a1[2])/a1[1],a4[3]=(a2[1]*a1[3])/a1[1],
        a4[4]=(a2[1]*b[1])/a1[1];
        a2[2]=a2[2]-a4[2],a2[3]=a2[3]-a4[3],b[2]=b[2]-a4[4];
/*      row 4*/
        a4[1]=(a3[1]*a1[1])/a1[1],a4[2]=(a3[1]*a1[2])/a1[1],a4[3]=(a3[1]*a1[3])/a1[1],
        a4[4]=(a3[1]*b[1])/a1[1];
        a3[2]=a3[2]-a4[2],a3[3]=a3[3]-a4[3],b[3]=b[3]-a4[4];
/*  /* Forward elimination loop 3*/
/*      row 4*/
        a4[2]=(a3[2]*a2[2])/a2[2],a4[3]=(a3[2]*a2[3])/a2[2],a4[4]=(a3[2]*b[2])/a2[2];
        a3[3]=a3[3]-a4[3],b[3]=b[3]-a4[4];
```

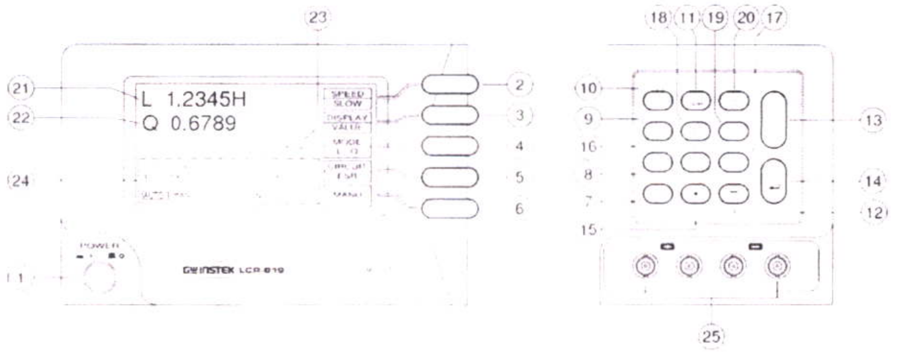
```
/*        Calculation coefficient values */
          c3=b[3]/a3[3];
          c2=(b[2]-(a2[3]*c3))/a2[2];
          c1=(b[1]-(a1[2]*c2)-(a1[3]*c3))/a1[1];
          c0=(b[0]-(a0[1]*c1)-(a0[2]*c2)-(a0[3]*c3))/a0[0];
}
void main()
{
          Enter_data();
          Sum();
          Gauss_elimination_method();
          printf("\nCoeff.X0 is %f    X1 is %f     X2 is %f    X3 is %f\n", c0,c1,c2,c3);
}
```

ภาคผนวก จ.

คุณลักษณะเครื่องมือวัดทดสอบค่า R-L-C

1. INTRODUCTION

The precise LCR meter series are automatic, user programmable instruments that provide high reliability and great precision for measuring a wide variety of impedance parameters. The frequency range of LCR-819/829 covers from 12Hz to 100kHz, LCR-817/827 from 12Hz to 10kHz, LCR-816/826 from 100Hz to 2kHz, and LCR-821 from 12Hz to 200kHz. The basic accuracy is 0.1% for LCR-827/829/816/826, 0.05% for LCR-817/819/821. The measured results can be displayed on the high quality LCD monitor with decimal points and units. The measured result resolution is five full digits for Inductance (L), Capacitance (C), Resistance (R) and absolute value of impedance (|Z|) [four full digits for Dissipation factor (D), Quality factor (Q), R with C, R with L, 2 digits after decimal dot for phase angle (θ)]. In the meantime, the LCD monitor is also shown the control status and parameters of settings. The keypads are easy for menu programming. The LCR Meters' test fixture (option) is a method of convenient, reliable, guarded 4-terminal/2 wires connection of radial and axial leaded components to the LCR Meters. Test conditions can be stored and recalled from internal memory that will reduce the setup time for measurement preparing.



4-4-2. Series & Parallel Equivalent Circuit

Impedance that is neither a pure resistance nor a pure reactance can be represented at any specific frequency by either a series or a parallel combination of resistance and reactance. Such representation is called "equivalent circuit". The component value of the "Primary Display" depends on which equivalent circuit (series or parallel) is chosen. In normal, the component manufacturer shall specify how a component is to be measured (usually series) and at what frequency. Please refer to Figure 4-4.

