



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการวัดระดับน้ำที่ใช้หลักการแบบต่างๆ ในบทนี้ผู้วิจัยได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้ 1) หลักการพื้นฐานของการวัดระดับของเหลว 2) หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า 3) รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 4) การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

2.1 หลักการพื้นฐานของการวัดระดับ

การวัดระดับของของเหลวมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตหลาย ๆ อย่าง กระบวนการทางวิทยาศาสตร์หรือแม้กระทั่งในชีวิตประจำวัน เช่น การวัดระดับน้ำในถังเก็บน้ำ การวัดระดับน้ำในแม่น้ำ การวัดปริมาณของนม เบียร์ ในประเภทอุตสาหกรรมทางอาหารและเครื่องดื่ม การวัดปริมาณของน้ำมันในประเภทอุตสาหกรรมน้ำมัน เป็นต้น จากการใช้งานในประเภทต่างๆ พบว่า ระดับของวัตถุที่ต้องการวัดไม่จำเป็นว่าต้องเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถแบ่งเซนเซอร์วัดระดับโดยดูความต่อเนื่องของสัญญาณต่อเวลาก็พบว่ามีอยู่ 2 แบบใหญ่ๆ ได้แก่

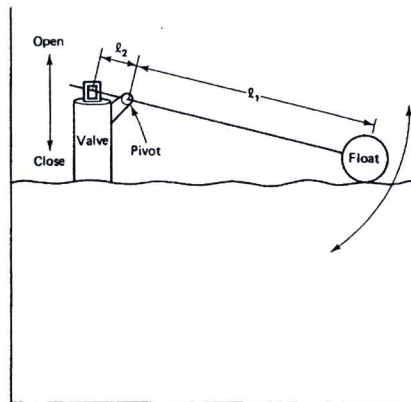
1. แบบต่อเนื่อง (continuous) จะให้สัญญาณออกมาเป็นสัดส่วนกับความสูงของวัตถุที่อยู่ในถังตลอดเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุ เป็นต้น
2. แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เอาต์พุตที่ออกมาจากเซนเซอร์แบบนี้ทำงานที่สองสถานะ คือ เปิดและปิด (หรือตัดกับต่อวงจร) ลักษณะของงานจะนำไปใช้กับเครื่องควบคุมกระบวนการได้ง่ายกว่า ตัวอย่างของเซนเซอร์แบบนี้ ได้แก่ สวิตช์ลูกลอย หลักการอิเล็กทรอนิกส์ตัวนำ เป็นต้น

2.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามหลักการทางกายภาพ

ในการแบ่งอุปกรณ์เซนเซอร์แบบนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

1. อุปกรณ์วัดระดับทางกล (Mechanical Sensor) โดยทั่วไปได้แก่ สวิตช์ลูกลอยตัวอย่างการใช้งานของสวิตช์แบบลูกลอย เช่นในถังชักโครกซึ่งใช้ลูกลอยเป็นตัวปิดเปิดวาล์วถังเก็บน้ำประปา เป็นต้น หลักการทำงานของลูกลอยจะพบว่าตำแหน่งของวาล์วจะเป็นสัดส่วนกับระดับน้ำ นั่นคือ หากระดับน้ำต่ำลงลูกลอยจะตกลงและเปิดวาล์ว เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นลูกลอยจะ

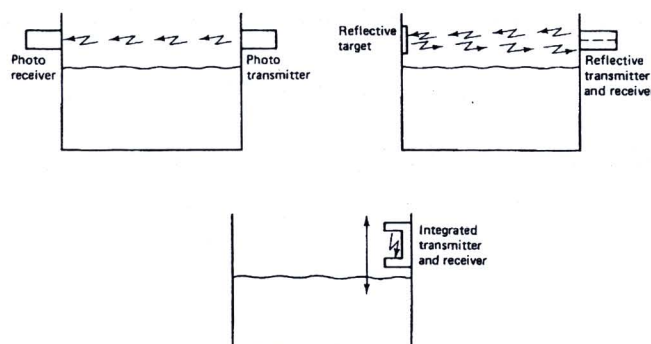
ลอยขึ้นไปผลักให้วาล์วปิด หลักการทำงานจะเห็นว่าแขนและจุดหมุน (pivot) เป็นระบบการขยายแรงทางกล แรงที่จ่ายให้กับลูกลอยแล้วมีผลต่อวาล์วจะเป็นผลมาจากเฟกเตอร์ของ l_1 , l_2 ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การใช้ลูกลอยเพื่อขับวาล์วในระบบควบคุม [12]

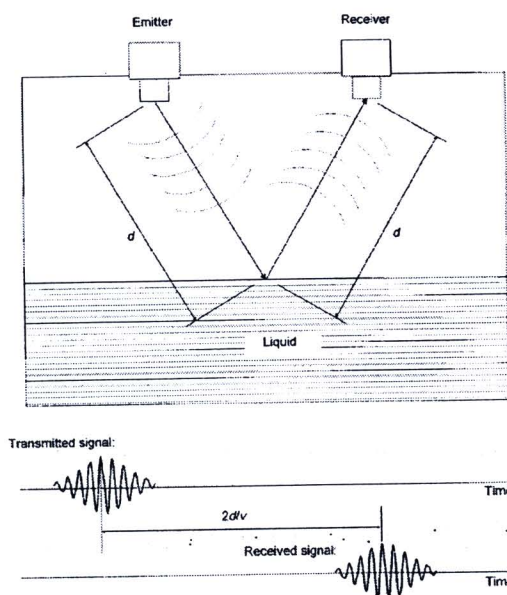
2. อุปกรณ์วัดระดับทางเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection) ปกติ

