

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้คุณสมบัติของการแปลงค่าความจุ Analysis of Chemical Concentration using Electric Capacitive Variation Characteristic

นรินทร์ ธรรมารักษ์วัฒนะ¹⁾ จักรกฤษณ์ นิยมพงษ์วิรัตน์²⁾ และวิศรุต ศรีวิริยะ³⁾

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบของวงจรสมมูลไฟฟ้าทางอุดมคติ ของอุปกรณ์ตรวจรู้ด้วยหลักการพื้นฐานของการแปลงค่าความจุ โดยใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายทางเคมี ชนิดเอทิลแอลกอฮอล์เป็นกรณีศึกษา การออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้มีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นโลหะคู่ขนานเคลือบด้วยไนลอนความหนาเฉลี่ย 0.4 mm ยึดด้วยเรซินเพื่อกำหนดระยะห่างของแผ่นคู่ขนานคงที่ 2.5 mm และ 5 mm โลหะที่ใช้เป็นสแตนเลสและทองแดง การทดสอบใช้สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 95 % จนถึง 5% และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นครั้งละ 10 % ด้วยการเจือจางของน้ำกลั่นภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ (23 °C) ความถี่ทดสอบเปลี่ยนแปลงครั้งละ 500 Hz ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 2 kHz ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความจุที่ได้จากการตรวจรู้จะนำไปเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐาน ยี่ห้อ Good Will รุ่น CTR เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเปรียบเทียบกันระหว่างโลหะสองชนิดที่ใช้ทำเป็นแผ่นตัวนำและระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานตามลำดับ การออกแบบในบทความนี้เน้นถึงวิธีการที่ไม่ซับซ้อน มีราคาถูก มีความถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ : เอทิลแอลกอฮอล์, สแตนเลส, ทองแดง, ความจุไฟฟ้า, วงจรสมมูล, โคอีเล็กทริก

Abstract

This paper presents the signal analysis of ideal equivalent circuit obtained from capacitive-based sensor for chemical concentration measurement. In this study, the Ethel alcohol solution was used as a case study. The sensor was designed and fabricated with parallel plates finished by 0.4 mm-thick nylon and mounted together by resin to maintain the distance of these plates by 2.5 mm and 5 mm. The parallel plates were made of two types of metal, i.e. stainless and copper, for measurement of Ethel alcohol solution ranging from 95 % to 5 % of concentration. Ethel alcohol was diluted for 10 % increment of solution by distilled water under controlled temperature (23 °C) and 500 Hz increment of frequency which was ranged from 100 Hz to 2 kHz. The variation of electric capacity was then compared with electric circuit of the standard R-L-C instrument (Good Will model CTR) for analyses of the metal fabricated and the appropriate distance of parallel plates. In this study, the simple sensor design with reasonable costs was also aimed as well as the accuracy and reliability of designed sensor was considered.

Keywords : Ethel alcohol, Concentration, Measurement, Parallel plates, Capacitive

¹⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

²⁾ นักศึกษาทดลองเรียน ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

³⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

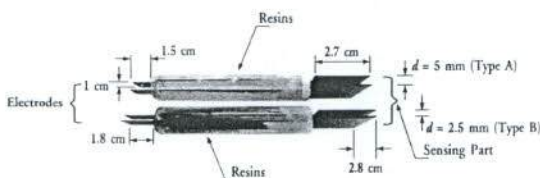
บทนำ

การตรวจรู้ความเข้มข้นของสารละลายทางเคมีปริมาตรเท่ากับ 100 ml ความสูง ประมาณ 3.3 cm ด้วยหลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุ สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายทางเคมีที่แตกต่างกันต่อตัวแปรซึ่งเป็นค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริก อันเป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (1) โดยวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ต่อวงจรสมมูลของตัวตรวจรู้ ซึ่งในที่นี้จะแสดงการทดสอบตัวตรวจรู้เปรียบเทียบกับระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานชนิดสแตนเลสกับทองแดงที่ความถี่ 1 kHz ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน 5 mm (ชนิด A) และ 2.5 mm (ชนิด B) ตามสัดส่วนความกว้างของแผ่นตัวนำต่อระยะห่าง $d/w = 0.1$ โดยประมาณ ดังรูปที่ 1