- Measurement Function

Measurement Mode	Series Equivalent Circuit	Parallel Equivalent Circuit
R / Q	✓	✓
C / D	✓	✓
C / R	✓	✓
Z / θ (degree)	✓	
L / R	✓	✓

Suggested Test Conditions:

Inductors less than 10μH: Series, 100kHz.

Inductors from 10 μH to 1mH: Series, 10kHz.

Inductors from 1mH to 1H: Series, 1kHz.

Inductors greater than 1H: Series, 0.1kHz.

Capacitors less than 10pF: Parallel, 100kHz.

Capacitors from 10 to 400pF: Series or Parallel, 10kHz.

Capacitors from 400 to 1μF: Series, 1kHz.

Capacitors greater than 1μF: Series, 0.1 or 0.12kHz.

Resistor less than 1kΩ: Series, 1kHz.

Resistor from 1kΩ to 10MΩ: Parallel, 0.25kHz.

Resistor greater than 10 MΩ: Parallel, 0.03kHz

Unless for special reason, always select "Series" for capacitors and inductors. This has traditionally been standard practice. For very small capacitance or inductance, select a higher test frequency for better accuracy. For very large capacitance or inductance, select a lower test frequency for better accuracy. For dc resistance, select a lower test frequency to minimize ac effects.

Because the reactive component most likely to be represented in a low resistance resistor is series inductance, the "Series" is selected for a resistor below about 1kΩ. If a resistor large than 10MΩ, select "Parallel" that because the reactive component most likely to be represent in a high resistance resistor is shunt capacitance. If the Q is less than 0.1, the measured Rp is probably very close to the dc resistance.

5. SPECIFICATIONS

Measurement Parameters:

Inductance (L_s/L_p)*, Capacitance (C_s/C_p), Resistance (R_s/R_p), Dissipation (D), Quality Factors (Q), Equivalent Series Resistance (ESR) and Equivalent Parallel Resistance (EPR), Impedance (|Z|), Phase angle of Impedance [degree] (θ).

Measurement Models:

Six kinds of measurement modes can be selected. Two measurement parameters measured and displayed simultaneously.

R/Q, C/D, C/R, L/Q, Z/θ, L/R.

Display Ranges:

Primary Display

Inductance (L)	: 0.00001mH	~	99999H
Capacitance (C)	: 0.00001pF	~	99999 μF
Resistance (R)	: 0.00001 Ω	~	99999kΩ
Absolute of Impedance (Z)	: 0.00001 Ω	~	99999kΩ

Secondary Display:

Dissipation factor (D)+	: 0.0001	~	9999
Quality factor (Q)**	: 0.0001	~	9999
Phase angle of Impedance (degree)	: -180.00°	~	180.00°
Equivalent Series Resistance (ESR)+	: 0.0001 Ω	~	9999 kΩ
Equivalent Parallel Resistance (EPR)+	: 0.0001 Ω	~	9999 kΩ
Dissipation factor (D)+ in ppm	: 1 ppm	~	9999 ppm
Quality factor (Q)** in ppm	: 1 ppm	~	9999 ppm
DELTA %	: 0.00001%	~	99999%

If any of these quantities is negative, the "-" negative indicator is displayed.

Accuracy:

R, L, C, Z : 0.05%(Basic)+

D, Q :.0005(Basic)+

θ : 0.03° (Basic)+

*LCR-816/826/827/829 is one fold less accuracy than LCR-817/819.

(LCR-816/826: 0.1%, LCR-827/829: 0.1%, LCR-817/819/821: 0.05%)

+: Please refer to page 39~43 for details.

Test Frequency:

There are 504 test frequencies between 12Hz and 200kHz that can be selected by using keypad for LCR-821. The frequency range of LCR-819/829 covers from 12Hz to 100kHz (total test frequencies: 503 points), LCR-817/827 covers from 12Hz to 10kHz (total test frequencies: 489 points), LCR-816/826 covers from 100Hz to 2kHz (total test frequencies: 16 points).

Measurement Displays:

The measured results can be shown on the LCD monitor in three ways:

1. VALUE : The measured quantities of R/Q, C/D, C/R, L/Q, Z/θ, L/R.
   *The resolution of primary display (L, C, R or Z) is to be five digits.