อุปกรณ์ส่งแสงจะใช้ไดโอดเปล่งแสงในการปล่อยแสงอินฟราเรดผ่านเลนส์ทำให้ลำแสงกระจายออก ส่วนอุปกรณ์ตัวรับจะเป็นอุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์ไวแสง แสงที่ถูกส่งออกไปจะต้องกรองเพื่อให้ได้เฉพาะความถี่แสงที่จะทำการตรวจจับเท่านั้น เมื่อระดับวัตถุอยู่ต่ำกว่าตัวเซนเซอร์แสงจะส่งไปกระทบกับตัวรับแสงทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์อิ่มตัวและให้ลอจิกต่ำออกมา เมื่อระดับของวัตถุขึ้นไปบังแสง โฟโตทรานซิสเตอร์ก็จะปิด ดังรูปที่ 2-2 ในสถานะที่ใช้กับไฟกระแสดตรงต้องต่อตัวต้านทานดึงค่าขึ้น (pull-up) ระหว่างคอลเลกเตอร์เปิด (open collector) ของโฟโตทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ระดับของแรงเคลื่อนที่ออกมาอยู่ในสภาวะลอจิกสูงแต่โดยทั่วไปที่ตัวรับจะใช้ทรานซิสเตอร์ไวแสงมากกว่าที่จะใช้โฟโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2-2 เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง [13]

ส่วนการวัดระดับที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกมีหลักการว่าวัตถุจะไม่สัมผัสกับตัววัด ใช้หลักการในการสะท้อนของพัลส์อัลตราโซนิกที่ผิวของวัตถุ การทำงานด้วยวิธีแบบนี้คือ เมื่อสัญญาณอัลตราโซนิกถูกส่งออกไป เาต์พุตของโมดูลดังกล่าวก็จะเป็นสัญญาณพัลส์ แล้วรับเอาสัญญาณดังกล่าวที่สะท้อนกลับมายังเครื่อง สัญญาณพัลส์ดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ตัวนับ ซึ่งจะต้องวัดเวลาระหว่างพัลส์ที่ส่งออกไปและที่สะท้อนเข้ามายังตัวรับดังรูปที่ 2-3 พบว่าคลื่นอัลตราโซนิกจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียง เมื่อทราบค่าความเร็วคลื่นและเวลาแล้วก็สามารถจะทราบระยะที่ไปยังผิวได้

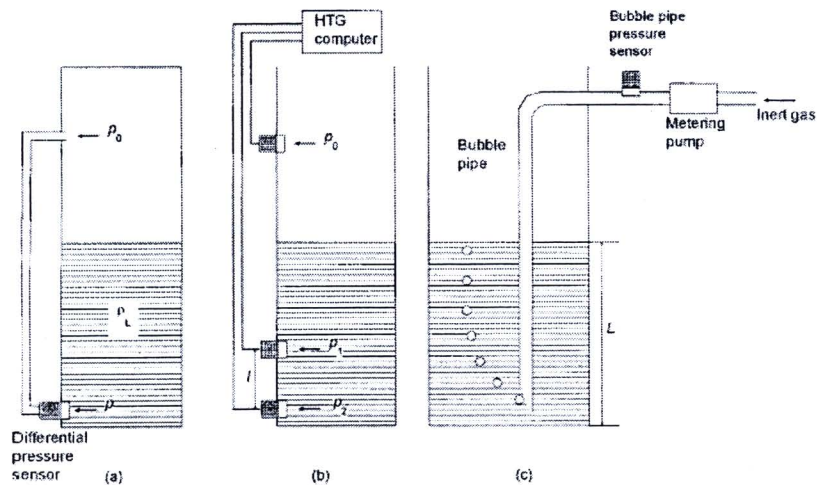


รูปที่ 2-3 วิธีการวัดระดับน้ำด้วยคลื่นอัลตราโซนิก [14]

3. อุปกรณ์วัดระดับแบบใช้หลักการของความดัน ในการควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ ระบบการวัดจะต้องมีความเที่ยงตรง หรือการบอกระดับในถังที่เป็นเชิงเส้น พบว่าความดันที่ก้นถังจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระดับของเหลวในถังที่เรียกว่า “เฮด” (pressure head or static head) ดังนั้นสามารถวัดระดับของของเหลวในถังได้โดยการวัดความดันที่ก้นถัง ข้อควรพิจารณาในการวัดระดับแบบนี้คือ

- (1) ของเหลวจะต้องมีคุณสมบัติเดียวกันตลอด (uniform) คือ มีความหนาแน่นคงที่
- (2) หากไม่สามารถติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ก้นถังได้ จะต้องใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการบวกหรือลบค่าออฟเซตบางตัวออกเพื่อให้ได้จุดศูนย์ที่ถูกต้อง

(3) หากใช้ความดันด้านล่างของถังเป็นตัวบอกระดับ ในขณะที่ถังเปิดออกสู่บรรยากาศก็สามารถใช้สมการเฮดพื้นฐาน หรือในขณะนี้น้ทรานสดีวเซอร์ก็จะกลายเป็นเกจวัดความดัน(เทียบกับความดันบรรยากาศ) แต่หากถังดังกล่าวถูกซีลหมด ความดันด้านล่างก็จะไม่แปรผันตามค่าเฮดนั้นเพียงอย่างเดียว โดยจะแปรไปตามความดันด้านบนด้วย