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \tag{1}$$

- เมื่อ k คือค่าความซึมซาบ (Relative Permittivity) ของสารละลาย
 ϵ_0 คือค่าคงที่ 8.854×10^{-12} (F/m)
 A คือพื้นที่ของแผ่นตัวนำ (m^2)
 d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (m)

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริก (ϵ) คืออุณหภูมิและความถี่ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกลดลงดังสมการที่ (2)



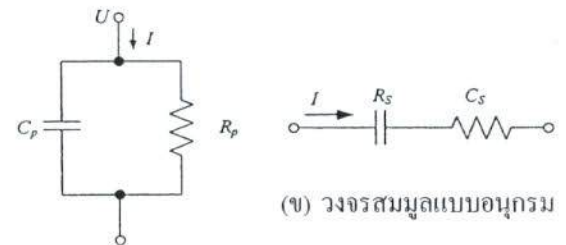
รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจรู้

$$\alpha = \frac{(\epsilon - 1)(\epsilon + 2)}{3\epsilon} \beta_V \tag{2}$$

เมื่อ α_ϵ คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าไดอิเล็กตริก
 β_V คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิการกระจายตัวของเนื้อสาร

ทฤษฎีและหลักการ

การทดสอบตัวตรวจรู้ที่ได้จากเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐาน สามารถแสดงผลอยู่ในรูปค่าความจุไฟฟ้า (C_p) ขนานกับค่าความต้านทาน (R_p) ตามวงจรสมมูลไฟฟ้าแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) โดยกำหนดสมมติฐานให้แสดงผลอยู่ในลักษณะของค่าความจุไฟฟ้า เพื่อให้ผลลัพธ์มีค่าทางอุดมคติมากที่สุด ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ $[Z(\omega)]$ ของวงจรสมมูลสามารถหาได้จากสมการ (3)



(ก) วงจรสมมูลแบบขนาน

(ข) วงจรสมมูลแบบอนุกรม

รูปที่ 2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

$$Z(\omega) = \frac{R_p}{1 + j\omega C_p R_p} \tag{3}$$

จากสมการที่ (3) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนประกอบด้วยส่วนจริง (Real Part) และส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) ได้ดังสมการที่ (4)

$$Z(\omega) = \frac{R_p - j\omega C_p R_p^2}{1 + j(\omega C_p R_p)^2} \tag{4}$$

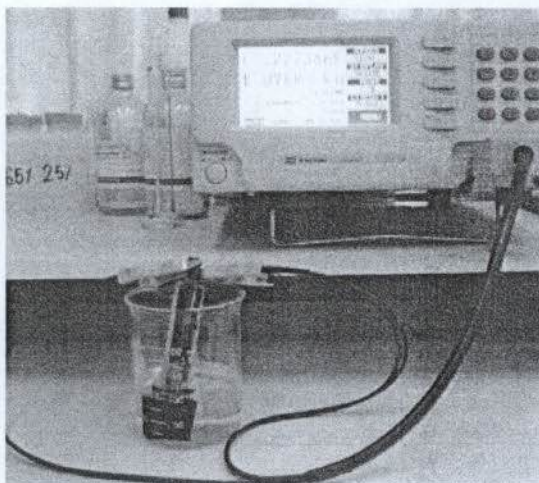
โดยความสัมพันธ์ระหว่างวงจรสมมูลแบบอนุกรมและขนานสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (5) และ (6)

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (5)$$

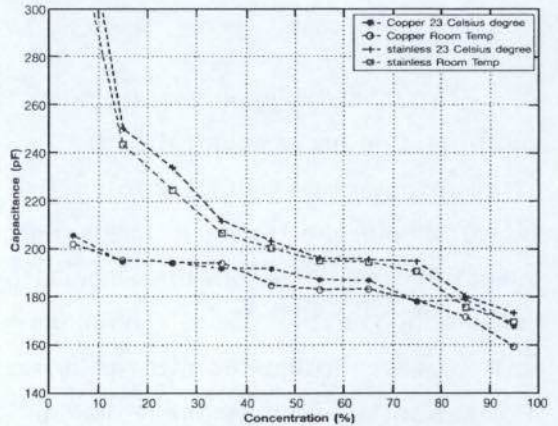
$$R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \right) \quad (6)$$