   *The resolution of secondary display (D, Q, R with C, or R with L) is to be four digits.
   *The resolution of secondary display (θ) is to be2 digits after decimal dot.
2. DELTA % : The DELTA% shows the percent deviation of the measured L, C, R or Z value from a saved NOMINAL VALUE. The sign of deviation is indicated.
3. DELTA : The LCR difference is similar to the DELTA% except that the deviation is shown in suitable units (ohms, henries, etc.)

Measurement Speed (LCR-816/817/819/821):

SLOW : 896ms

MEDI : 286ms

FAST : 135ms

For LCR-826/827/829, please refer to 4-5-10. Handler Interface Timing.

Equivalent Circuit:

The L, C, or R equivalent SERIES or PARALLEL circuit can be selected by keypad.

* When select Z/θ mode, the PARALLEL circuit is invalid. Please refer to 4-4-2. Series & Parallel Equivalent Circuit from page 12~13 for details.

Measurement Modes:

Two modes are available: AUTO and MANUAL.

"AUTO" mode is measuring continuously, updating the display after each measurement.

"MANUAL" mode is activated by the START keypad, the measured result is holding on the LCD monitor until next measurement started.

Average:

The AVERAGE of any number of measurements from 1 to 255 can be made as desired in either of the two measurement modes.

Test Voltage:

The test voltage range for LCR-817/819/827/829/821 is from 5mV to 1.275V, each step is 5mV, for LCR-816/826 is from 0.1V to 1.275V, each step is 5mV.

Note: When the test frequency is at 200kHz, the test voltage must be greater than 100mV.

Memory:

100 memory blocks totally.

DC Bias:

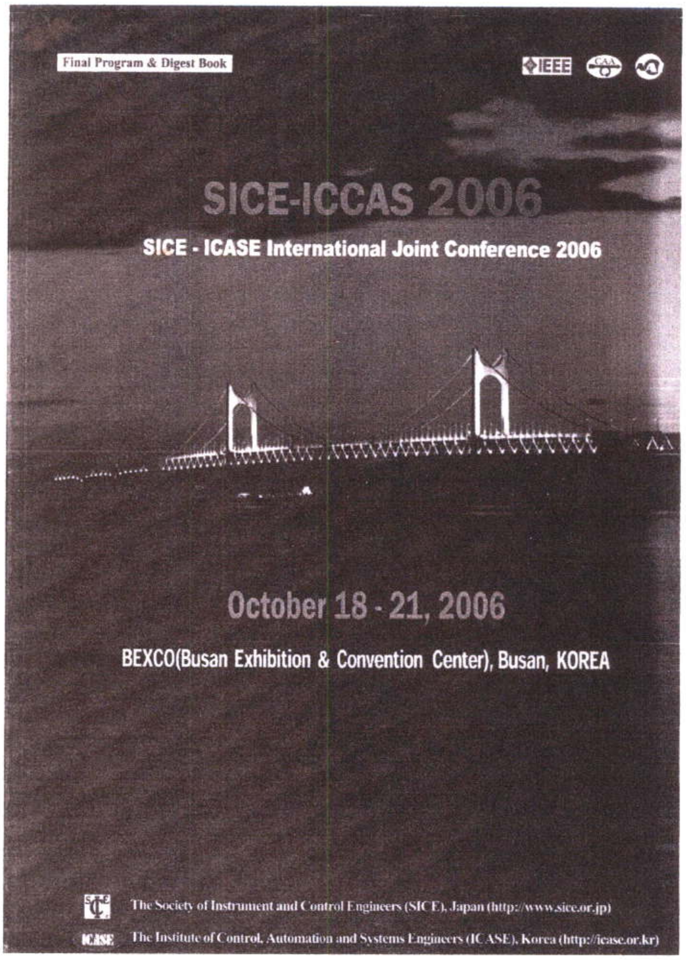
A 2V internal bias can apply to capacitors during measurement.

Up to 30VDC external bias can apply to capacitors during measurement via the two terminals (located on the rear panel). The applied current should not over 200mA.

* The external bias specified on the rear panel is at 30VDC, actually, it can be tolerated to 35VDC.

ภาคผนวก ฉ.