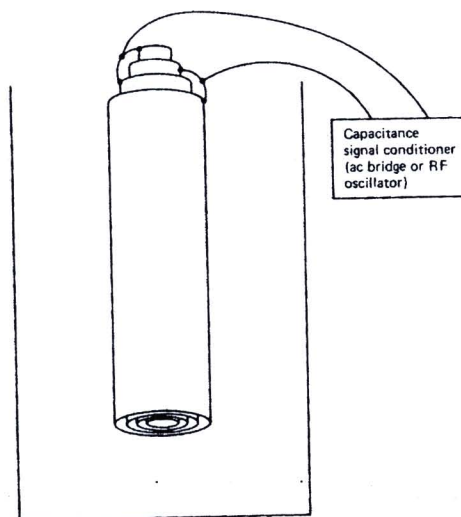
รูปที่ 2-4 การวัดระดับน้ำโดยใช้การตรวจวัดความดัน [15]

4. วิธีการวัดทางไฟฟ้าที่ให้สัญญาณต่อเนื่อง หากตัดแปลงสวิตช์ถูกลอย ซึ่งเป็น การวัดระดับน้ำทางกล แล้วแทนที่วาล์วด้วยการสไลด์ของแขนโพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้นเพื่อ ประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ได้ เมื่อระดับเปลี่ยนแปลงคือเคลื่อนที่ขึ้นบนหรือลงล่างทำให้แขนของโพเทน ชิโอมิเตอร์เลื่อนตาม หรืออาจจะใส่เฟืองเข้าไปเพื่อทำการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแขนคือ I_2 ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบวงกลมเพื่อไปหมุนแกนของโรตารีโพเทนชิโอมิเตอร์อีกตอนหนึ่ง

คอนดักแตนซ์โพรบ (Conductance probe) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับ ของของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่อาศัยพื้นฐานของสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตาม ระดับความสูงของของเหลว สภาพแวดล้อมภายนอกกระบวนการเช่น การกัดกร่อน หรืออุณหภูมิ รอบข้าง รวมไปถึงสภาพความนำไฟฟ้าของของเหลวที่ต้องการตรวจวัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ จำเป็นต้องพิจารณาถึงเมื่อคอนดักแตนซ์โพรบไปใช้งาน และสิ่งสำคัญที่สุดก็คือ หากของเหลวที่ ตรวจสอบมีคุณสมบัติเป็นสารจำพวกไวไฟแล้ว การใช้งานคอนดักแตนซ์โพรบจึงควรมีฝาปิด มิดชิดเพื่อป้องกันประกายไฟอันเกิดจากการต่อวงจรของหน้าสัมผัส

คาปาซิแตนซ์โพรบคือเซนเซอร์อีกแบบหนึ่งที่น่าเอาหลักการทำงานพื้นฐานของ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดระดับของของเหลวในถังบรรจุ ทั่วไปพบว่านิยมใช้ ในการวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องบิน สำหรับคาปาซิเตอร์โพรบนี้ประกอบด้วยท่อตัวนำ

ทรงกระบอก 2 ท่อวางสอดซ้อนกันทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าดังแสดงรูปที่ 2-5 เห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของระดับของเหลวในถัง โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ผลจากการแปรค่าความจุไฟฟ้านี้เองสามารถนำไปสร้างให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์แสดงผล หรือเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมระบบได้



รูปที่ 2-5 ทรงแวนสคิวเซอร์วัดระดับแบบการเก็บประจุ [16]

2.2 หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า

การหาค่าความจุไฟฟ้าอย่างง่ายสามารถหาได้จากแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่นมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกกั้นกลางอยู่ ดังรูปที่ 2-6 สามารถคำนวณหาได้จากสมการของตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนานได้ คือ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2-1)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่า permittivity of free space มีเท่ากับ 8.85 (pF/m)

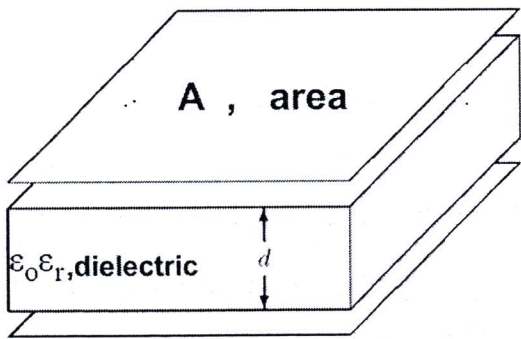
ϵ_r คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะ (ตารางเมตร)

d คือ ระยะห่างน้อยที่สุดของช่องว่าง (เมตร)

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ° C) [11]

วัสดุ(Material)	ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant : ϵ_r)
Air	1.00054
Alumina ceramic	8-10
Benzene	2.28
Carbon tetrachloride	2.23
Paper	3.5
Polyvinyl chloride	4.55
Paraffin	2.0-2.5
Methanol	32.63
Nylon	3.5-5.4
Pyrex Glass(7070)	4.0
Rubber(silicone)	3.2
Teflon	2.04
Vacuum	1.0
Water	78.5



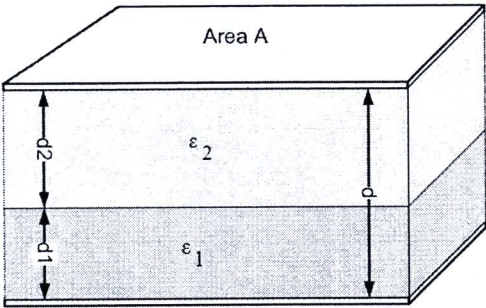
รูปที่ 2-6 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนาน

สำหรับกรณีมีไดอิเล็กตริกหลายชนิดกั้นกลางอยู่ในระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเสมือนว่ามีค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากไดอิเล็กตริกต่างชนิดที่ ต่อแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2-7 เมื่อมีไดอิเล็กตริก 2 ชนิดกั้นกลางระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า โดยมี