การทดสอบและวิเคราะห์ตัวตรวจรู้

การทดสอบตัวตรวจรู้โดยใช้เครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐานสามารถแสดงดังรูปที่ 3 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์โดยเติมน้ำกลั่นทำให้ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบในสถานะของอุณหภูมิควบคุมเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง (27 °C ถึง 33 °C) โดยจะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องมีค่าน้อยลงเนื่องจากค่าไดอิเล็กทริกลดลง ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) ซึ่งมีค่า < 3% ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตลอดทั้งย่านการทดสอบ



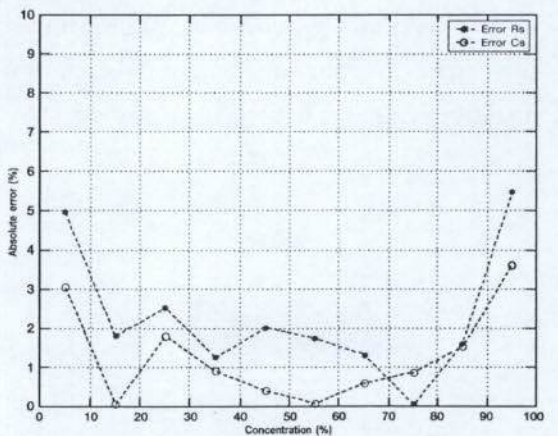
รูปที่ 3 การทดสอบตัวตรวจรู้กับเครื่องมือวัด R-L-C มาตรฐาน



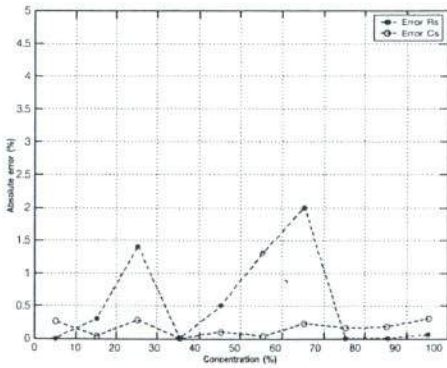
รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างวงจรสมมูลแบบขนานกับแบบอนุกรม

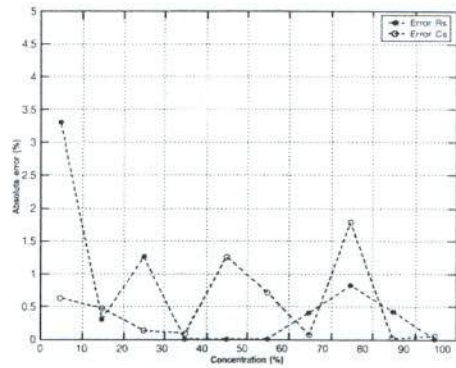
การเปรียบเทียบข้อมูลจากการคำนวณกับค่าจากเครื่องมือวัด ทำโดยนำค่าวงจรสมมูลแบบขนานจากเครื่องมือวัดแทนในสมการ (5) เพื่อคำนวณหาค่า C_s และ R_s แล้วนำไปเปรียบกับค่าจากเครื่องมือวัดที่แสดงผลในรูปวงจรสมมูลแบบอนุกรม โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ โดยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของตัวนำสแตนเลสและทองแดงที่มีโครงสร้างชนิด A ณ ความถี่ 1 kHz แสดง ดังรูปที่ 5 และ 6 ส่วนตัวนำที่มีโครงสร้างชนิด B ดังรูปที่ 7 และ 8



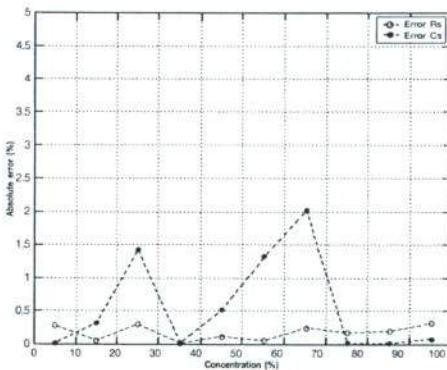
รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของทองแดงชนิด A ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 6 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของสแตนเลสชนิด A ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 8 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของสแตนเลสชนิด B ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 7 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของทองแดงชนิด B ที่ความถี่ 1 kHz

ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ที่มีระยะ d ที่แตกต่างกัน พบว่าแผ่นตัวนำชนิด A มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์โดยเฉลี่ยประมาณ 5% ซึ่งมากกว่าแผ่นตัวนำชนิด B ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยประมาณ 1.5%

การทดสอบความเที่ยงตรงในการตรวจรู้

การทดสอบความสามารถในการซ้ำค่าเดิม จะพิจารณาจากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าในแต่ละย่านความเข้มข้นจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง โดยคำนวณหาค่าเฉลี่ยทางสถิติและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลที่ได้พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้สแตนเลสเป็นแผ่นตัวนำคู่ขนานชนิด B มีค่าความน่าเชื่อถือ 95% ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางสถิติของทองแดงชนิด B ที่ความถี่ 100 Hz

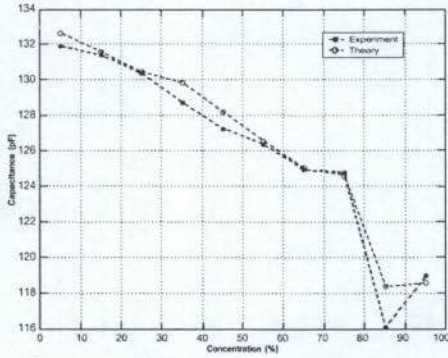
%	\bar{X} (pF)	$S(x)$	U
95	167.96	8.034	7.18
85	179.32	6.45	5.772
75	178.51	6.39	5.72
65	187.425	2.72	2.44
55	187.63	3.42	3.06
45	192.29	3.28	2.93
35	192.68	6.69	5.988
25	194.62	4.337	3.88
15	195.15	2.519	2.253
5	206.10	27.04	24.43

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางสถิติของสแตนเลสชนิด B ที่ความถี่ 100 Hz

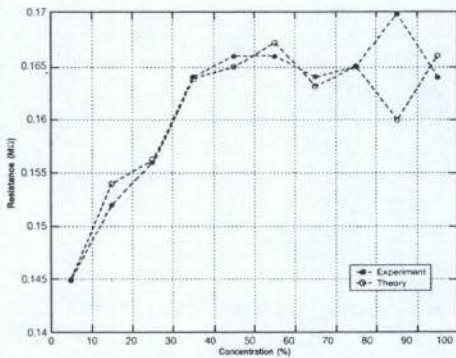
%	\bar{X} (pF)	$S(x)$	U
95	173.819	6.358	5.687
85	180.62	2.124	1.899
75	195.14	3.106	2.77
65	195.94	2.56	2.29
55	196.58	1.42	1.27
45	203.79	5.631	5.036
35	212.22	3.077	2.752
25	234.31	5.391	4.822
15	250.77	3.44	3.082
5	368.17	6.52	5.83

การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณของวงจรสมมูลแบบอนุกรมในสภาวะต่างๆ กับเครื่องมือวัด จะพิจารณาค่า C_s และ R_s ของตัวตรวจรู้รูปที่ 9 และ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่า C_s และ R_s ระหว่างการคำนวณกับการวัด กรณีที่ใช้ทองแดงเป็น

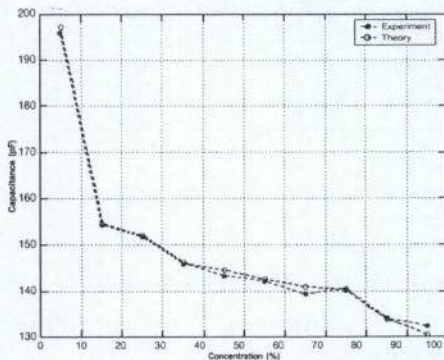
แผ่นโลหะคู่ขนานชนิด B ที่ความถี่ตอบสนองเท่ากับ 2 kHz ส่วนในรูปที่ 11 และ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่า C_s และ R_s กรณีใช้สแตนเลสเป็นแผ่นโลหะคู่ขนานชนิด B ที่ความถี่ตอบสนองเท่ากับ