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์


Final Program & Digest Book
IEEE
SICE-ICCAS 2006
SICE - ICASE International Joint Conference 2006
October 18 - 21, 2006
BEXCO(Busan Exhibition & Convention Center), Busan, KOREA
The Society of Instrument and Control Engineers (SICE), Japan (http://www.sice.or.jp)
The Institute of Control, Automation and Systems Engineers (ICASE), Korea (http://icase.or.kr)

TE09

Sensor(2)

Time : 15:45 - 17:45
Room : 109

Chair(s) : Dr. Haji-Sheikh Michael (Northern Illinois Univ., United States)
Dr. Kiyasu Senya (Nagasaki Univ., Japan)

15:45 ~ 16:05 TE09-1

Adaptive Subpixel Estimation of Land Cover in a Remotely Sensed Multispectral Image

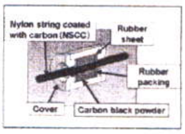
Senya Kiyasu, Kazunori Terashima, Seiji Hotta, Sueharu Miyahara(Nagasaki Univ., Japan)

.and surface corresponding to a pixel of remotely sensed mage does not necessarily consist of only one category of objects. Several techniques of subpixel analysis have been developed which estimate the proportion of components of and cover in a pixel. However, when the available training data do not correctly represent the spectral characteristics of he categories in the pixel, large errors may appear in the esults of estimation. The method of unsupervised estimation of component spectra has been presented to solve this problem...

16:05 ~ 16:25 TE09-2

Development of a Flexible Displacement Sensor using Nylon String Coated with Carbon and Its Application for McKibben Actuator

Iku Hamamoto, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Hisashi Matsushita(Okayama Univ. of Science, Japan)



The actuators for such a wearable device need to be flexible so as not to injure the body. The purpose of our study is to develop a flexible and lightweight actuator and a compact control device that can be safe and light enough to be attached to the human body. In this study, we proposed and tested a new type of flexible potentiometer using nylon string coated with carbon...

16:25 ~ 16:45 TE09-3

Sensor Node Localization Based on Inequalities of Radio Field Intensity -Comparison of Simulation and Experiments-

Shintaro Yamada, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama (Tokyo Institute of Technology, Japan)

The multidimensional scaling (MDS) method which is often used in sensory evaluation is applied to sensor node localization, and radio field intensities observed between nodes are compared to estimate their positions. This proposed method is useful to localize sensor nodes limited their resources because it doesn't require any special devices for localization. In this report, the localization performance is verified by both computer simulations and experiments using actual sensor nodes...

16:45 ~ 17:05 TE09-4

Precise Oscillation Loop for a Resonant Type MEMS Inertial Sensors

Chul Hyun, Jang Gyu Lee(Seoul National Univ., Korea), Taesam Kang(Konkuk Univ., Korea)

This paper presents an oscillation loop for an INS (Inertial Navigation System) grade, surface micro-machined differential resonant accelerometer and in-plane vibratory gyroscope. This resonant type sensor utilizes the electrostatic stiffness changing effect of an electrostatic actuator. A closed loop system called self-sustained oscillation loop is prerequisite for its operation as a resonant accelerometer. And precision driving mode oscillation is important to the vibratory gyroscope. A self- sustained oscillation loop induces the system's dynamic states into its primary mode, thus keeps track of its resonant state under applied acceleration or perturbation...

17:05 ~ 17:25 TE09-5

Design of Capacitive Sensor for Concentration Measurement

Witsarut Sriratana, Natee Thong-un(KMITL, Thailand), Lerdlekha Tanachaikhan(Ramkhamhaeng Univ., Thailand)

This paper presents the analysis of ideal equivalent circuit of the developed concentration sensor probe for chemical solutions by regarding to reasonable costs and reliability of device. The designed sensor probe consists of 2 parallel electrode plates that are coated by Nylon with 0.4 mm thick and mounted together by Resin with 2.5 mm of gap (0.09 times greater than electrode width). Any capacity changes will be compared with the electric circuit that is obtained from the Good Will R-L-C standard instrument, model CTR, at the frequency extending from 100Hz to 2 kHz...