ไดอิเล็กตริกตัวแรก ϵ_1 มีความหนาเป็น d_1 ส่วนไดอิเล็กตริกตัวที่สอง ϵ_2 มีความหนาเป็น d_2 เมื่อความหนาทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความหนา d ของไดอิเล็กตริกแต่ละชั้น สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ

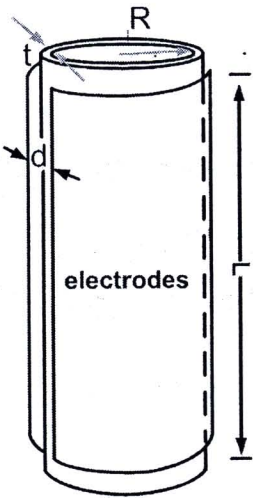
$$C = \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1 A} + \frac{d_2}{\epsilon_2 A}} \tag{2-2}$$



รูปที่ 2-7 กรณีมีไดอิเล็กตริกกั้นกลาง 2 ตัว

2.3 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ลักษณะของเซนเซอร์สำหรับวัดระดับของเหลวที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 2-8 โดยรูปแบบของเซนเซอร์มีท่อทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน คือ Polyvinyl chloride(PVC) , เทฟลอน เป็นต้น สำหรับแผ่นอิเล็กโตรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกจะทำจากอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อทรงกระบอก



รูปที่ 2-8 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์

2.3.1 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีที่โครงสร้างเซนเซอร์เมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริก แต่แผ่นกึ่งทรงกระบอกสำหรับติดแผ่นโลหะมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นโลหะเท่ากับ t ดังนั้นจากมุมมองด้านบนของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริกดังแสดงรูปที่ 2-9 a โดยที่แผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอกจะมีรัศมีเท่ากับ R และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ d ดังนั้นในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกจะประยุกต์โดยใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [17] โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังแสดงรูปที่ 2-9 b โดยแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน n แผ่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น Δd สมการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็กๆมีระยะห่างกันประมาณ d และพื้นที่เล็กๆ A แสดงได้ดังสมการที่ (2-3)

$$C = \int_0^a dc = \int_0^a \frac{\epsilon_0 \times a \times dx}{d + x\theta}$$

$$= \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_1 \times A}{d} \left[1 - \frac{a\theta}{d} \right] \quad (2-3)$$

ถ้าคิดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีขนาดใหญ่มาก ($d \gg \theta$) ความจุไฟฟ้าในสมการที่(2-3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

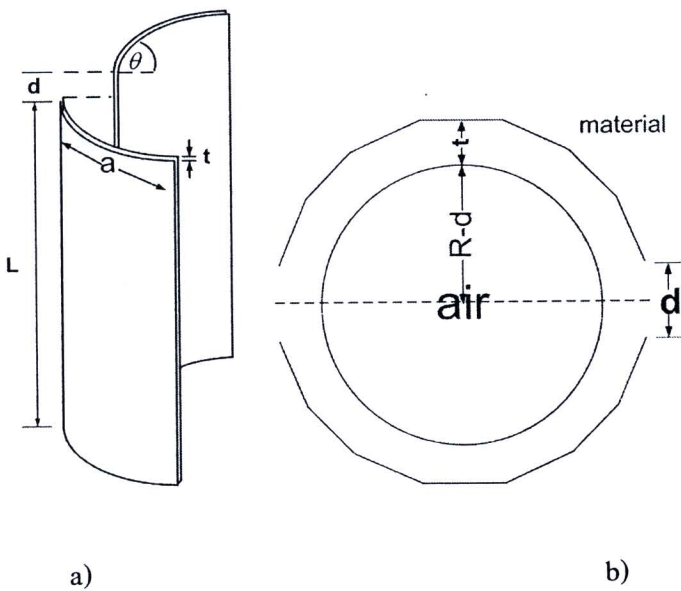
$$C = \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A}{d} \right] \quad (2-4)$$

ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่าง d ของแผ่นโลหะทั้งสองที่น้อยที่สุดจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการใช้ในการคำนวณวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

สำหรับแผ่นคู่ขนานเล็กๆสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตำแหน่ง A และ B ที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ทำท่อ และค่าไดอิเล็กตริกภายในท่อซึ่งในที่นี้คือ อากาศ แสดงในรูปวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่ต่อกันตามกันดังที่แสดงในรูปที่ 2-10 โดยใช้สมการที่ (4) สามารถหาผลรวมของความจุไฟฟ้าจากแผ่น

คู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอกจำนวน n แผ่นเล็กๆที่แสดงในรูปวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้าดัง
ในรูปที่ 2- 11 ได้เป็น

$$C_1 = \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_m} \right) \tag{2-5}$$



รูปที่ 2-9 โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก
a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ
b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าส่วนของขอบ คือ

$$C_{m_1}, C_{m_2}, \dots, C_{m_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{t}, C_{m_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{2t} \tag{2-6}$$

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าส่วนของอากาศ คือ

$$C_{air_1}, C_{air_2}, \dots, C_{air_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}}, C_{air_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a A}{2(R - t)} \tag{2-7}$$

โดยที่ค่าพื้นที่หน้าตัดและระยะห่างที่เพิ่มขึ้น $(A, \Delta d)$ สามารถหาได้จาก

$$A = aL = \left(\frac{\pi R - d}{n} \right) L \text{ และ } \Delta d = \left(\frac{2R - d}{2n} \right)$$