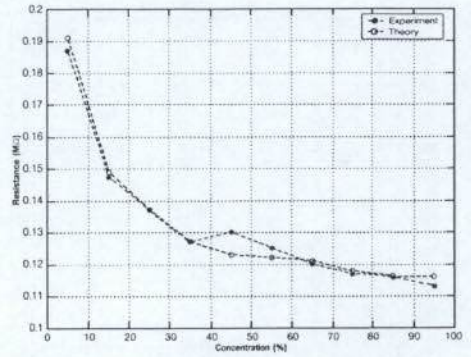
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่า C_s ของทองแดงชนิด B ความถี่ 2 kHz



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่า R_s ของทองแดงชนิด B ความถี่ 2 kHz



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่า C_s ของสแตนเลสชนิด B ความถี่ 2 kHz



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่า R_s ของสแตนเลสชนิด B ความถี่ 2 kHz

สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นพบว่า ตัวตรวจรู้ที่ใช้สแตนเลสเป็นแผ่นโลหะคู่ขนานชนิด B มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในช่วง 15% ถึง 55% ของความเข้มข้น ความละเอียดเฉลี่ยเท่ากับ 8.6 pF ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 5% และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดต่ำกว่า 5% ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ทองแดงเป็นแผ่นโลหะคู่ขนานชนิด B มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในช่วง 25% ถึง 55% ของความเข้มข้นเท่านั้น ความละเอียดเฉลี่ยเท่ากับ 2 pF ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 5% และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดต่ำกว่า 6% เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากอุณหภูมิ ตัวตรวจรู้ที่ใช้ทองแดงเป็นแผ่นโลหะคู่ขนานชนิด A จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า Fringing Field และมีปริมาตรในการตรวจวัดมากจึงมีเสถียรภาพต่อสิ่งรบกวนต่ำ สังเกตได้จากค่าความไม่แน่นอนที่สูงกว่าชนิด B ในขณะที่ตัวตรวจรู้ชนิด B มีค่าความต้านทานอยู่ในพิสัยและค่าความจุไฟฟ้าลดลงเฉลี่ยไม่เกิน 2% ข้อดีของตัวตรวจรู้ที่แสดงผลออกมาเฉพาะค่าความจุไฟฟ้านอกจากจะมีความเป็นอูมคคิแล้ว เมื่อพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้งานเช่นต่อร่วมกับวงจรปรับการปรับบริดจ์สมดุลก็สามารถทำได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์ที่อยู่ในวงจรประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Natee Thong-un, Witsarut Sriratana, Lerdlekha Tanachaikhan, "Design of Capacitive Sensor for Concentration Measurement", SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Bexco, Busan, Korea, October 18-21, 2006.
- [2] G.R. Govinda Raju, "Dielectric Constant of Binary of Liquids." IEEE Proceeding, October 2000.
- [3] S.C. Saxena and G.M. Tayal, "Capacitive Moisture Meter." IEEE Trans.Instrum.Meas., Vol.IECI-28, No.1, February 1981.
- [4] J.F. Posada.et.al., "An Automated Data Acquisition System for Modeling the Characteristi of a Soil Moisture Sensor." IEEE Trans.Instrum. Meas., Vol.40, No.5, October 1991.
- [5] L. Xu.et.al., "Capacitance-Base Concentration Measurement for Gas-Particle System with Particle Loading." Flow Meas. and Instrum., No.11, 2000.
- [6] Hayt, W. and Buck, J. 2001. "Engineering Electromagnetic." Singapore : McGraw – Hill.
- [7] Walker, C. 1990. "Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis." 537. Norwood : ARTECH HOUSE, Inc.
- [8] 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.
- [9] H.B. Palmer, "Capacitance of Parallel-Plate Capacitor by the Schwatz – Christoffel Transformation." Trans.AIEE., Vol.56, March 1927.