17:25 ~ 17:45 TE09-6

Minimization of L2-Sensitivity for Linear Discrete-Time Systems Subject to L2-Scaling Constraints Using a Lagrange Function and a Bisection Method

Takao Hinamoto, Toru Oumi(Hiroshima Univ., Japan)

In this paper, the problem of minimizing an L2-sensitivity measure subject to L2-norm dynamic-range scaling constraints for linear discrete-time systems is investigated. To this end, an expression for evaluating the L2-sensitivity is introduced and an L2-sensitivity minimization problem subject to the L2-scaling constraints is formulated. An efficient iterative algorithm is then explored to solve the constraint optimization problem directly. The proposed solution method relies on neither converting the constrained optimization problem into an unconstrained one nor using a quasi-Newton algorithm...

SICE-ICASE International Joint Conference 2006
Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea

Design of Capacitive Sensor for Concentration Measurement

Natee Thong-un[1], Witsarut Sriratana[1] and Lerdlekha Tanachaikhan[2]

[1] Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
(Tel: 66-2739-2407; Fax: 66-2739-2406; E-mail: kswitsar@kmitl.ac.th)
[2] Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University, Huamark, Bangkapi, Bangkok 10240, Thailand
(Tel: 66-2310-8570; Fax: 66-2314-3783; E-mail: hi_care@hotmail.com)

Abstract: This paper presents the analysis of ideal equivalent circuit of the developed concentration sensor probe for chemical solutions by regarding to reasonable costs and reliability of device. The designed sensor probe consists of 2 parallel electrode plates that are coated by Nylon with 0.4 mm thick and mounted together by Resin with 2.5 mm of gap (0.09 times greater than electrode width). Any capacity changes will be compared with the electric circuit that is obtained from the Good Will R-L-C standard instrument, model CTR, at the frequency extending from 100Hz to 2 kHz. From the experiments, it was found that the sensor designed for Ethyl Alcohol solution within concentration of 5% to 95% and 10% concentration interval, at room temperature of 23 °C and frequency of 100 Hz, can provide the results with high linearity as well as high resolution of capacity change which is 2 pF per 1% of concentration.

Keywords: Capacitance, Concentration, Plates, Probe, Sensor.

1. INTRODUCTION

Chemical substance is one of the most important factors in many industrial processes. At present, there are many approaches for measuring the chemical concentration and one technique considered in this research is the use of capacitive sensor. The objectives of the study are to design and develop sensor probe for chemical concentrate measurement by focusing on the convenience, reasonable costs, high efficiency and high reliability based on the capacitive difference method of parallel plates and dielectric properties as shown in Eq(1).

$$C = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_r A}{d} \tag{1}$$

Where C: Capacity
ε_r: Elative permittivity of tested chemicals
ε_o: Permittivity constant 8.854×10^{-12}
A: Area of sensor probe
d: Gap (distance) of sensor probe

2. THEORY AND DESIGN

Sensor probe is designed based on the ideal characteristic of capacitor by using two parallel metal plates as shown in Fig. 1 coated by Nylons with average thickness of 0.4 mm in order to prevent chemical corrosion and to obtain high electric resistivity.

To analyze the ideal equivalent circuit of sensor probe designed, the circuit in Fig. 2 is considered and the equations for impedance evaluation are as shown in Eqs. (2), (3) and (4).

$$Z(\omega) = R_e(\omega) + I_m(\omega) \tag{2}$$

$$R_{e[Z(\omega)]} = \frac{R_S}{1+\omega^2 C_R^2 C_S^2} \tag{3}$$

$$I_{m[Z(\omega)]} = -j\frac{\left(1+\omega^2 C_M^2 R_S^2 + \omega C_N C_M R_S^2\right)}{\omega C_N + \omega^3 C_N C_M^2 R_S^2} \tag{4}$$

Where $R_{e[Z(\omega)]}$: Real number of sensor probe
$I_{m[Z(\omega)]}$: Imaginary number of sensor probe
C_N, C_{N2} : Capacitance of Nylon $\varepsilon = 8$
C_R : Capacitance of resin $\varepsilon = 3.8$
C_S, R_S : Characteristic of chemicals $\varepsilon = 25$
C_M : $C_S + C_R$

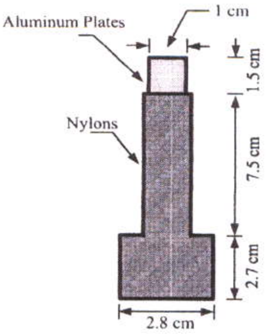


Fig. 1 Feature and details of Sensor

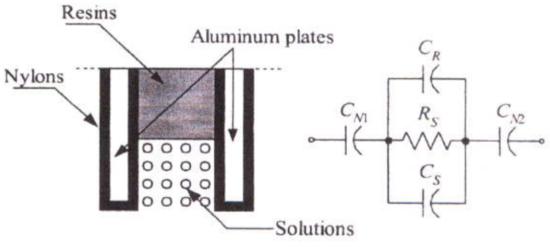


Fig. 2 Equivalent circuit of Sensor probe

The feature of developed sensor is as shown in Fig. 3. One end has a resin-made holder that limits the gap of electric plates to be in the specific distance and another end is used to measure the concentration of chemicals. In this research, there are 2 designs of sensor probe: type A with gap ≈ 5 mm (0.18 times greater than plate width) and type B with gap ≈ 2.5 mm (0.09 times greater than plate width). The characteristics and capacitances of those 2 sensor types are as shown in Table 1.