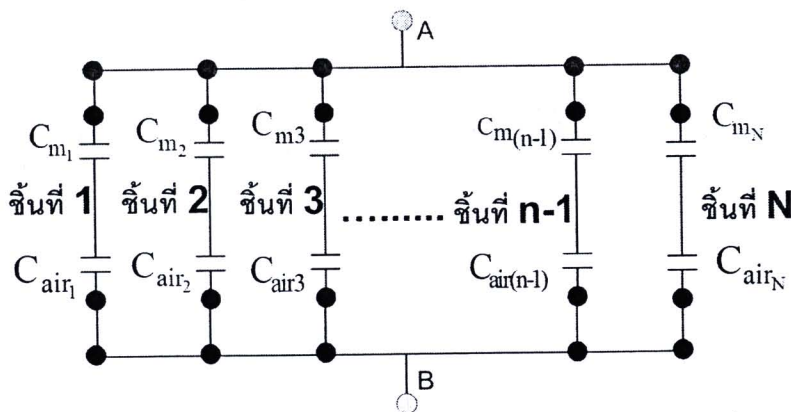
เขียนสมการที่ (2-5) ได้ใหม่

$$C_1 = \epsilon_0 \left(\frac{\pi R - d}{N} \right) (L - h) \left(2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_{\text{air}}}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_{\text{air}}}} \right) \quad (2-8)$$

จากสมการพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าระยะห่างของแผ่นโลหะมีค่าคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความสูงของเซนเซอร์



รูปที่ 2-10 วงจรของค่าความจุไฟฟ้าเล็กๆสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก



รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก

2.3.2 กรณีมีไดอิเล็กทริกเป็นอากาศกับของเหลว

โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ดังรูปที่ 2-12 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์จะแบ่งเป็นความจุไฟฟ้าที่ได้จากของเหลวรวมกับความจุไฟฟ้าที่เป็นอากาศ นั่นคือ ความจุไฟฟ้าของทั้งสองต่อกันแบบขนาน โครงสร้างสำหรับใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังแสดงรูปที่ 2-13 และแสดงการต่อกันดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 2-14 โดยกรณีไดอิเล็กทริกเป็นของอากาศจะมีขนาดความสูงเท่ากับ $L-h$ และส่วนไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลวมีขนาดความสูงเป็น h สามารถคำนวณหาความจุไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$C = \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{1}{C_w} + \frac{1}{C_m} \right) + \left(\frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_m} \right) \right] \tag{2-9}$$

เมื่อความจุไฟฟ้าในส่วนของเหลว คือ

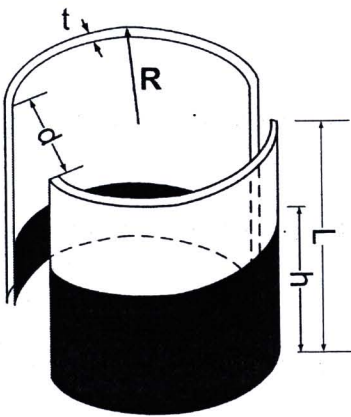
$$C_{w_1}, C_{w_2}, \dots, C_{w_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}} \quad , \quad C_{w_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w A}{2(R-t)} \tag{2-10}$$

เขียนสมการในส่วนของความจุไฟฟ้าของเหลวกับวัสดุได้เป็น

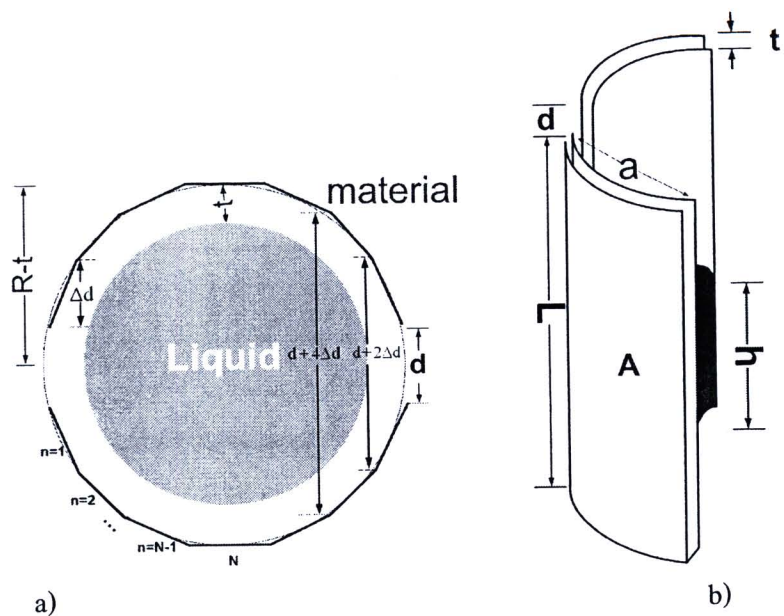
$$C_2 = \epsilon_0 \left(\frac{\pi R - d}{N} \right) (h) \left(2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{\frac{t}{\epsilon_m} + \frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_w}} \right) \tag{2-11}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการที่(9) ได้ดังนี้