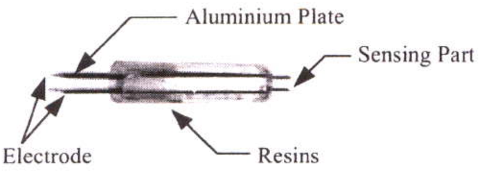


Fig. 3 Developed sensor probe

Table 1 Capacitance of materials

Type	C_N (pF)	C_R (pF)	C_S Air (pF)	C_S Chemicals (pF)
A	133	5.38	1.33	32.65
B	133	10.76	2.66	65

3. TESTS OF SENSOR PROBE

In this research, sensor probes were tested by Good Will R-L-C standard instrument, model CTR, at the minimum range of 100Hz and maximum range of 2 kHz. The testing voltage was 1.275 V_{rms} at ambient temperature ≈ 23 °C. The instrument showed the results in parallel circuit form that appears between the resistor R_P and the capacitor C_P. These experimental results will be compared with the results from calculations as described in Eqs. (5) and (6).

$$R_{e[Z(\omega)]} = \frac{R_P}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{5}$$

$$I_{m[Z(\omega)]} = -j\frac{\omega C_P R_P}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{6}$$

Where C_P : Capacitance
R_P : Resistance

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The experiments have been divided into 3 cases: room condition, Ethel alcohol solution, various concentrations of chemical solutions. Details are as follow:

4.1 Room Condition

Sensor probe was tested within the frequency of 100 Hz to 2 kHz. The result provided only C_P because R_P was out of range and the instrument could not display. The results of sensor probe type B and A were 11 pF and 6 pF, respectively. From the experiment, it is found that the stability of type B is higher than that of type A as shown in Fig. 4. The average absolute error of type B is about 10% to 30% while that of type A is about 10% to 60%. The gap between parallel plates could influence the absolute error obtained from measurements, directly.

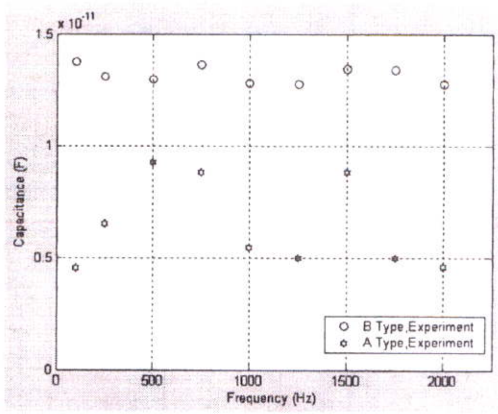


Fig. 4 Comparison of measurements (Type A and Type B in room condition)

4.2 Ethel Alcohol Solution

Fig. 5 and 6 are the experimental results when testing with Ethel Alcohol solution and the comparison of real and imaginary numbers. When increasing the frequency, the measurement results will decrease according to the assumption especially the results of type A that decrease significantly starting from the frequency of 1.5 kHz.

Fig. 7 shows the experiment when testing type B with various chemical concentrations. Fig. 8 illustrates the standard R-L-C instrument used in this research.