$$C = C_1 + C_2 \tag{2-12}$$



รูปที่ 2- 12 โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีมีของเหลว

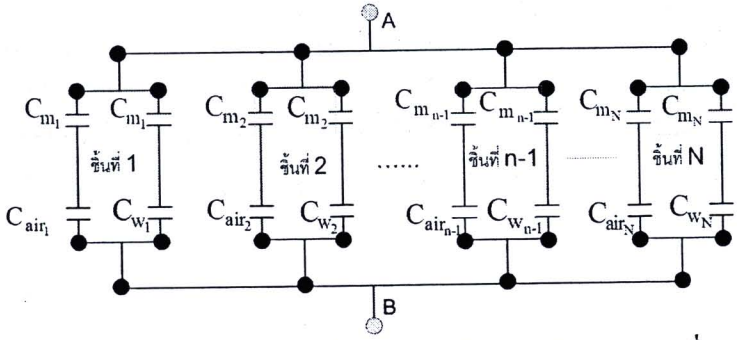


รูปที่ 2-13 โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์กรณีมีน้ำและอากาศเป็นไดอิเล็กตริก

a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ

b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น

- เมื่อ ϵ_0 คือ ค่า permittivity of free space มีค่าเท่ากับ $8.85\text{pF} / \text{m}$
- ϵ_m คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุ
- ϵ_{air} คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ
- ϵ_w คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดของเหลว
- n คือ จำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยที่ใช้ในการคำนวณ(ชั้น)
- d คือ ค่าช่องว่างน้อยที่สุดระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง(เมตร)
- Δd คือ ค่าระยะห่างที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง



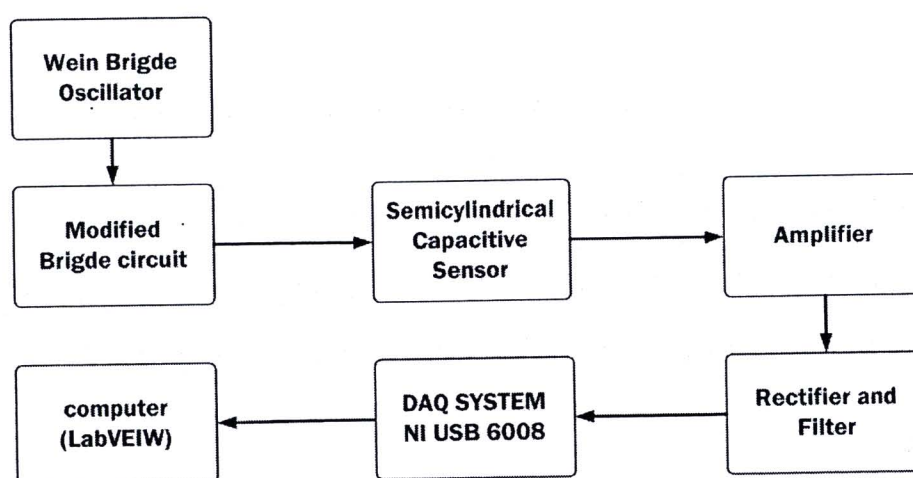
รูปที่ 2-14 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก

เมื่อใช้วัดระดับน้ำ

2.4 การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

สำหรับวงจรที่ใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้าอาศัยเทคนิคในการตรวจวัดได้หลายลักษณะ [11] เช่น การแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ เทคนิควงจร single ended เทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เทคนิคการวัดค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) [18] การใช้เทคนิค Switching Capacitor ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน [19,20] การใช้เทคนิค Synchronous demodulation สำหรับสัญญาณที่นำเข้าเทียบกับสัญญาณอ้างอิง [21] และการตรวจวัดด้วยวงจรบริดจ์แบบสมดุลอัตโนมัติ [22,23] ซึ่งเป็นวงจรที่ซับซ้อน สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรตรวจวัดความจุไฟฟ้าที่ใช้หลักการพื้นฐานของวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน (wheatstone bridge circuit) ซึ่งมีรูปแบบวงจรที่ง่าย และไม่ซับซ้อน แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง อีกทั้งความผิดพลาดในการทดลองเนื่องจากความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) จะมีค่าน้อยที่สุด

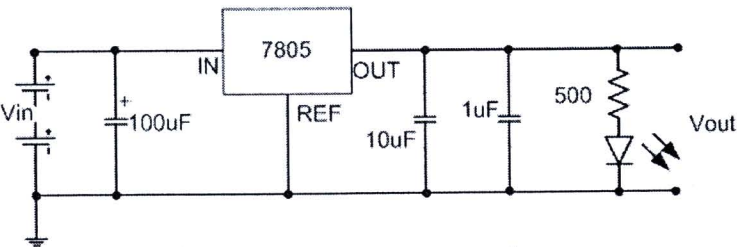
สำหรับการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณได้ประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ พร้อมวงจรขยายมาใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาวัดระดับของเหลว โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับวงจรบริดจ์ด้วยความถี่คงที่ที่อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ เมื่อทำการแปลงสัญญาณขาออกจากวงจรบริดจ์ที่มีขนาดเล็กไปเป็นสัญญาณขาออกขนาดใหญ่ด้วยออปแอมป์ ระดับสัญญาณที่ได้จะแปลงไปเป็นระดับสัญญาณกระแสตรงด้วยวงจรกรองเรียงกระแส (Rectifier and filter) จากนั้นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกส่งไปยังช่องขาเข้าของระบบ DAQ ที่เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลต่อไป ดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบการทำงานของเซนเซอร์

2.4.1 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ

เมื่อทำการจ่ายแรงดันขนาด 9 โวลต์ จากแบตเตอรี่ให้ไอซี 7805 เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไอซี LM 324 ของวงจรบริดจ์ และไอซีเบอร์ LM358 สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 2-16