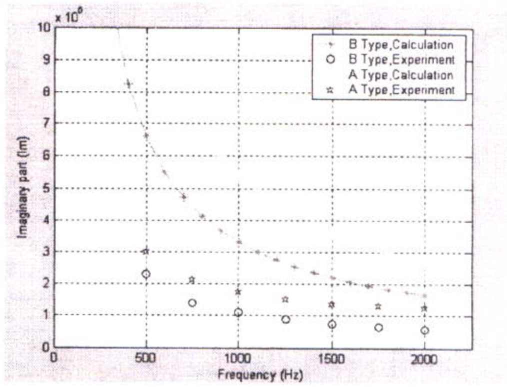


Fig. 5 Comparison of Ethel Alcohol measurements and calculations (case of real numbers ($R_{e[Z(\omega)]}$))

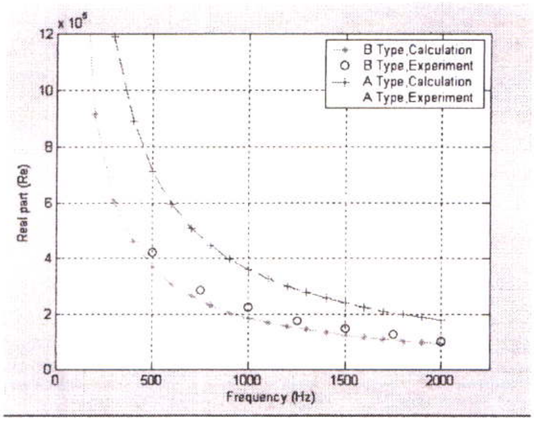


Fig. 6 Comparison of Ethel alcohol measurements and calculations (case of imaginary numbers ($I_{m[Z(\omega)]}$))

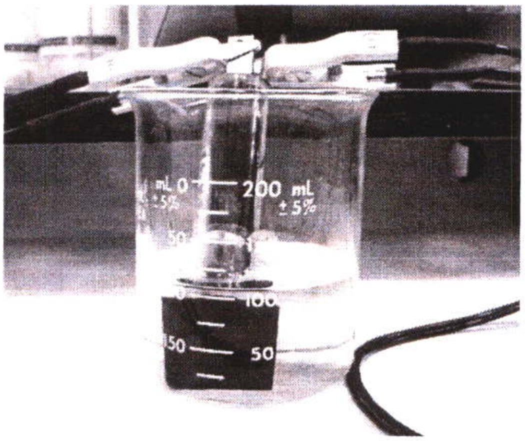


Fig. 7 Experiment of type B

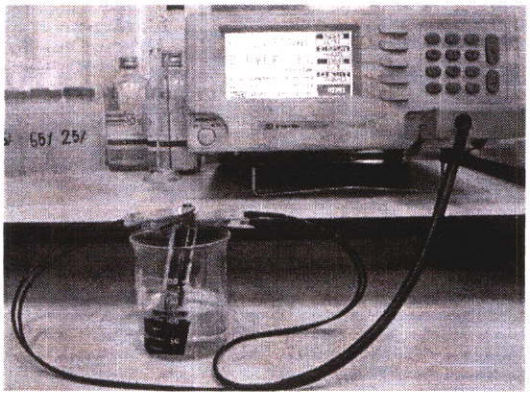


Fig. 8 Measurement of sensor probe type B using standard R-L-C

4.3 Various Chemical Concentrations

The appropriate frequency for sensor probe developed can be considered from the linearity toward chemical concentrations in all measurement ranges, resistance and capacitive variation by experimenting with the chemical solutions ranging from the concentration of 5% to 85% with 10% concentration interval. In this research, the frequency range of 100Hz to 1 kHz was used. The results are shown in the characteristic graph of sensor probe as in Fig. 9 and 10.

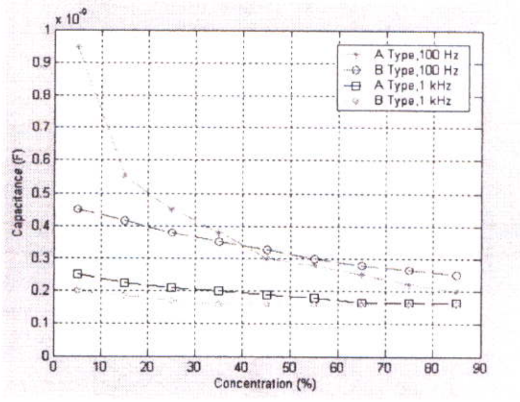


Fig. 9 Relationships of Capacitance and Concentration

From experiments, type B provides the best linearity as well as the higher resistance over the instrument limitation. The capacitive variation within 1% of concentration equals to 2 pF at 100Hz. However, when comparing with 1 kHz, the capacitive variation will be saturated at concentration of 30% or more that is not recommended to use. At 100 Hz, sensor probe type A has the linearity in some ranges but the variation is greater than type B, for instance, at concentration of 5% to 10%, the capacitive variation is about 45 pF per 1%. At the concentration range of 15% to 45%, the capacitive variation is about 10 pF per 1% and at concentration of 45% to 85%; the capacitive variation is about 7.5 pF per 1%. Although type A provides the greater capacitive variation than type B does, it generates harmonic signals in some measurement ranges. Consequently, the useful signal is needed to adjust and compensate.

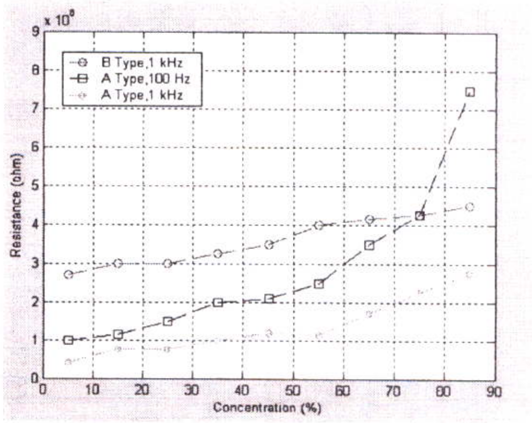


Fig. 10 Relationships of Resistance and Concentration

5. CONCLUSION

From experiments under room condition, sensor probe provides only the results in capacitance form because the resistance result is infinite and negligible. Furthermore, the sensor probe with narrow gap presents the error that is about 0.3 times greater than calculation while sensor probe with wider gap presents the error that is about 0.6 times greater than calculation. When testing with Ethel Alcohol solution, the results present both resistance and capacitance and sensor probe with narrower gap also provides less error than that with wider gap does. The most suitable frequency for narrow-gap sensor probe is 100Hz but only capacitance results with high linearity is provided. To design the instrument for concentration measurement, one important point taken to consider is that the materials should not provide any chemical reactions toward the solution under test and should have low conductivity. Also, the gap between 2 plates should be less than the width of plates. Based on the experiments, the recommended proportion of gap and width (d/w) is about 0.09 because it generates the least error comparing with calculations.

REFERENCES

[1] Charles S. Walker, "Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis", ARTECH HOUSE, Inc., pp.48-51, 1990.

[2] Lijun Xu, Alfred P. Weber, Gerhard Kasper, "Capacitance-base concentration measurement for gas-particle system with low particles loading", Flow Measurement and Instrumentation, No.11, pp.185-194, 2000.

[3] Doernor S, Schultz T, Schneider T, Sundmacher K, Hauptmann P, "Capacitive sensor for methanol concentration measurement in direct methanol fuel cells", IEEE Proc.0f Sensors, pp.639-641, 2004.

[4] H. Wayne Beaty, "Electrical Engineering Materials Reference Guide", McGraw-Hill, pp. 5.1-5.2, 1990.

[5] Larry K. Baxter, "Capacitive Sensors Design and Application", IEEE Press, New York, 1997.

[6] Perambur S. Neelakanta, "Handbook of Electro-magnetic Materials", CRC Press., pp. 59-81, 1995.

[7] Rae Duk Lee, Han Jun Kim, "A Coil-Type Capacitive Sensors for Measurement of The Deterioration of Engine oil", IEEE Con.Precision Electomagnetic Measurement Digest, pp.184-185, 2002.

[8] T. Soejima, K. Shida, "Liquid distinction by capacitive measurement using non-contact simultaneous two-point measurement method", SICE Con.Aug.5-7, 2002.

[9] William H. Hayt, John A. Buck, "Engineering Electromagnetics", McGraw-Hill, pp.540-541, 2001.

ประวัติผู้เขียน

นายนที ทองอุ่น เกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ.2521 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบเครื่องมือวัด จากภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548 โดยในปี พ.ศ. 2548 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