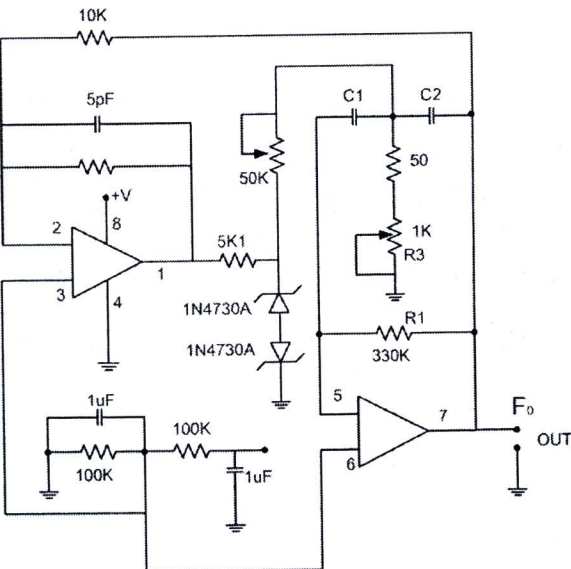


รูปที่ 2-16 วงจรแหล่งจ่ายไฟคงที่ 5 โวลต์

2.4.2 วงจรออสซิลเลเตอร์

สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์ได้ใช้ไอซีเบอร์LM358 ดังรูปที่ 2-17 สำหรับสร้างรูปคลื่นไซน์โดยค่าความถี่ (f_0) ที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้านทาน R_1 และ R_3 และความจุไฟฟ้า C_1 ดังสมการที่ (2-13)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C_1 \sqrt{R_3 R_1}} \tag{2-13}$$



รูปที่ 2-17 วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์

2.4.3 การประยุกต์วงจรบริดจ์

เมื่อนำวงจรบริดจ์ มาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้วัดระดับของเหลว ดังรูปที่ 2-18 โดยในกรณีที่วงจรบริดจ์ไม่สมดุลจะสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรที่จุด B และจุด D โดยให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้า V ความถี่ f เข้าที่ออปแอมป์ A_1 และ A_2 โดยที่มีแรงดันออกเท่ากับ V' และ V'_0 ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแขนสาขาของวงจรบริดจ์ AB, BC, CD และ DA ค่าเท่ากับ

$$I_1 = \frac{V}{Z_1}, I_2 = \frac{V}{Z_0 + \Delta Z}, I_3 = \frac{V' - V}{Z_3}, I_4 = \frac{V' - V}{Z_4} \quad (2-14)$$

และกระแสที่ไหลย้อนกลับของวงจรออปแอมป์ A_2 มีค่าเท่ากับ

$$I_o = \frac{V'_0 - V}{R_f} \quad (2-15)$$

สำหรับที่จุด D และจุด B เมื่อนำกฎของเคอร์ชอฟมาใช้จะได้

$$I_f + I_4 = I_2 \quad (2-16)$$

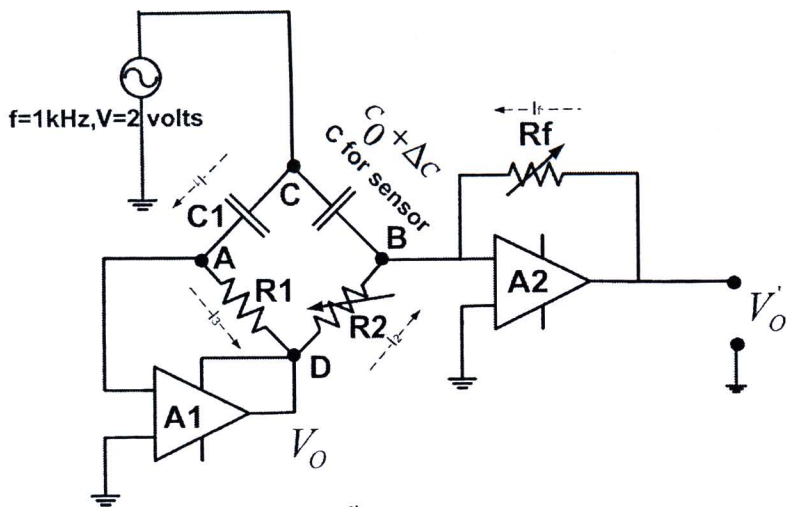
$$I_3 = I_1 \quad (2-17)$$

สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ออปแอมป์ A_2 ได้เท่ากับ

$$V'_0 = V \left(1 + \frac{R_f (Z_4 Z_1 - Z_3 Z_0 - Z_3 \Delta Z)}{Z_1 Z_4 (Z_0 + \Delta Z)} \right) \quad (2-18)$$

สำหรับที่บริดจ์สมดุลเขียนสมการใหม่ได้

$$V'_0 = V \left(1 - \frac{R_f (Z_3 \Delta Z)}{Z_1 Z_4 (Z_0 + \Delta Z)} \right) \quad (2-19)$$



รูปที่ 2-18 รูปแบบวงจรพื้นฐานที่ใช้กับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้า

2.4.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อนำเซนเซอร์มาต่อลงในวงจรในกรณีที่ยังไม่ได้วัดระดับของเหลวค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ C_0 นั่นคือวงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุดได้จากสมการ

$$C_0 = \frac{R_2 C}{R_1} \tag{2-20}$$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละตัวได้ดังนี้

$$Z_1 = \frac{1}{j2\pi f C}, Z_3 = R_1, Z_0 + \Delta Z = \frac{1}{j2\pi f (C_0 + \Delta C)} \text{ และ } Z_4 = R_2 \tag{2-21}$$

นำไปแทนในสมการ(2-19) จะได้แรงดันไฟฟ้าออกเท่ากับ

$$V'_O = j2\pi f R_f V \Delta C \tag{2-22}$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เข้ากับวงจรบริดจ์เป็น AC สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ในรูป $V = V_m \sin 2\pi f t$ ดังนั้นสามารถเขียนค่าของ V'_O ใหม่ได้ดังนี้

$$V'_O = 2\pi f R_f V \Delta C \tag{2-23}$$

เมื่อระดับของของเหลวในเซนเซอร์มีความสูงเท่ากับ h ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปจาก C_0 ไปเท่ากับ $C_0 + \Delta C$ แต่สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์หาได้จากสมการ (2-8) ดังนั้นจากสมการทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้นของเซนเซอร์ C_0 และค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ΔC ดังนี้

$$C_0 = Lk_1 \text{ และ } \Delta C = (k_2 - k_1)h \quad (2-24)$$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและค่าแรงดันได้

$$V'_O = 2\pi f R_f V(k_2 - k_1)h \quad (2-25)$$

เมื่อกำหนดให้ $k_3 = 2\pi f R_f V$
เขียนสมการใหม่ได้

$$\Delta V = k_3 h \quad (2-26)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรบริดจ์กับความสูงของระดับของเหลวอยู่ในรูปเชิงเส้น

2.4.5 วัดค่าความจุไฟฟ้าของชนิดของเหลวที่แตกต่างกัน

นำวงจรจากรูปที่ 2-18 ประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้วัดระดับของเหลวเมื่อของเหลวที่ต่างชนิดกัน ดังรูปที่ 2-19 โดยทำแผ่นโลหะแบบกึ่งทรงกระบอกเพิ่มในเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าให้ห่างจากเซนเซอร์เป็นระยะ 0.01 เมตร หลักการเพื่อใช้วัดเป็นตัวเปรียบเทียบวัดระดับของเหลวเมื่อเป็นของเหลวที่ต่างชนิดกัน โดยชุดล่างจมอยู่ใต้ระดับของเหลวตลอดเพื่อใช้วัดความจุไฟฟ้าอ้างอิงของของเหลว C_R ซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า V_{IO} และชุดบนใช้วัดความจุไฟฟ้าของของเหลว C_S เมื่อระดับของของเหลวเปลี่ยนแปลงซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า V_{2O} โดยมีวงจรขยายสัญญาณผลต่างเพื่อหาค่าผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้า V_{2O} และ V_{IO} ซึ่งจะได้ผลต่างของค่าแรงดันไฟฟ้าออก (ΔV) ของชุดอิเล็กทรอนิกส์กึ่งทรงกระบอกทั้ง 2 ชุด ยังมีค่าเท่าเดิม เมื่อนำไปวัดของเหลวต่างชนิดกันที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างกัน สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกโดยการประยุกต์สมการ (2-23) เขียนสมการดังนี้

$$\Delta V = V_{2O} - V_{1O} \quad (2-27)$$

โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผ่นโลหะชุดบน คือ

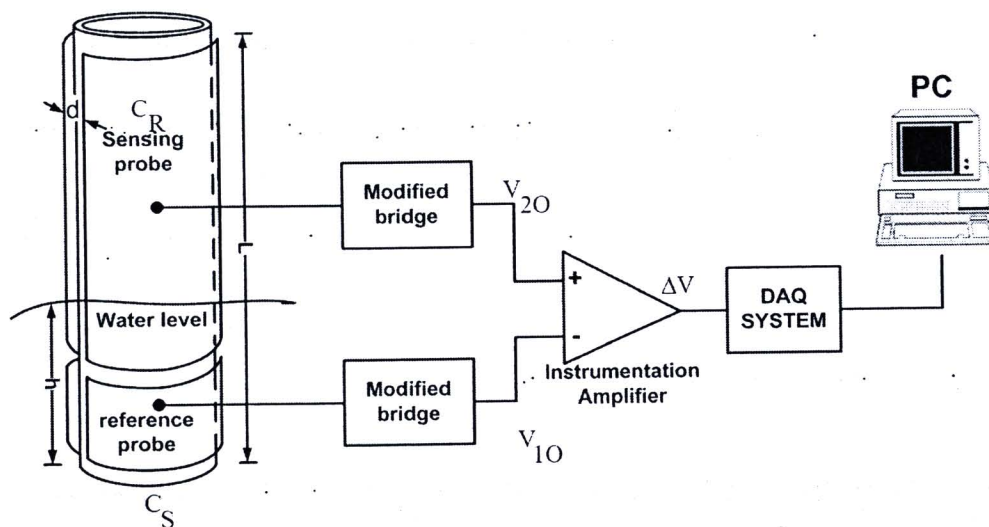
$$V_{2O} = 2\pi f R_f V C_R \quad (2-28)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าของแผ่นโลหะชุดล่างสำหรับอ้างอิง คือ

$$V_{1O} = 2\pi f R_f V C_S \quad (2-29)$$

ดังนั้นเขียนสมการ (27)

$$\Delta V = 2\pi f R_f V (C_R - C_S) \quad (2-30)$$



รูปที่ 2-19 รูปแบบการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดของเหลวที่ต่างชนิดกัน

หลักการของการสร้างเซนเซอร์

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาเทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการการวัดค่าความจุไฟฟ้า ได้สร้างและออกแบบเซนเซอร์ให้มีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน และมีอิเล็กโทรดเป็นแผ่นกึ่งรูปทรงกระบอกทำจากตัวนำไฟฟ้า สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า ศึกษาทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับ

ของเหลวที่เปลี่ยนแปลงและระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A

จากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้การประยุกต์วงจรบริดจ์และศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ที่อาจส่งผลต่อการตรวจวัด ศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าผ่าน NI-USB-6008 แสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW