

การประยุกต์ใช้คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สำหรับการวัดช่วงปริมาณจุลินทรีย์ในนมยูเอชที

APPLICATION OF CAPACITIVE SENSOR FOR MICROORGANISM

MEASUREMENT IN U.H.T. MILK



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62385
วัน,เดือน,ปี...16 ส.ค. 2549

b..... 116220411
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สำหรับการวัดช่วงปริมาณจุลินทรีย์ในนมยูเอชที

APPLICATION OF CAPACITIVE SENSOR FOR MICROORGANISM

MEASUREMENT IN U.H.T. MILK



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สำหรับการวัดช่วงปริมาณจุลินทรีย์ในนมยูเอชที
APPLICATION OF CAPACITIVE SENSOR FOR MICROORGANISM MEASUREMENT
IN U.H.T. MILK

ผู้จัดทำ นาย ปรีชาพันธ์ สุภาพาส
นาย พิชญกรณ์ นิลสระคู



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. คงศักดิ์ อนันตหิรัญรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สำหรับการวัดช่วงปริมาณจุลินทรีย์ในนมยูเอชที

โดย

นาย ปรีชาพันธ์ สุภาพาส รหัสประจำตัวนักศึกษา 45010452

นาย พิษณุกรณ์ นิลสระคู รหัสประจำตัวนักศึกษา 45010549

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.คงศักดิ์ อนันตศิริวัฒน์

บทคัดย่อ

การที่จะทำการวัดปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารมีวิธีการวัดอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ โดยปกติจะใช้วิธีการสุ่มจากอาหารตัวอย่างแล้วนำไปตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ ถึงแม้จะมีความแม่นยำ แต่ก็มีความซับซ้อนและต้องใช้เวลาในการตรวจสอบ โดยวิธีการวัดค่าความนำไฟฟ้าก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งจะให้ผลการตรวจสอบที่รวดเร็วและสะดวกกว่า วิธีนี้จะใช้หลักการวัดค่าความนำไฟฟ้าที่เกิดจากค่าไดอิเล็กทริกของสารที่เป็นตัวกลางระหว่างแผ่นโลหะตัวนำโดยสารตัวกลางเหล่านี้จะมีค่าไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันเมื่อคุณสมบัติของสารตัวกลางเปลี่ยน โครงงานนี้จะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ในนมยูเอชที ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมเปลี่ยนโดยใช้หลักการเซ็นเซอร์ค่าความจุ ซึ่งจะทำการตรวจสอบนมในแบบขวดพลาสติก ในการทดลองจะทำการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์จากค่าที่กำหนดขึ้นที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนม ค่าที่วัดได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าจริง จากหลักการนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมให้มีค่าที่ละเอียดมากขึ้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF CAPACITIVE SENSOR FOR MICROORGANISM MEASUREMENT IN U.H.T. MILK

By

Mr. Preechapan Supapas 45010452
Mr. Pitsanukorn Nilsakoo 45010549

Adviser

Kongsak Anuntahiranrat

ABSTRACT

There are many procedures to measure a quantity of micro-organism in food. One of conventional methods is random the samples of the food to test micro-organism in laboratory. This method is more accuracy but complicated and most time. In another way, the conductive measurement will make it faster and more conveniently. This conductive measured method generates the dielectric value of mass between the electrodes and this value is varied when the qualification of mass has changed. The goal of this project was to measure the changes in amount of micro-organism in U.H.T milk which make the equivalent impedance of milk converted by using the capacitive sensor detected milk in the plastic bottles. In the experiment, we measured the value of fixed impedance that closed to the equivalent impedance of tested milk and this value had been compared with the true value. Further more, the improvement for more sensitive milk impedance measurement could be done for increasing the accuracy of microbial detection.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูง จาก ผศ. ดร. กงศักดิ์ อนันตศิริวัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและยังคอยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปการะที่จำเป็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และ ดร.ปรเมษฐ์ ประณยานันท์ ที่ได้ให้ความรู้ ตลอดจนแง่คิดที่น่าสนใจ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ สุธรรม สุภาพาส และ คุณแม่ ประทีป สุภาพาส ที่ได้ให้ความสนับสนุน ให้โอกาสผู้จัดทำได้ศึกษาเล่าเรียนมาจนถึงทุกวันนี้ และคอยเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมา จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้จัดทำ

นาย วิชาพันธ์ สุภาพาส

นาย พิษณุกรณ์ นิลสระคู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ.....	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่บ่งชี้ถึงปริมาณจุลินทรีย์.....	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ที่ใช้ตรวจสอบกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย.....	3
2.3 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) เมื่อเทียบกับค่าคอนดักแตนซ์ (Conductance)	
2.3.1 การคัดเลือกของการเปลี่ยนแปลงในช่วงต้นของกระบวนการเจริญเติบโต.....	6
2.3.2 กระบวนการของการเปลี่ยนแปลงที่พอสังเกตพบหลังวัฏจักรการเจริญเติบโต.....	7
2.4 หลักการคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)	
2.4.1 ประจุและสนาม (Charge and Fields).....	8
2.4.2 การนำและการเคลื่อนที่ของกระแส.....	10
2.4.3 พื้นฐานของคาปาซิทีปเซ็นเซอร์.....	11
2.4.4 เปรียบเทียบวงจร.....	12
2.4.5 ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกของอากาศ.....	14
2.4.6 การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance).....	14
2.5 การวัดค่าสมมูลทางไฟฟ้าของกล่องบรรจุอาหาร	
2.5.1 การทดสอบกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ (TBA-Tetra Brik Aseptic).....	17
2.5.2 การทดสอบกล่องบรรจุอาหารแบบขวดพลาสติก.....	21
2.5.3 การทดลองกับกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ.....	22
2.5.4 การทดลองกับกล่องบรรจุอาหารแบบขวดพลาสติก.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบวงจร	
3.1 แนวคิดในการออกแบบ.....	25
3.2 การศึกษาออกแบบวงจรที่ใช้ตรวจจับสัญญาณเอาร์ทพุท	
3.2.1 วงจรตรวจจับค่ายอด (Peak Detector)	26
3.2.2 วงจรแปลงสัญญาณ ไซน์เป็นสี่เหลี่ยม.....	28
3.2.3 วงจรตรวจจับเฟส (Phase Detector).....	32
3.3 การนำสัญญาณเอาร์ทพุทที่ตรวจจับได้มาประมวลผล	
3.3.1 สัญญาณจากวงจรตรวจจับค่ายอด.....	35
3.3.2 สัญญาณจากวงจรตรวจจับเฟส.....	35
3.3.3 หลักการทำงานของโปรแกรมเพื่อหาค่า R และ C.....	36
3.4 การทำงานของวงจรรวมทั้งหมด.....	38
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter).....	40
4.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขนาน.....	42
4.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter).....	48
4.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขนาน.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง	57
ภาคผนวก	
ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ ที่ความถี่ 10 kHz $R_f = 100 \Omega$	59
เอกสารอ้างอิง	66

สารบัญภาพ

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าคอนดักแตนซ์ G_s ในเวลาหลังการเพาะเชื้อด้วยอาหารเหลว เลี้ยงเชื้อกับเชื้อ E.coli (8×10^5 cfu ml ⁻¹) จุดหักของเส้นซึ่ง KG_s/k คือ $1pS$ (cfu ml ⁻¹) ⁻¹	4
รูปที่ 2.2 ผลกระทบของค่าคอนดักแตนซ์ต่อคร่อม ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตของ แบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อเริ่มแรก.....	4
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าคอนดักแตนซ์ δG_s กับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของ ประชากร $n-n_0$ ของ E. coli ใน CM1 broth ที่ 37 °C.....	5
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าคอนดักแตนซ์ G_s (o) และคาปาซิแตนซ์ (x) ในช่วงต้นของการ เจริญเติบโตของ E.coli ในอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อ (a), (b) ที่ความถี่ 2kHz (c) , (d) ที่ความถี่ 10kHz.....	6
รูปที่ 2.5 ผลของการเจริญเติบโตของ E.coli ใน brain heart infusion ต่อค่าคาปาซิแตนซ์ C_{sc} , คอนดักแตนซ์ G_s , จำนวน N ของแบคทีเรียและการขยายของแก๊ส (Gas).....	8
รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าของประจุที่กระทำต่อแผ่นเพลตตัวนำคู่ขนาน.....	9
รูปที่ 2.7 การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์เบื้องต้น.....	11
รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาปาซิแตนซ์.....	12
รูปที่ 2.9 การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ของแผ่นเพลตตัวนำแบบขนาน.....	14
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของกล่องบรรจุแบบทีบีเอ (TBA) และ แบบพลาสติก.....	16
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะภายในและภายนอกของกล่องแบบทีบีเอ (TBA) ที่ได้ใส่ฉีฟที่นำไฟฟ้า ไว้.....	17
รูปที่ 2.12 ภาพตัดของกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ (TBA) แสดงเส้นแรงไฟฟ้าและบริเวณที่ สนามไฟฟ้า แผ่ไปถึงเมื่อจ่ายแรงดันให้กับแผ่นอิเล็กโทรดเล็ก โดยให้ผนังของกล่อง และแผ่น อะลูมิเนียมมีขนาดคงที่.....	17
รูปที่ 2.13 แสดงภาพตัดของแผ่นอิเล็กโทรดเล็กที่ฝังอยู่ในกล่องบรรจุเพื่อป้องกันการสัมผัสกับ อาหาร.....	18
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรไฟฟ้าเสมือนของการวัดค่าอิมพีแดนซ์.....	18
รูปที่ 2.15 แสดงการกระจายความหนาแน่นของกระแสในกล่องกระดาษแบบทีบีเอ (TBA).....	19
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรเสมือนของการวัดค่าอิมพีแดนซ์จากรูปที่ 2.15.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 การทดสอบอาหารแบบใช้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรคประเภทขดลวดพลาสติกภายนอก เพื่อเป็นการไม่ทำลายอาหาร.....	21
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของวงจรสมมูลไฟฟ้า ที่วัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ สองแผ่น จากรูปที่ 2.17.....	21
รูปที่ 2.19 แสดงค่าความถี่ที่มีผลต่อค่า R_{Σ} และ C_{Σ} และ $\phi_{\Sigma} = \arctan(-1/R_{\Sigma}C_{\Sigma})$ ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ Z_{Σ} เพื่อกล่องบรรจุน้ำภายใน.....	23
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบวงจร	
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ ค่า R และ C.....	25
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบสัญญาณ V_i กับ V_o	26
รูปที่ 3.3 (a) วงจรพิกัดเทคเตอร์ (b) สัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (c) สัญญาณเอาต์พุต.....	27
รูปที่ 3.4 (a) สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับอินพุต โดยใช้ C 0.1 uF (b) สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับอินพุต โดยใช้ C 1 uF.....	28
รูปที่ 3.5 วงจรคอมพาราเตอร์โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM311.....	29
รูปที่ 3.6 รูปของสัญญาณไซน์แปลงเป็นสี่เหลี่ยมโดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 (a) ที่ความถี่ 1 kHz (b) ที่ความถี่ 10 kHz (c) ที่ความถี่ 50 kHz (d) ที่ความถี่ 100 kHz.....	29-30
รูปที่ 3.7 รูปของสัญญาณไซน์แปลงเป็นสี่เหลี่ยมโดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM 311 (a) ที่ความถี่ 1 kHz (b) ที่ความถี่ 10 kHz (c) ที่ความถี่ 100 kHz (d) ที่ความถี่ 500 kHz (e) ที่ความถี่ 1.0 MHz.....	30-31
รูปที่ 3.8 (a) Exclusive – OR Phase Detector (b) สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต (c) แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยเปรียบเทียบกับความต่างเฟสระหว่าง f_{in1} กับ f_{in2} (d) สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน (e), (f) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเอกซ์คลูซีฟออร์เฟสดีเทคเตอร์.....	32-33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ตามการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 (a) R-S Flip-Flop โดยใช้ NOR Gate CD4001	
(b) เอาท์พุทที่เกิดจากความต่างเฟสของสอง อินพุท	
(c) ค่าคิซีเอาท์พุทโวลต์เดจที่แปรผันตามมุมเฟสของ f_{in1} กับ f_{in2}	34
รูปที่ 3.10 การแสดงผลการคำนวณค่า R C ที่ไม่ทราบค่าทางเอลซีดี โมดูล.....	37
รูปที่ 3.11 แผนผังการทำงานของ ไมโครคอนโทรเลอร์.....	37
รูปที่ 3.12 รายละเอียดการทำงานของวงจรทั้งหมดโดย V_i กับ V_o มาจากวงจรรูปที่ 3.2 หรือ รูปที่ 3.3.....	38
รูปที่ 3.13 แสดงรูปรวมวงจรทั้งหมด.....	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่าแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน อย่างง่าย.....	40
รูปที่ 4.2 แสดงโบคพล็อต (Bode Plot) ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu F$	41
รูปที่ 4.3 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 200 \mu F$	42
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่า แบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยคิค $C_{PROPE} = 25 \mu F$ ต่อขนาน.....	42
รูปที่ 4.5 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยคิค $C_{PROPE} = 25 \mu F$ ต่อขนาน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu F$	43
รูปที่ 4.6 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยคิค $C_{PROPE} = 25 \mu F$ ต่อขนาน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 200 \mu F$	44
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่าแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน อย่างง่าย.....	45
รูปที่ 4.8 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu F$	47
รูปที่ 4.9 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 200 \mu F$	48
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่า แบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิค $C_{PROPE} = 25 \mu F$ ต่อขนาน.....	48
รูปที่ 4.11 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิค $C_{PROPE} = 25 \mu F$ ต่อขนาน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu F$	49
รูปที่ 4.12 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิค $C_{PROPE} = 25 \mu F$ ต่อขนาน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 200 \mu F$	50

รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่าแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขนาน.....	50
รูปที่ 4.14 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขนาน เมื่อ $R_s = R_f = 100\ \Omega$, $C_{se} = 10\ \mu\text{F}$	51
รูปที่ 4.15 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขนาน เมื่อ $R_s = R_f = 100\ \Omega$, $C_{se} = 200\ \text{pF}$	52
รูปที่ 4.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ของ C_{se} และ R_s เมื่อทดลองเปลี่ยนค่า C_s โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ $R_s = 100\ \Omega$	53
รูปที่ 4.17 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ของ C_{se} และ R_s เมื่อทดลองเปลี่ยนค่า C_s โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ เมื่อเปลี่ยนค่า R_s	55
รูปที่ 4.18 แสดงผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรแบบกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่วัดจากนมิยูเอชที.....	56

สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันคาปาซิแตนซ์ (Polarization Capacitance) C_{sc} และค่าความนำของสารละลาย G_s เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์.....	17
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบวงจรที่ใช้ตรวจวัดค่าคาปาซิแตนซ์: 0 คือ ดี, 5 คือ ไม่ดี.....	12
ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของฉนวนอากาศ.....	14
ตารางที่ 2.4 ค่าของ A, B และ C ที่ความถี่ต่างๆ.....	22
ตารางที่ 2.5 แสดงผลของค่าความต้านทาน R_c ของวัดค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดได้.....	24
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณค่า C_{se} และ R_s ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ $R_s = 100 \Omega$	44-45
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณค่า C_{se} และ R_s ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า R_s	45-47
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรแบบกรองความถี่สูงผ่าน จากนมยูเอชที.....	47-48
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณค่า C_{se} และ R_s ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อ $R_s = 100 \Omega$	52
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณค่า C_{se} และ R_s ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า R_s	53-55
ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่วัดจากนมยูเอชที.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในอุตสาหกรรมอาหารการทำการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในอาหารหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆแล้ว นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากว่าผลิตภัณฑ์ที่จะจำหน่ายให้ผู้บริโภคนั้นต้องมีความสะอาดและปลอดภัยเพียงพอ ที่จะทำการจัดจำหน่ายได้

การจะตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ในอาหาร มีเทคนิคและวิธีการหลายๆอย่างตามแต่ชนิดและลักษณะของอาหารที่จะทำการตรวจสอบ ดังนั้นการจะทำการตรวจสอบจริงต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมกับอาหารชนิดนั้นๆ โดยในการเลือกวิธีตรวจสอบต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่างเปรียบเทียบกัน โดยทั่วไปแล้วจะใช้การตรวจสอบอาหารโดยการสุ่มตัวอย่าง คือการเก็บตัวอย่างอาหารจากสายการผลิตต่างๆ มาทำการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีการนี้จะให้ผลการตรวจสอบแน่นอนและแม่นยำ แต่ก็มีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการตรวจสอบนาน ยุ่งยาก และต้องใช้ตัวอย่างอาหารในการตรวจสอบ ซึ่งอาจจะไม่เหมาะกับการตรวจสอบในบางสายการผลิตที่ไม่ต้องการความแม่นยำมากแต่ต้องการความรวดเร็ว

ในการตรวจสอบเครื่องวัดที่เป็นของเหลวนั้นก็ยังมีวิธีการตรวจสอบหลายๆแบบซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะความเหมาะสม การสุ่มตรวจจากอาหารตัวอย่างก็เป็นวิธีตรวจสอบวิธีหนึ่ง ซึ่งจากข้อเสียของการตรวจสอบวิธีนี้ จึงทำให้มีการพัฒนาเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบอาหารที่ไม่ต้องสัมผัสกับเนื้ออาหาร โดยตรง วิธีการวัดค่าความนำไฟฟ้าก็เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้วัดคุณสมบัติของเนื้ออาหาร วิธีนี้จะใช้ขั้ว อิเล็กโทรดประกบกับบรรจุภัณฑ์ของอาหารเมื่อเนื้ออาหารเปลี่ยนคุณสมบัติไปก็จะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งเป็นหลักการของคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor) โดยจะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ของเนื้ออาหาร

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของโครงการนี้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบอาหาร โดยใช้เป็นแบบแผ่นอิเล็กโทรด (Electrode) ไม่ต้องสัมผัสกับเนื้ออาหาร โดยตรงเพื่อที่จะเป็นประโยชน์ในการนำไปพัฒนาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ในนมยูเอชที (U.H.T.) การศึกษาและทำการออกแบบคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ เพื่อทำการตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์สมมูลในนมยูเอชที นำไปเปรียบเทียบเป็นปริมาณจุลินทรีย์และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในขอบเขตของโครงการคือ การศึกษาคาปาซิทีปเซ็นเซอร์แบบแผ่นเพลตตัวนำแบบขนาน (Parallel Plate) ศึกษาและออกแบบวงจรในการตรวจจับสัญญาณจากคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ และทำการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมยูเอชที ที่ได้กำหนดขึ้น นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริง

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ

1.3.1 การจัดทำโครงการจะเริ่มต้นจากการศึกษาข้อมูลของคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ และศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ในสาร

1.3.2 ทำการศึกษา ออกแบบ และ ทดลองวงจรที่จะใช้ในการตรวจจับสัญญาณเอาท์พุทจากเซ็นเซอร์ โดยออกแบบวงจรที่จะใช้เป็นเซ็นเซอร์เบื้องต้น เพื่อวัดประสิทธิภาพของวงจรตรวจจับสัญญาณ

1.3.3 ศึกษาถึงวงจรสมมูลของนมยูเอชที ในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ศึกษาถึงวงจรสมมูลของนมยูเอชทีแบบขวดพลาสติก ที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลตโลหะตัวนำ และศึกษาถึงช่วงของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลนี้

1.3.4 ทำการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์จากค่าที่กำหนดขึ้น โดยกำหนดค่าให้ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมยูเอชที

1.3.5 นำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับค่าจริง และศึกษาถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น สรุปผล

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

เกือบ 100 ปี ที่ผ่านมาก็ได้มีการค้นพบว่าค่าความนำทางไฟฟ้าของสารละลายที่มีแบคทีเรียกำลังเจริญเติบโตนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำทางไฟฟ้า (Conductance) นั้นเป็นสัดส่วนกับผลรวมของแบคทีเรียที่ยังมีชีวิตอยู่ จากหลักการนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการที่ต้องการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ในสารละลาย ได้อย่างกว้างขวางโดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำทางไฟฟ้านี้เปรียบเทียบกับปริมาณจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลง

2.1 ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่บ่งชี้ถึงปริมาณจุลินทรีย์

ด้วยวิธีการวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance) การเพิ่มขึ้นของค่าคอนดักแตนซ์ (Conductance) คาปาซิแตนซ์ (Capacitance) หรือ แอดมิทแตนซ์ (Admittance) (ทั้งคอนดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์) สามารถวัดกระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในสารเลี้ยงเชื้อ การเพิ่มขึ้นของค่าคอนดักแตนซ์เนื่องจากผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ที่สร้างโดยจุลินทรีย์จากสารตั้งต้น และค่าคอนดักแตนซ์ที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้น ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เพิ่มขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้เมื่อสสารของสิ่งมีชีวิตสัมผัสกับอิเล็กโทรด ค่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นหลังจากวัฏจักรการเจริญเติบโต และ จากเซลล์ที่ไม่ตอบสนองหรือตายแล้ว ค่าคอนดักแตนซ์ที่เพิ่มขึ้นบ่งชี้ถึงปริมาณจุลินทรีย์ที่ตอบสนองอยู่ และสามารถสังเกตเห็นได้ในระยะเริ่มต้นของวัฏจักรการเจริญเติบโต

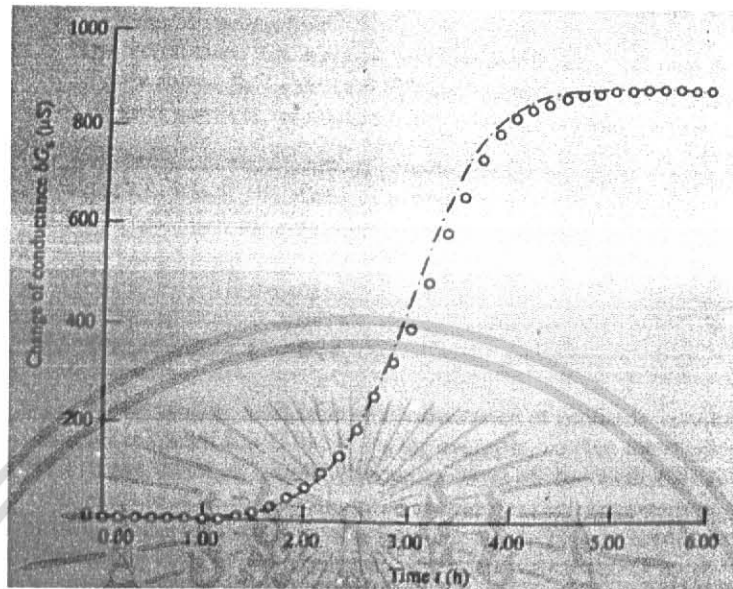
การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของสารเลี้ยงเชื้อที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมที่ไม่มีการเจริญเติบโตซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่า คาปาซิแตนซ์และ คอนดักแตนซ์ ได้

ความถี่ที่ทำการวัดก็จะมาผลต่อการเลือกวิธีการที่จะทำการวัดระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ และ คอนดักแตนซ์ ด้วย

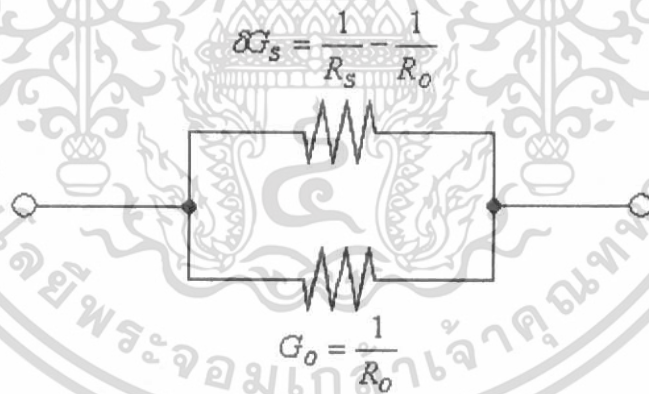
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ที่ใช้ตรวจสอบกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

หลังจากที่มีการเพาะเชื้อด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อตัวอย่าง ระยะเริ่มต้น ระยะแลทเฟส (Lag Phase) ซึ่งเป็นระยะที่มีกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์แต่จำนวนแบคทีเรียไม่เปลี่ยนแปลง และตรวจไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเชื้อที่กำลังมีการเจริญเติบโต ภายหลังจากที่มีการแบ่งตัวของเซลล์ มีการส่งผ่านที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เกิดขึ้น ไปในสารละลายและวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ขึ้น (รูปที่ 2.1) แบคทีเรียตัวหนึ่งจะให้ปริมาณไอออน (Ions) ที่จำกัดในแต่ละช่วงอายุการเริ่มมีไอออน ทำให้เพิ่มค่าคอนดักแตนซ์ (G_s) ของอาหารเลี้ยงเชื้อ และการเพิ่มของ δG_s เป็นสัดส่วนกับการเจริญเติบโตในความหนาแน่นของประชากร $n-n_0$ และการเคลื่อนที่ของไอออน ดังนั้น δG_s จะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเป็นค่าคอนดักแตนซ์ ที่ต่อขนานร่วมกับค่าคอนดักแตนซ์ เริ่มต้นของสารเลี้ยงเชื้อ G_s ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีค่าเป็น



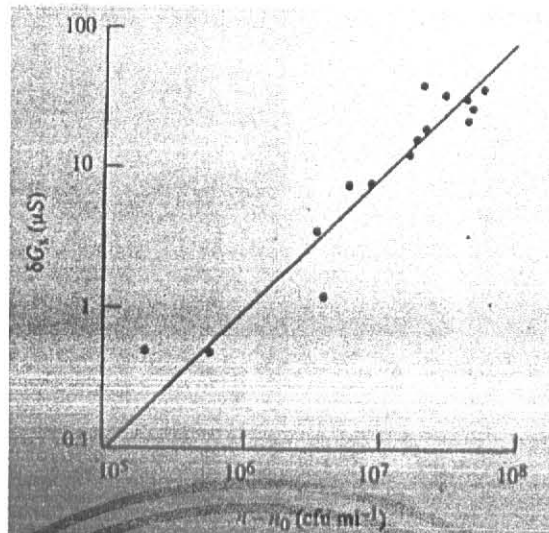
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าคอนดักแตนซ์ G_s ในเวลาหลังการเพาะเชื้อด้วยอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อกับเชื้อ *E.coli* (8×10^5 cfu ml⁻¹) จุดหักของเส้นซึ่ง $\Delta G_s/k$ คือ $1 \text{ pS}(\text{cfu ml}^{-1})^{-1}$



รูปที่ 2.2 ผลกระทบของค่าคอนดักแตนซ์ต่อคร่อม ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อเริ่มแรก

$$\Delta G_s = \frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_o}$$

เมื่อ R_o คือ ค่า R_s เริ่มต้นในอาหารเลี้ยงเชื้อ ค่า G_s ถูกวัดในหน่วยซีเมน (Siemens(S)) จากตัวอย่างแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นถึงจำนวนแบคทีเรีย ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าคอนดักแตนซ์ δG_s กับการเพิ่มขึ้นของ ความหนาแน่นของประชากร $n-n_0$ ของ *E. coli* ใน CM1 broth ที่ 37°C

ถ้าเราพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำจำเพาะเบื้องต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ ที่มีเซลล์อยู่ k ในพื้นที่ A เป็น พื้นที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และเป็นระยะห่างที่ยังคงมีประสิทธิภาพเมื่อทำการจุ่ม ดังนั้น

$$G_s = \frac{kA}{l}$$

ผลิตภัณฑ์ของเซลล์ของแบคทีเรียที่เป็นเซลล์เดี่ยวในปริมาตรของอาหารเลี้ยงเชื้อเกี่ยวข้องกับค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำจำเพาะ K ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} \delta G_s &= \left(\frac{KA}{l}\right)(n - n_0) \\ &= \left(\frac{KG_s}{k}\right)(n - n_0) \end{aligned}$$

ในรูปที่ 2.3 ค่าคงที่ของสัดส่วน KG_s/k เป็นค่าโดยประมาณ $1 \text{ pS}(\text{cfu ml}^{-1})^{-1}$ ดังนั้นค่าของ K จะหาได้ โดยการแทนค่า k สำหรับ CM1 broth (88 S cm^{-1}) และวัดค่า G_s ที่ 10 kHz (จากตารางที่ 2.1 $R_s = 1/G_s = 279 \Omega$)

$$K = 2.45 \times 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (\text{cfu} \cdot \text{ml}^{-1})^{-1}$$

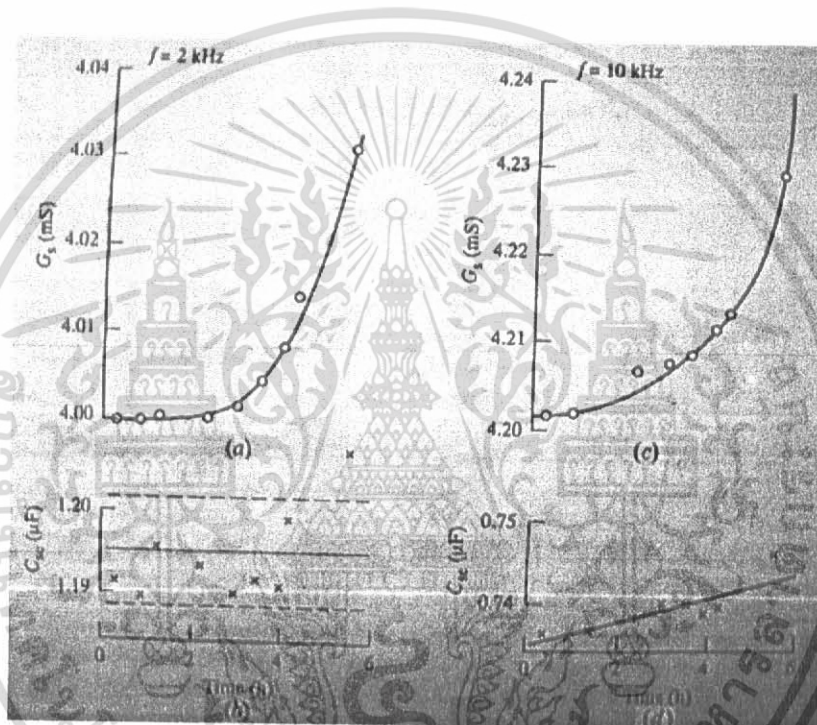
ขนาดของค่า K อยู่ในช่วง $\pm 20\%$ ของช่วงที่กว้างของแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อนี้ และค่าเหมือนกันในอาหารเลี้ยงเชื้ออื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) เมื่อเทียบกับค่าคอนดักแตนซ์ (Conductance)

2.3.1 การคัดเลือกของการเปลี่ยนแปลงในช่วงต้นของกระบวนการเจริญเติบโต

จากการทดลองพบว่า C มีค่าเปลี่ยนแปลงเสมอ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการวัดความเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแบบสุ่มของค่า C เป็นเหมือนการเปลี่ยนแปลงของค่า G ซึ่งเป็นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการวัดค่า C เป็นตัววัดที่เชื่อถือได้ในการสังเกตการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าคอนดักแตนซ์ G_s (o) และ คาปาซิแตนซ์ (x) ในช่วงต้นของการเจริญเติบโตของ E.coli ในอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อ (a) , (b) ที่ความถี่ 2kHz (c) , (d) ที่ความถี่ 10kHz

ในรายงานของเจสัน (Jason) และอ็อกเดน (Ogden) ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงของ G_s และ C_{sc} ของการเพาะเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้ทรานส์ฟอร์เมอร์เรโซบรिดจ์ (Transformer Ratio Bridge) คุณภาพสูง เช่น ในรูปที่ 2.4(a) ที่ G_s ยังคงมีค่าคงที่ก่อนมีการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโต แต่ถึงแม้ว่าเมื่อจำนวนของจุลินทรีย์มักเปลี่ยนแปลงเสมอ ค่า C_{sc} อีกเล็กน้อยที่วัดที่ 2 kHz ก็ยังคงมีนอยซ์ Noise (รูปที่ 2.4(a)) กล่าวได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในค่า C_{sc} เมื่อสังเกตพบการเปลี่ยนแปลงของค่า G_s ที่ความถี่ 2 kHz ที่ความถี่ 10 kHz จะสังเกตพบการเพิ่มขึ้นทั้งค่า G_s และ C_{sc} ในช่วงต้นของวัฏจักรการเจริญเติบโต (รูปที่ 2.4 (c) และ (d))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 กระบวนการของการเปลี่ยนแปลงที่พอสังเกตพบหลังวัฏจักรการเจริญเติบโต

จากการทดลองของเฟิร์สเทนเบิร์ก-เอเดน (Firstenberg-Eden) และซินดูลิส (Zindulis) ทำการทดลอง การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าเคมีใน สารละลายเปปโตน (Peptone) ซึ่งเกิดจากการเจริญเติบโตของ อี. โคไล (E. coli) และ (Saccharomyces Cerevisiae) โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นสแตนเลส ในขนาดขนาด 100 มิลลิลิตร และใช้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ไทป์แอดมิแตนซ์ (Transformer - Type Admittance Bridge) วัดค่าคอนดักแตนซ์ และ คาปาซิแตนซ์ สมมูลที่ต่อขนานกัน ซึ่งต่อมาได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นค่ารีซิสแตนซ์ (Resistance) และคาปาซิแตนซ์ ที่ต่ออนุกรมกัน ค่าคอนดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์ เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เพียงภายหลังจากที่จำนวนจุลินทรีย์ถึง 10^7 cfu ml⁻¹ ในตารางที่ 2.1 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ในค่า G_s ซึ่งมักเปรียบเทียบ กับค่า C_{sc} ค่าคอนดักแตนซ์ จริงๆที่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากการคำนวณข้อมูล มีค่ามากกว่า 40 uS ตั้งแต่ความแม่นยำและความไวของการวัดบริดจ์ (Bridge) มีค่า $G_s \geq 10$ uS ทำให้ตรวจพบได้ง่ายขึ้นในทุกกรณี การวัดค่าคอนดักแตนซ์ที่เปลี่ยนไป ได้ผลดีโดยการใช้เครื่องมือวัดที่เป็นเครื่องมือทางการค้า

Organism	Medium	Medium conductance (mS)	Change in C_{sc} (%)	Change in G_s (%)	Actual change in G_s (uS)
E.coli	PCB	1.3	56	35	460
E.coli	PCB+0.4%				
	glucose	1.7	56	35	595
E.coli	BHI	8	70	7	560
E.coli	TSB	6.9	90	10	690
Pseudomonas aeruginosa	PCB	1.4	55	40	560
Pseudomonas aeruginosa	BHI	7.9	23	10	790
Streptococcus pyogenes	TSB	6.7	42	16	107
Staphylococcus epidermidis	TSB	6.8	52	13	884
Saccharomyces cerevisiae	TSB	7	103	4	280
Saccharomyces cerevisiae	YCB	4.5	30	2	90
Candida utilis	TSB	6.7	20	1	67
Kloeckera apiculata	YCB	4.7	60	1	47

PCB : plate count broth

BHI : brain heart infusion

TSB : trytic soy broth

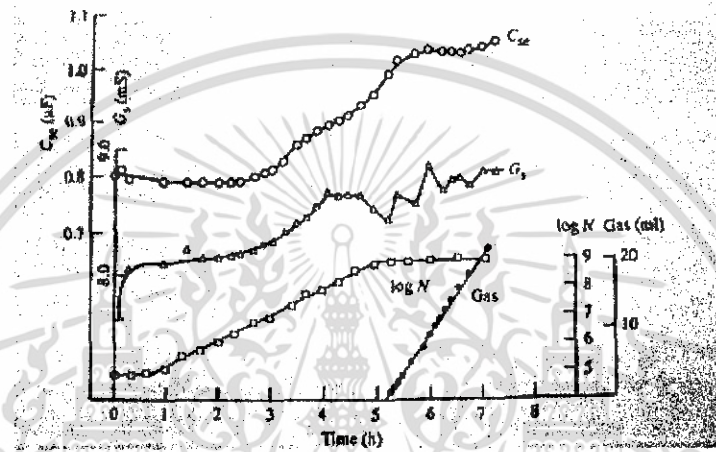
YCB : yeast carbon base

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันคาปาซิแตนซ์ (Polarization Capacitance (C_{sc}))

และค่าความนำของสารละลาย G_s เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองของเคลล์ (Kell) บ่งชี้ว่า เซลล์ที่อยู่รอดได้ไม่นานช่วยให้ค่า คาปาซิแตนซ์ C_{sc} เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเซลล์ที่ตายแล้วหรือเกือบตายช่วยให้ค่า C_{sc} เพิ่ม เซลล์เหล่านี้จะเกาะติดกับอิเล็กโทรด เมื่อความหนาแน่นของเชื้อจุลินทรีย์มากถึง 10^7 cfu ml⁻¹ การนับนี้สำหรับค่า C_{sc} ที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ เมื่อจำนวนเชื้อที่มีชีวิตคงที่ หรือ ลดลง ดังตัวอย่างใน รูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงการหยุดการเจริญเติบโตของอี โคไล (E. coli) ที่ระยะท้ายของวัฏจักรการเจริญเติบโต ซึ่งตามด้วยการเพิ่มขึ้นของค่า C_{sc} กับ ยีสต์ ค่า C_{sc} เปลี่ยนแปลงก่อนที่จำนวนจะเปลี่ยนแปลง อาจเกิดจากการตกตะกอนของเซลล์ อย่างไรก็ตามผลนี้อาจเกิดจากอุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการและไม่ใช้กับเครื่องมือวัดที่ไม่ใช่ทางการค้า



รูปที่ 2.5 ผลของการเจริญเติบโตของ E.coli ใน brain heart infusion ต่อค่าคาปาซิแตนซ์ C_{sc} , คอนดัคแตนซ์ G_s , จำนวน N ของแบคทีเรียและ การขยายของแก๊ส (Gas)

2.4 หลักการคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)

หลักการเบื้องต้นของคาปาซิทีปเซ็นเซอร์ คือ การทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอย่างน้อยสองขั้ว ซึ่งทำการวัดค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ของสิ่งเวดล้อม ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็น อากาศหรือน้ำ โดยจะใช้หลักการคล้ายๆกันคือ วัดสนามไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำจากค่าไดอิเล็กทริกของสาร

2.4.1 ประจุและสนาม (Charge and Fields)

สมการการคำนวณหาค่าของสนามไฟฟ้าสถิต สามารถหาได้จากสนามไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์โดยการส่งผ่านการเปลี่ยนแปลงของประจุในระบบของวัสดุฉนวนคงที่ (Dielectric Constant) ต่างๆ

กฎของคูลอมป์

ประจุขนาดเล็กน้อยในวัสดุฉนวนให้ ประจุ Q_1 และ Q_2 คูลอมป์มีระยะทางห่างกันจึงมีแรงกระทำมีหน่วยเป็นนิวตัน (Newton) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} \quad (2.4.1)$$

แรงกระทำของประจุจะพร้อมกันแต่มีทิศทางที่ตรงข้ามกัน

หนึ่งหน่วยวัดทางไฟฟ้า คือ ประจุจำนวนมากที่มีการเคลื่อนที่โดยกระแส 1 แอมป์ ภายใน 1 วินาที ; ประจุของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 1.026×10^{-19} คูლობปี ดังนั้นหนึ่งหน่วยวัดไฟฟ้ามีจำนวนอิเล็กตรอนประมาณ 6×10^8 อิเล็กตรอน แรงกระทำระหว่างประจุสองประจุขนาด 1 คูლობปี ที่ระยะทางมิลลิเมตร แต่แรงกระทำจากไฟฟ้าสถิตสามารถจะหึงได้เมื่อประจุมีขนาดเล็กมาก

ในทำนองเดียวกันความต่างศักย์หรือแรงดัน (Volt(V)) สามารถหาได้จากวงจรประจุเพลตแบบขนาน (Parallel Plate Capacitor) โดยมีขนาดพื้นที่แผ่นเท่ากับ A ตารางเมตร และช่องว่างห่าง d เมตร จะมีพลังงานสะสมในตัวคาปาซิเตอร์ เท่ากับ

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} V^2 \quad (2.4.2)$$

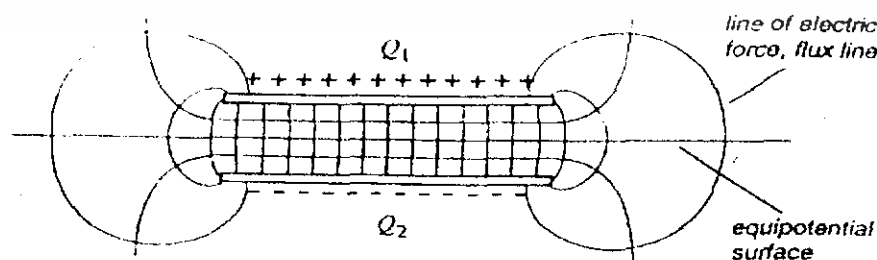
และแรงกระทำจะมีหน่วยเป็นนิวตัน คำนวณจากสมการดิฟเฟอเรนเชียล(Differential) ของพลังงานต่อช่องว่างแผ่นเพลตตัวนำดังนี้

$$F = \frac{\partial E}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{C}{d} \cdot V^2 = \frac{-\epsilon_0 \epsilon_r}{2} \frac{A}{d^2} \cdot V^2 \quad (2.4.3)$$

$$F = -4.427 \times 10^{-12} \epsilon_r \frac{AV^2}{d^2}$$

สนามไฟฟ้า

แนวคิดเรื่องสนามไฟฟ้าของประจุที่กระทำต่อแผ่นเพลตตัวนำคู่ขนานแสดงให้เห็นดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าของประจุที่กระทำต่อแผ่นเพลตตัวนำคู่ขนาน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้แรงดันระหว่างแผ่นเพลตตัวนำปราศจากทิศทาง มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โวลต์ จะสามารถหาค่าแรงดัน ณ จุดต่างๆภายในช่องว่างระหว่างแผ่นเพลตตัวนำได้ โดยการแทนค่าที่จุดนั้นเป็นพื้นผิวหน้าแทนแผ่นเพลตตัวนำกับผิวหน้าของเส้นสมมติ (Equipotential Surface) สนามไฟฟ้า E ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทางสามารถคำนวณหาได้ดังสมการ

$$E = -\frac{dV}{dn} = -gradV = -\nabla V \quad \text{1 โวลต์ต่อเมตร}$$

เมื่อคือค่าความต่างระหว่างจุดที่ทำการหาภายในช่องว่างกับเส้นสมมติที่จุดกึ่งกลางโดยตั้งฉากกับแนวแกน ดังแสดงในรูป พื้นผิวหน้าแต่ละจุดจะมีค่าแรงดันคงที่ และที่เส้นจุดกึ่งกลางสมมติจะมีสนามไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นแรงดันระหว่างจุด 2 จุด ภายในช่องว่างเช่น จุด a กับจุด b สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ

$$V_{ab} = \int_a^b -E \cdot dn \quad \text{โวลต์ (2.4.4)}$$

ภายในแผ่นเพลตตัวนำคู่ขนานดังแสดงในรูปที่ 2.6 ค่าจะลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นเชิงเส้น (Linear) ค่าของสนามไฟฟ้าคงที่และมีแนวตั้งฉากกับแผ่นเพลตตัวนำ ดังนั้นจากสมการ 2.4.4 จะได้ว่า $V_{12} = Ed$ เมื่อ d คือความกว้างของแผ่นเพลตตัวนำ

2.4.2 การนำและการเคลื่อนที่ของกระแส

เมื่อสนามไฟฟ้าคือการเกิดกระแสไหลผ่านตัววัสดุที่มาทำต่างๆ กระแสคือความหนาแน่นของการนำกระแสรวม (Sum of Conduction Current Density; J_c) และความหนาแน่นการเคลื่อนที่ของกระแส (Displacement Current Density; J_d) ดังนั้นจึงกำหนดชนิดหรือลักษณะเฉพาะของความหนาแน่นของกระแส (Specify current density) ในรูปของ แอมแปร์ค่าตารางเมตร

สำหรับตัวนำที่เป็นโลหะการเคลื่อนที่หรือการนำกระแส เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนตัวนำที่เป็นของเหลวนำไฟฟ้า (Electrolytes) กระแสจะถูกนำไปเคลื่อนที่โดยไอออน (Ions) ความหนาแน่นของกระแสสำหรับการนำกระแสสามารถหาได้ดังสมการคือ

$$J_d = \sigma E \quad \text{(แอมแปร์ต่อตารางเมตร)}$$

เมื่อ σ คือค่าคอนดักติวิตี (Conductivity) มีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางเมตร

สำหรับฉนวนค่าความต้านทานสูงเป็นเรื่องที่ดี เพราะค่าการนำกระแสจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ และประจุจะส่งผ่านโดยการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ของกระแส น้ำเป็นตัวนำไม่ว่การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการส่งผ่านประจุได้เป็นอย่างดี แต่ในสุญญากาศจะส่งผ่านได้เพียงเล็กน้อย และเมื่อมีค่ารีเลทีฟไดอิเล็กทริก ทริกคอนสแตนต์ (Relative Dielectric Constant; ϵ_r) สูงก็จะทำให้กระแสไหลผ่านได้ดีขึ้น การเคลื่อนที่ของกระแสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้กับขั้วอิเล็กโทรด เกิดเป็นความต่างศักย์ และกลายเป็นแรงผลักดันประจุเพื่อให้เกิดความสมดุล การเคลื่อนที่ของกระแส (Displacement Current) สามารถหาได้จากสมการ

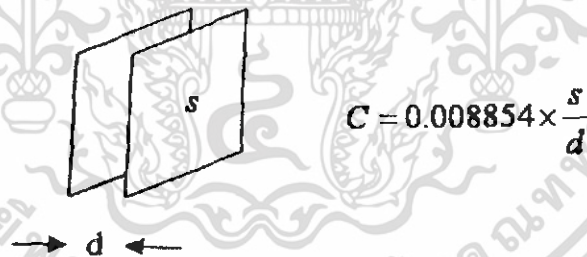
$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \epsilon_r E) \quad (\text{แอมแปร์ต่อตารางเมตร})$$

โดยที่ ค่า D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์

และ ค่า E คือ สนามไฟฟ้า

2.4.3 พื้นฐานของคาปาซิทีปเซ็นเซอร์

ชนิดของเซ็นเซอร์แบบค่าความจุมีอยู่หลายชนิด เช่น ทรงกระบอก แผ่นคู่ขนาน เป็นต้น แตกต่างกันทั้งวงจร การคำนวณหาค่าของการเก็บประจุ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการใช้เซ็นเซอร์แบบค่าความจุว่าจะใช้วัดค่าอะไรการใช้เซ็นเซอร์แบบค่าความจุ สามารถตรวจจับค่าต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนไหวหรือการเปลี่ยนแปลงค่าฉนวน(Dielectric) และสามารถตรวจจับสิ่งของหรืออุปกรณ์ที่นำไฟฟ้า และไม่นำไฟฟ้าก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบวงจร ลักษณะของงานที่จะนำไปใช้งาน และความชำนาญด้านส่วนประกอบของเซ็นเซอร์แบบค่าความจุ



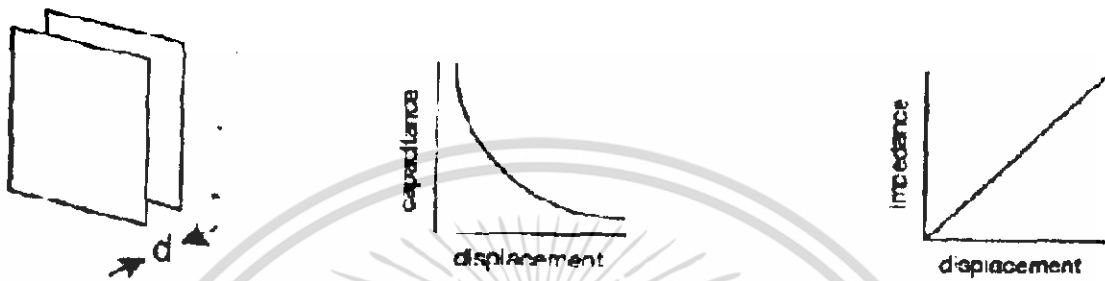
รูปที่ 2.7 การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์เบื้องต้น

ส่วนใหญ่องค์ประกอบของเซ็นเซอร์แบบค่าความจุ จะใช้แบบแผ่นคู่ขนาน(Two Parallel Plate) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เมื่อ ขนาด ความกว้าง ความยาว ของแผ่นเพลตตัวนำเป็นเซนติเมตร และระหว่างแผ่นเพลตตัวนำเป็นฉนวนอากาศซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริก (Relative Dielectric Constant; ϵ_r) ประมาณ 1 ดังนั้นค่าคาปาซิแตนซ์ จึงมีค่าเป็นพิโก (Pico) โดยที่ไม่คิดถึงค่าผลกระทบจากของหรือตะเข็บของวัสดุที่นำมาใช้ และถ้าหากแผ่นเพลตตัวนำมีขนาดที่เปลี่ยนแปลง หรือช่องว่างเปลี่ยนแปลง ก็จะทำให้ค่าความจุเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นองค์ประกอบเหล่านี้จึงนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการวัดค่าฉนวนของวัสดุและการเคลื่อนที่ของแผ่นเพลตตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อช่องว่างของแผ่นเพลตตัวนำเปลี่ยนแปลงไปค่าคาปาซิแตนซ์จะไม่เป็นอิสระ แต่จะขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่เฉลี่ยของแผ่นเพลตตัวนำ ดังนั้นเมื่อช่องว่างแผ่นเพลตตัวนำเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์เปลี่ยนแปลงไป และค่าจะไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างและค่าคาปาซิแตนซ์ จะมีปัญหาถ้าใช้ในการวัดโดยตรง แต่ค่าที่ได้จะเป็นเชิงเส้นถ้าค่าความจริงเป็นการวัดโดยการแทนภายในช่องว่าง หรือการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริก ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าคาปาซิแตนซ์

2.4.4 เปรียบเทียบวงจร

มีวงจรเซ็นเซอร์ตัวเก็บประจุ ดังตาราง พิจารณาคุณสมบัติของระบบที่ต้องการ ความเที่ยงตรง ราคา ขนาด และการถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม อุปสรรคที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือการซ่อมบำรุง ดังแสดงในตาราง เช่น วงจรไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดีคือราคาไม่แพง ขนาดกะทัดรัด แต่มีข้อเสียคือจะมีการเปลี่ยนแปลงต่อการรบกวนของสภาพแวดล้อมอย่างมาก ส่วน ซิงโครไนส์บริดจ์ จะมีผลน้อย แต่ขนาดของวงจรจะใหญ่กว่า ราคาที่แพงกว่าด้วย

Circuit	Function	Sensitive to stray capacity	Sensitive to noise	Needs ADC	Bandpass filter available	Size	Sensitive to shunt resistor
DC	volt = $1/C$	yes	5	no	no	0	5
AC oscillator or I-dot	freq = $1/RC$ period = RC	yes	5	no	no	1	5
AC oscillator (current-capacitance)	freq = $1/RC$ period = RC	yes	3	no	no	2	5
LC oscillator	freq = $1/\sqrt{LC}$	yes	2	no	yes	3	0
Sync, single ended	volt = $C1-C2$ or $C1/C2$	no	1	yes	yes	4	1
Sync, bridge	volt = $C1-C2$ or $1/C1-C2$	no	0	yes	yes	5	0

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบวงจรที่ใช้ตรวจวัดค่าคาปาซิแตนซ์: 0 คือ ดี, 5 คือ ไม่ดี

ความแตกต่างของเครื่องมือวัด โดยใช้ค่าการเก็บประจุมีตัวแปรทั้งหมดทั้งหมด 7 ประการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฟังก์ชัน

สำหรับ อาร์ ซี ออสซิลเลเตอร์ (RC Oscillator) ความถี่เอาต์พุตเป็นสัดส่วนคือ $1/RC$ และ คาบเวลาของวงจร (Period) จะเป็นตรงข้ามกับความถี่นั่นก็คือ ค่าของอาร์ซีโดยที่ค่าของคาบเวลาและความถี่ทางเอาต์พุตจะแปรผกผันตรงกับความจุ

ส่วนวงจรซิงค์โครนัสบริดจ์ (Two Synchronous Bridge Circuit) ค่าความแตกต่างของสมการจะขึ้นตรงอยู่กับขนาดของสัญญาณอินพุตที่เข้ามา โดยที่ทางเอาต์พุตค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของแรงดันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของความจุไฟฟ้าที่นำมาต่อในวงจร ค่าที่ได้จะค่อนข้างเป็นเส้นตรงเมื่อค่าในช่องว่างเปลี่ยนแปลงไป

2. ค่าความไวของค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อส่วนของการตรวจจับหรือแผ่นเพลตตัวนำมีขนาดที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดสถานะที่เรียกว่า สเตรคาปาซิเตอร์ (Stray Capacity) มีค่าเพียงเล็กน้อยมีค่าเป็นพิโกฟารัด (pF) แต่จะมีผลอย่างมากต่อการผลิตความถี่ เช่น อาร์ ซี ออสซิลเลเตอร์เพราะค่าความถี่จะขึ้นตรงต่อความจุ

3. ความไวของสัญญาณรบกวน

จะเป็นความเสี่ยงอย่างยิ่งเมื่อวงจรออสซิลเลเตอร์ จะมีความถี่ที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อความไวของอาร์ซีวงจรออสซิลเลเตอร์มีค่ามากทำให้ค่าของคาบเวลามีค่ามากขึ้นหรือมีค่าลดลง ก็จะทำให้ค่าความถี่เพิ่มหรือลดลงตามไปด้วย ปัญหานี้จะมีผลอย่างมากเมื่อนำไปใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4. การแปลงวงจรมัลติเพลกซ์เป็นวงจรดิจิทัล

ความถี่ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยการนับในรูปของสัญญาณพัลส์ หากแต่ว่าสัญญาณนั้นต้องมีค่าความกว้างของคาบเวลาที่คงที่แต่ในวงจรอาร์ซีออสซิลเลเตอร์จะไม่สามารถตรวจจับค่านั้นได้เนื่องจากว่าค่าคาบเวลาของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าอาร์ซีโดยตรง

แต่สำหรับวงจรซิงค์โครนัสบริดจ์แล้ว จะสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลได้เลยเพราะค่าที่ได้จากทางเอาต์พุตนั้นเป็นสัญญาณแรงดัน

5. การกรองสัญญาณความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลง

สัญญาณรบกวนที่อยู่เหนือค่าความถี่ (Wideband) จะสามารถลดลงได้เมื่อส่วนวงจรกรองความถี่ผ่านเมื่อเป็นวงจรซิงค์โครนัสบริดจ์ แต่จะไม่ใช่เป็นเช่นนั้นเมื่อเป็นวงจรอาร์ซีออสซิลเลเตอร์ เนื่องจากจะทำให้ค่าความถี่ทางเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป

6. ขนาด

ออสซิลเลเตอร์จะใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบซิงค์โครนัสบริดจ์ เพราะมีส่วนประกอบน้อยกว่า

7. ความไวของความต้านทานต่อแบบขนาน

จะส่งผลอย่างมากเมื่อมีค่าความต้านทานมาต่อขนานกับตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเมื่อเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ แต่กลับเกือบจะไม่มีผลเลยเมื่อเป็นวงจรซิงค์โครนัสบริดจ์ เพราะค่าการเปลี่ยนแปลงทางเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับค่าความจุเท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 ค่าไดอิเล็กทริกของอากาศ

ข้อกำหนดจำกัดสูงสุดการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริก ; ϵ_r ของอากาศ สามารถคำนวณหาได้ โดยที่จะมีค่ากำหนดพื้นฐานต่างๆ ถึงแม้ว่าค่าไดอิเล็กทริกของอากาศ (ϵ_r) จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อความดัน อุณหภูมิ ความชื้น เปลี่ยนแปลงก็ตาม

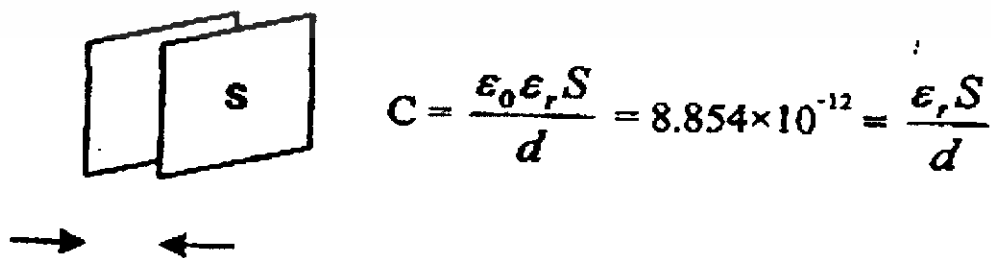
จากมาตรฐานอุณหภูมิ และความดันค่าไดอิเล็กทริก ; ϵ_r จะเปลี่ยนแปลง $2 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ที่อากาศแห้ง แต่จะเพิ่มขึ้นเป็น $7 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ที่อากาศมีความชื้นที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ ค่าไดอิเล็กทริก จะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นที่ 7×10^{-5} สำหรับ R.H. เปลี่ยนแปลงจาก 40% ถึง 90% และจะเปลี่ยนแปลงที่ความดัน 1 บรรยากาศ ค่าไดอิเล็กทริกที่ 10^{-4} เมื่อปล่อยระยะเวลาไป 2-3 ชั่วโมงก็จะสามารถหาค่าต่างๆของการเปลี่ยนแปลงตามตารางดังนี้

	Change	Coefficient	Effect
Temperature	5 °C	5 ppm / °C	25 ppm
Relative humidity	10%	1.4 ppm / %RH	14 ppm
Pressure	0.05 atm	100 ppm / atm	5 ppm
Total			44 ppm

ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกของอากาศ

2.4.6 การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)

ในการคำนวณหาค่าความจุของไฟฟ้าของแผ่นคู่ขนานนั้น สามารถหาได้จากกฎของเกาส์ สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบช่องว่างของแผ่นคู่ขนานและสารทุกชนิดจะมีค่าไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารนั้นๆ แต่ถ้าสารหรือฉนวนที่เป็นอากาศ แสดงในภาพค่ารวมของประจุ Q ภายในช่องว่างจะเท่ากับค่าการเคลื่อนที่ของแผ่นเพลตตัวนำ ผลก็คือ



รูปที่ 2.9 การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ของแผ่นเพลตตัวนำแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	C	=	ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด
	ϵ_r	=	ค่าคงที่ของอากาศ = 8.854×10^{-12}
	ϵ_0	=	ค่าไดอิเล็กทริกที่ความดัน 1 บรรยากาศ
	S	=	พื้นที่ของแผ่นเพลตตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร
	d	=	ช่องว่างระหว่างแผ่นเพลตตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร

ค่าไดอิเล็กทริก ของอากาศมีค่าประมาณ 1 แก๊สส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 1 ส่วนน้ำบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 80 เนื่องจากค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลตตัวนำ(S) และค่าของความกว้างของแผ่นเพลตตัวนำ (d) เป็นค่าคงที่ ดังนั้นค่าประจุจึงเปลี่ยนไปตามค่าไดอิเล็กทริกของสารตัวกลางที่เข้ามาแทนที่อากาศ เนื่องจากค่าไดอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าอากาศ หลักการวัดด้วยการวัดค่าความจุทางไฟฟ้า จึงเหมาะสำหรับสารตัวกลางที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงกว่าค่าไดอิเล็กทริกของอากาศมากๆ โดยธรรมชาติค่าไดอิเล็กทริกของสารจะเปลี่ยนค่าไปตามอุณหภูมิ, ความหนาแน่น, ความชื้น, ความดัน ถ้าสารตัวกลางเป็นผง เช่น ชี๊ฉ่า ถ่าน เมล็ดพืช ค่าไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น ความชื้นของสารชนิดนั้น ๆ แต่ถ้าสารตัวกลางเป็นของเหลว ค่าไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในของเหลวชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีค่าไดอิเล็กทริกสูงกว่า

ในความเป็นจริงภายในแผ่นเพลตตัวนำคู่ขนานจะไม่มีเพียงแต่ค่าความจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่จะมีค่าความต้านทานระหว่างแผ่นเพลตตัวนำอยู่โดยค่าความต้านทานจะขนานอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานจะมีค่าตามสมการ ดังนี้

$$R = \rho d / A$$

เมื่อ	ρ	=	สัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ
	d	=	ความกว้างของแผ่นเพลตตัวนำ
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลตตัวนำ

ค่าของรีซิสติวิตี (Resistivity) ρ จะมีค่าเท่ากับ

$$\rho = \frac{2\sqrt{3mkT}}{ne^2 \lambda} \quad (2.4.5)$$

เมื่อ	m	=	มวลอิเล็กตรอน = 9.109×10^{-31}
	e	=	ประจุของอิเล็กตรอน = 1.602×10^{-19}
	k	=	ค่าคงที่ Boltzman = 1.38×10^{-23}
	T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน
	λ	=	ทางเดินอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าค่าความต้านทาน จะแปรค่าของอุณหภูมิ และ จะแปรผกผันกับค่า λ ดังนั้นเมื่อค่า λ คงที่ แล้ว ค่าความต้านทาน จะแปรเปลี่ยนตามค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนั่นเอง

2.5 การวัดค่าสมมูลทางไฟฟ้าของกล่องบรรจุอาหาร

กล่องบรรจุอาหาร โดยทั่วไปสามารถแบ่งภาชนะที่ใช้บรรจุออกได้ 2 ประเภทคือ

1. กล่องกระดาษแบบ Tetra Brik Aseptic (TBA) ซึ่งมีรูปร่างที่ไม่คงทน กล่องบรรจุสามารถแยกออกเป็นชั้นๆ ได้ คือ ชั้นของกระดาษ ชั้นของพลาสติก และ ชั้นของอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)
2. กล่องพลาสติกแบบ Stork Food & Dairy Systems (NL) ซึ่งเป็นกล่องภาชนะที่มีความคงทนและผนังค่อนข้างหนา

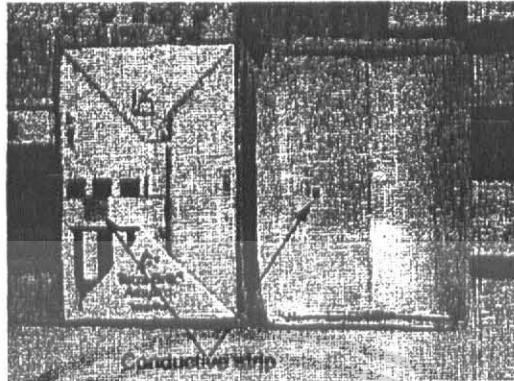


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของกล่องบรรจุแบบทีบีเอ (TBA) และ แบบพลาสติก

ดังนั้นในการหาค่าสมมูลทางไฟฟ้าที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับกับค่าความนำไฟฟ้าของกล่องบรรจุภัณฑ์ จึงสามารถทำได้ใน 2 ลักษณะคือ

1. การวัดค่าสมมูลทางไฟฟ้าของกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ (TBA-Tetra Brik Aseptic)
2. การวัดค่าสมมูลทางไฟฟ้าของกล่องบรรจุอาหารแบบขวดพลาสติก (Stork Food & Dairy Systems)

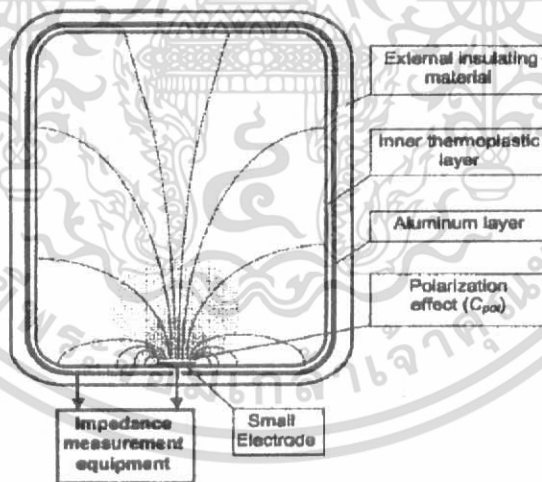
2.5.1 การทดสอบกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ (TBA -Tetra Brik Aseptic)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะภายในและภายนอกของกล่องแบบทีบีเอที่ได้ใส่แผ่นอิเล็กโทรดเล็กๆที่นำไฟฟ้าไว้

กล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ นั้นประกอบด้วยชั้นต่างๆ 3 ชั้นคือ

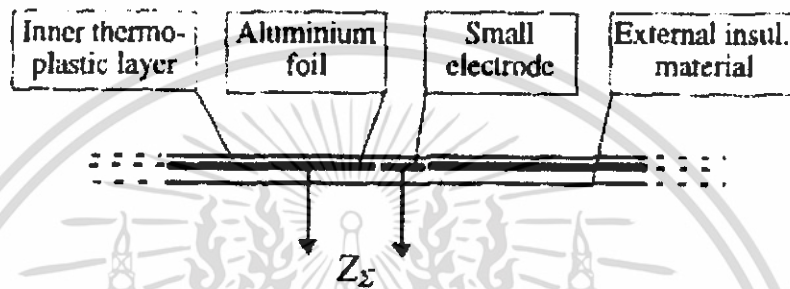
1. ชั้นที่เป็นกระดาษ
2. ชั้นที่เป็นพลาสติก
3. ชั้นที่เป็น Aluminum Foil



รูปที่ 2.12 ภาพตัดของกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ แสดงเส้นแรงไฟฟ้าและบริเวณที่สนามไฟฟ้าแผ่ไปถึงเมื่อจ่ายแรงดันให้กับแผ่นอิเล็กโทรดเล็ก โดยให้ผนังของกล่องและแผ่นอะลูมิเนียมมีขนาดคงที่

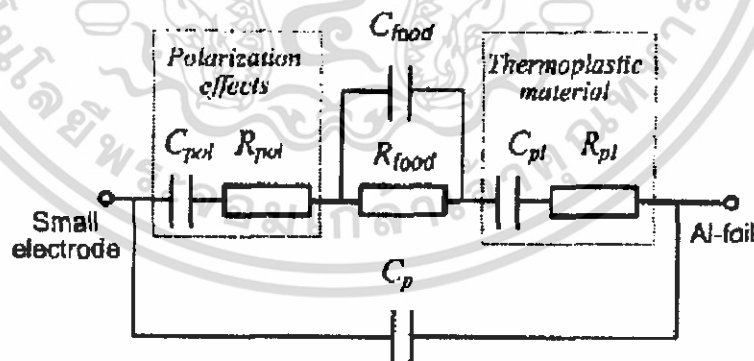
ซึ่งอะลูมิเนียมนี้เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ดีมากและป้องกันสนามไฟฟ้าที่เกิดจากภายนอกเข้ามาในกล่องบรรจุภัณฑ์ด้วย ทำให้ขั้วอิเล็กโทรดที่จะใช้ในการตรวจสอบอาหารในกล่องไม่สามารถส่งค่าความนำทางไฟฟ้าเข้าไปภายในได้ในการแก้ปัญหาทำได้โดยการใส่แผ่นอิเล็กโทรดเล็ก ๆ ในชั้นของผนังกล่อง และเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับชั้นอะลูมิเนียมสนามไฟฟ้าที่แผ่ขยายขึ้นในกล่องจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าบริเวณตามขอบของผนังซึ่งเกิดจากค่าความนำ (σ) ที่มีช่องว่างและค่า Dielectric Constant (ϵ) ของของเหลวค่าแรงดันตกคร่อมที่สัมพันธ์กับการไหลของกระแสหลัก ๆ แล้วเกิดขึ้นใกล้ ๆ กับขั้วอิเล็กโทรดเล็กกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขั้วอิเล็กโทรดภายในมีความหนาแน่นมากที่สุด ในแถบบริเวณที่ใกล้กันกับอิเล็กโทรดเล็กและเมื่อห่างออกไปจากแผ่นอิเล็กโทรดความหนาแน่นของกระแสก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจากสิ่งเหล่านี้เองที่เป็นเหตุผลว่าทำไมวิธีนี้ไม่มีผลจากกล่องบรรจุที่มีรูปร่างต่าง ๆ กันไป โดยเฉพาะเมื่อเราใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ที่ห่างจากขั้วอิเล็กโทรดเล็ก จากวิธีเดียวกันนี้ค่าความนำไฟฟ้าของอาหารที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่จะมีผลกระทบกับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วย



รูปที่ 2.13 แสดงภาพตัดของแผ่นอิเล็กโทรดเล็กที่ฝังอยู่ในกล่องบรรจุเพื่อป้องกันการสัมผัสกับอาหาร

สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารบางอย่างที่ห้ามให้ขั้วอิเล็กโทรดสัมผัสกับอาหาร โดยตรงวิธีนี้ขั้วอิเล็กโทรดเล็กจะถูกคลุมด้วยฉนวนพลาสติก สนามไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีนี้ พิสูจน์ได้ว่ามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับแบบไม่มีฉนวนพลาสติกหุ้มอิเล็กโทรดเล็ก



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรไฟฟ้าเสมือนของการวัดค่าอิมพีแดนซ์

เมื่อ C_{pol} และ R_{pol} แทนอิมพีแดนซ์ของแผ่นอิเล็กโทรดเล็กที่ใช้สัมผัสของเหลว C_{pt} และ R_{pt} แทนอิมพีแดนซ์ของพลาสติกที่อยู่ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์กับอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 แสดงถึงวงจรทางไฟฟ้าของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความจุไฟฟ้า C_{food} ขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กทริกคอนสแตนต์ (Dielectric Constant (ϵ)) ของอาหารและวิธีการทำการวัด ซึ่งจากการทดลองพิสูจน์ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นของเหลวต่าง ๆ มีค่าไดอิเล็กทริกคอนสแตนต์ (ϵ) น้อยเป็นพิโกฟารัด (Pico – Farads) เท่านั้น ส่งผลให้การวัดค่าไดอิเล็กทริกคอนสแตนต์ (ϵ) ไม่สามารถวัดได้ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 MHz

ค่า C แผลง (C_p) เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับชั้นอะลูมิเนียมพอยล์ผ่านไปถึงชั้นพลาสติกขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของชั้นที่เหนียวมาขึ้น สำหรับพื้นที่อยู่ที่มีขนาดน้อยกว่า 100 ตารางมิลลิเมตร ค่า C_p ก็จะเปรียบได้กับค่า C_{food}

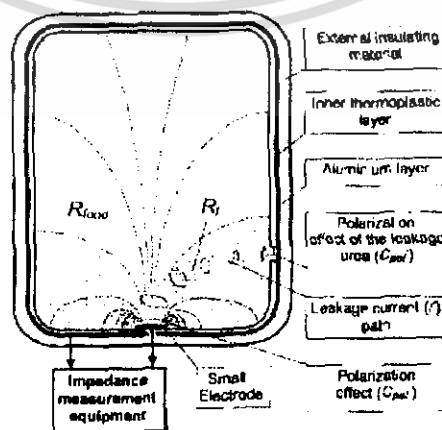
ถ้าเราไม่สนใจถึงผลกระทบของค่า C_{food} และ C_p และการใช้วงจรอนุกรมง่าย ๆ ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z_x) ค่าผลรวมของความต้านทาน R_x จะเท่ากับผลรวมของ R_{pol} , R_{food} และ R_{pl} ซึ่งค่าทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับค่าความนำ σ ของอาหาร ซึ่งทำให้เพิ่มความไวในวิธีนี้ ค่าของ R_{pl} ที่ขึ้นอยู่กับค่า σ นั้นจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอิทธิพลของ σ ที่มีต่อ R_{pol} และ R_{food} สามารถอธิบายได้โดยความหนาแน่นของกระแสที่กระจายออกภายในกล่องกระดาษเมื่อค่าความนำทางไฟฟ้าของอาหารที่บรรจุแปรเปลี่ยนไปค่า คาปาซิแตนซ์ (C_x) ต่อวงจรสมมูลสามารถประมาณได้เท่ากับ C_{pl} เพราะ $C_{pol} \gg C_{pl}$

การตรวจสอบคุณภาพของกล่องกระดาษแบบทีบีเอ (TBA)

การตรวจสอบความแน่นของกล่องกระดาษแบบทีบีเอ หลักทั่วไปจะดูในส่วนชั้นในสุดของชั้นพลาสติกของกล่องกระดาษแบบทีบีเอชั้นซ้อนกันหลายชั้น

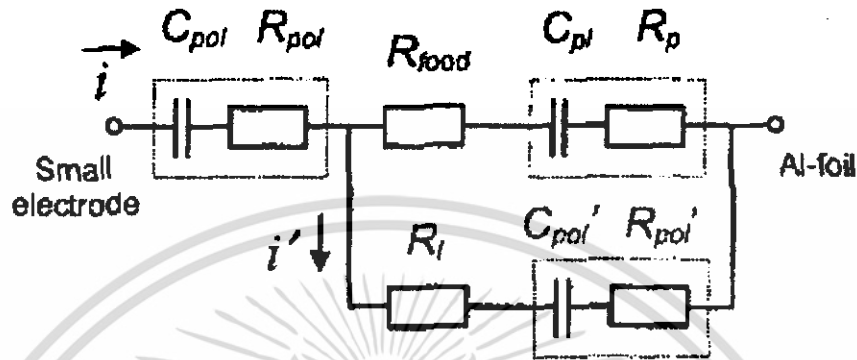
การแยกสลายที่เป็นไปได้ของชั้นนี้(การรั่ว) อาจจะทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในออกมาถึงชั้นอะลูมิเนียม หรือชั้นไฟเบอร์ (Fiber) คุณสมบัติที่เป็นผนังกันของชั้นบรรจุภัณฑ์จะสูญเสียไปถึงแม้ว่าจะไม่มีของเหลวรั่วออกมาก็ตาม

รอยรั่วเป็นผลทำให้เกิดการไหลของกระแสเกิดขึ้นอีกในกล่องบรรจุภัณฑ์อีก ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดได้ดีในช่วงที่ความถี่ต่ำ และที่แถบที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเมื่อเทียบกับบริเวณรอบข้างเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดเล็กกับบริเวณที่มีการรั่ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.15 แสดงการกระจายความหนาแน่นของกระแสในกล่องกระดาษแบบทีบีเอ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองแบบผลกระทบนี้ การเพิ่ม (R_{pol} , R_{food} , R_{pl}) เข้าไปในวงจรสมมูลในรูปที่ 2.14 ในการพิจารณาอย่างง่าย ๆ ค่า C แผลง (C_p) และ C_{food} จะไม่กล่าวถึงในรูปที่ 2.16 ซึ่งอิทธิพลนี้ ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ต่ำจะไม่กล่าวถึง



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรสมมูลของการวัดค่าอิมพีแดนซ์จากรูปที่ 2.15

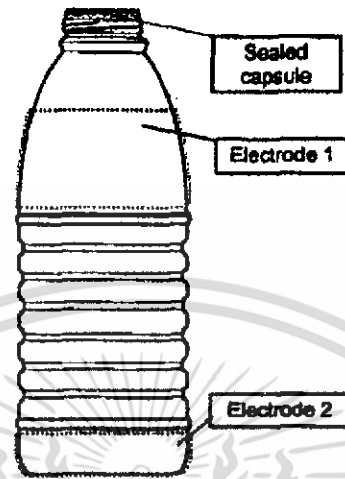
โดย R_l เป็นความต้านทานของอาหารในกระแส i' ที่ไหลผ่านร้วออกผ่านสาขาของวงจรสมมูล

C_{pol}' และ R_{pol}' แทนปรากฏการณ์ Polarization ที่บริเวณผิวร้ว

สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นของเหลวต่าง ๆ ค่า Polarization Capacitance C_{pol}' จะมียค่ามากกว่า C_{pl} ที่ช่วงความถี่ถึง 10 KHz ซึ่งเป็นจริงสำหรับพื้นผิวร้วบริเวณเล็ก ๆ จากหลักการดังกล่าวทำให้ $[(R_l + R_{pol}') / (R_{food} + R_{pl})] < (C_{pol}' / C_{pl})$ จากกรณีนี้เมื่อลดความถี่ก็จะเป็นการเพิ่มค่าความสัมพันธ์ของ i'/i ของกระแสที่ไหลร้วออกผ่านสาขาของวงจรสมมูลการร้ว (R_l , R_{pol}' , C_{pol}') ด้วยเหตุนี้เองทำไมที่ความถี่ต่ำสาขาของวงจรนี้จึงส่งผลกระทบอย่างมากในการวัดค่าอิมพีแดนซ์และในขณะเดียวกันค่าริซิสแตนซ์ (Resistance) ของสาขา R_l จะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทาน R_{food} เสมอ ซึ่งจากผลในกรณีการร้วนี้ทั้งค่าความต้านทานเทียบเท่า R_{Σ} และค่าความจุ (capacitance) เทียบเท่า C_{Σ} ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับชั้นอลูมิเนียมฟอยล์จะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความถี่สูง อิทธิพลค่าคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ที่กระทบถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์ จะลดลงและจากอิทธิพลของ C ที่สาขาที่ร้วก็จะมีน้อยลงด้วยเพราะ $(R_{food} + R_{pol}) > (R_{food} + R_{pl})$ การชดเชยผลกระทบนี้ทำโดยใช้ความถี่ที่ขึ้นอยู่กับค่า C_{pol}' ค่าผลกระทบจะลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ แต่ในความเป็นจริงแล้วที่ความถี่เกิน 100 KHz จากผลการทดลองผลกระทบที่เกิดจากการร้วนี้สามารถละไว้หรือไม่ต้องสนใจได้

2.5.2 การทดสอบกล่องบรรจุอาหารแบบขวดพลาสติก

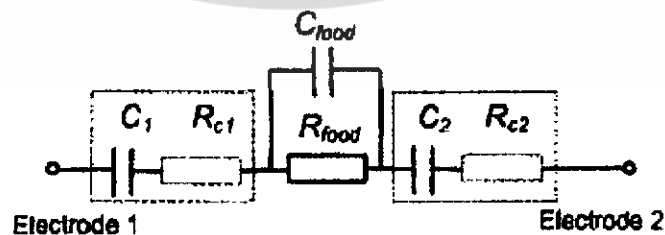
ในการหาค่าความนำไฟฟ้าของอาหารในสถานะแบบขวดพลาสติกนี้ไม่ได้สัมผัสอาหารโดยตรง แต่จะใช้แผ่นอิเล็กโทรดสัมผัสสถานะของอาหารแทนดังรูปที่ 2.17 เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการทำลายอาหาร



รูปที่ 2.17 การทดสอบอาหารแบบใช้แผ่นอิเล็กโทรด
ประกบขวดพลาสติกภายนอกเพื่อเป็นการไม่ทำลายอาหาร

จากรูปที่ 2.17 จะพบว่าถ้าอาหารเกิดเสียเชื้อราจะทำให้ความหนาแน่นความหนาแน่นภายในขวดสูงขึ้นเป็นผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของอาหารมีค่าเปลี่ยนไป

การที่ให้การวัดค่าความนำไฟฟ้านี้ให้ได้ผลที่ดีนั้นควรจะใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้สัมผัสกับสถานะทั้งสองแผ่นให้มีขนาดใหญ่ หากพิจารณาลักษณะของวงจรไฟฟ้าการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของขวดพลาสติกในรูปที่ 2.17 จะพบว่าสามารถแทนวงจรระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 2 แผ่นได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 2 แผ่นจะถูกกั้นออกจากอาหารด้วยชั้นพลาสติก ซึ่งจะมีผลทำให้เปรียบเสมือนว่ามีค่าความตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 และจะมีค่าความต้านทาน R_{c1} และ R_{c2} ต่อกันอยู่โดยค่าความต้านทานนี้เป็นค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นมาจากอาหาร (R_{food}) และจะเปลี่ยนไปตามลักษณะของขวด



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของวงจรสมมูลไฟฟ้า

ที่วัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดสองแผ่นจากรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่ใหญ่กว่าค่าของตัวเก็บประจุจะมีค่าที่โตกว่าและจะมีค่าของความต้านทานที่น้อยกว่า ส่วนถ้าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มากกว่าจะมีค่าความต้านทานที่มากกว่า

2.5.3 การทดลองกับกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ (TBA)

ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ถูกวัดด้วยเครื่อง HP 4194A Impedance Analyzer กล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์แบบทีบีเอ ขนาดจ 1 ลิตร ใช้บรรจุน้ำเกลือเพื่อทำการตรวจสอบ ค่าความนำไฟฟ้า น้ำเกลือจะผันแปรค่าภายในช่วงจาก 0.05 S/m ถึง 2.5 S/m

การประเมินค่าของความไวของวิธีการตรวจสอบ จะใช้เปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้อ้างอิงในการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า σ กับค่าความต้านทานที่วัด R เมื่อนำค่ามาใช้ในวิธีนี้ จะได้ $R = 1/4\pi\sigma = 0.282/\sigma \cdot \sqrt{S}$ เมื่อ r คือรัศมี และ $s = 4\pi r^2$ คือพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดเล็กทรงกลม

ในการหาค่าของความสัมพันธ์ของ R_{Σ} (σ) ที่ตรงกับผลการทดลองโดยใช้วิธีโพลิโนเมียลเคิร์ฟฟิตติง (Polynomial Curve Flitting) ด้วยวิธีลีสตแควร์ (Least-Square) ความสัมพันธ์เอาสมการอนุพันธ์อันดับสองทำให้ได้ผลตรงกับผลการทดลอง ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด $\pm 1\%$ ดังสมการ

$$R_{\Sigma} = \frac{A}{\sqrt{S} \cdot \sigma} - \frac{B}{\sqrt{S} \cdot \sigma^2} + C \quad (2.5.1)$$

จากสมการที่ (2.5.1) พารามิเตอร์ A B C ที่ใช้พิจารณาเมื่อป้อนความถี่พารามิเตอร์ C แทนค่าความต้านทานที่สูญเสียในชั้นพลาสติก R_{p1} เกิดขึ้นเมื่อความเหนียวนำไฟฟ้าของอาหารเป็นอนันต์

พื้นที่ผิว s ของขั้วอิเล็กโทรดเล็กขนาด 40 มิลลิเมตร คาบ พารามิเตอร์ A B C จะเปลี่ยนค่าตัวเองตามความถี่ซึ่งทำให้ความไวในการตรวจสอบแบบวิธีนี้ขึ้นกับความถี่

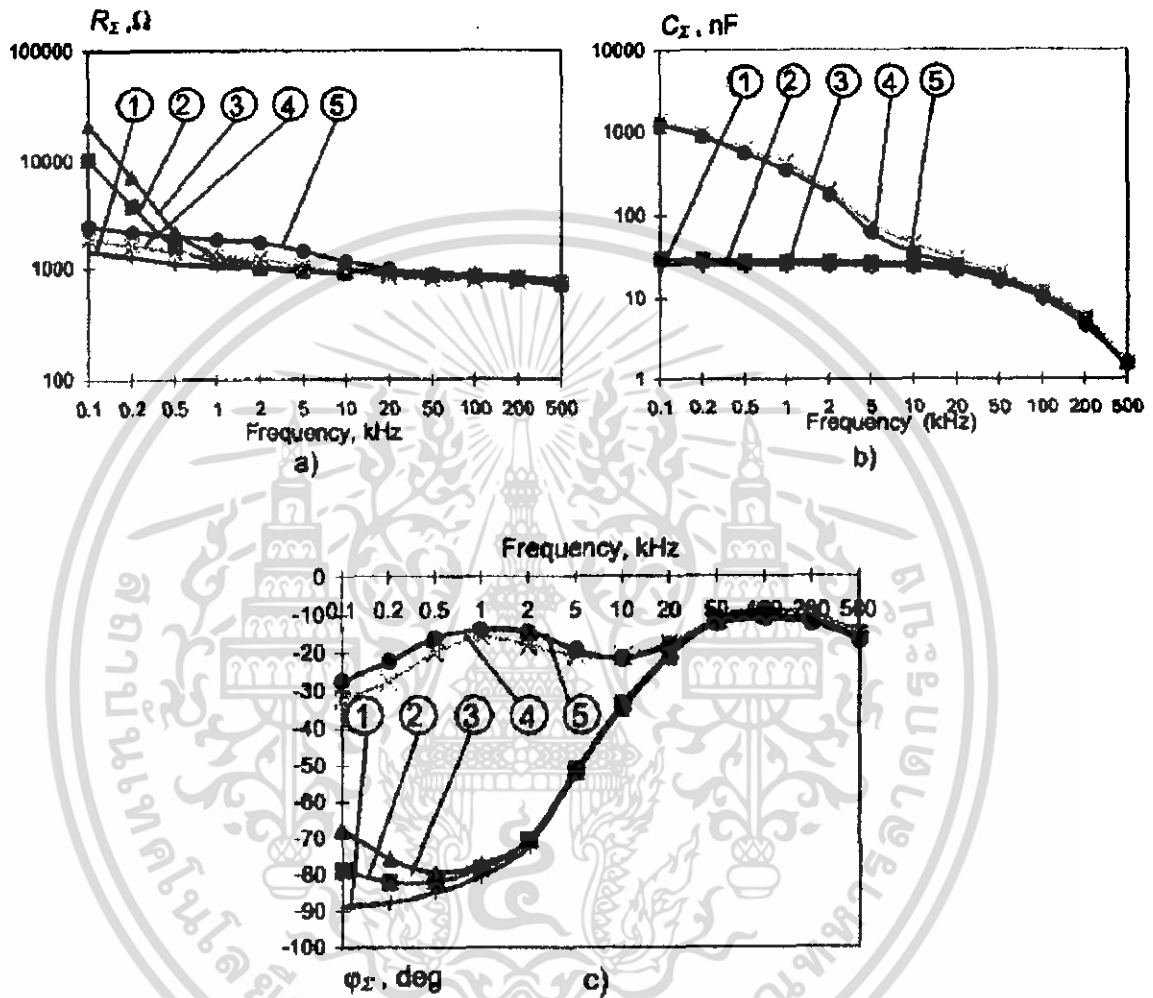
Frequency Parameter	50 kHz	100 kHz	200 kHz	500 kHz
A	0.389	0.387	0.384	0.385
$B \times 10^3$	0.507	0.58	0.942	2.61
C, Ω	1.77	0.85	0.455	0.16

ตารางที่ 2.4 ค่าของ A, B และ C ที่ความถี่ต่างๆ

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ชัดว่าวิธีการนี้จะได้ค่าความไวของค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของอาหารมีค่าความไวสูงสุด

การทดสอบความไวของวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบนี้กับกล่องบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆไป โดยการจำลองรูปทรงที่ต่างออกไปจากรูปทรงปกติโดยการใส่นมยูเอชที เมื่อรูปทรงต่างๆ ที่นำมาจำลองนี้มีเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ระยะห่างจากขั้วอิเล็กโทรดมากกว่า 30 มิลลิเมตร ผลของการวัดที่เปลี่ยนแปลงจะน้อยกว่า 1% ไม่ว่าจะกรณีใดๆ พงสน อักทงห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบวิธีการร้วภายในที่ผ่านชั้นพลาสติกภายใน โดยใช้กล่องกระดาษแบบที่บีเออันหนึ่ง บรรจุน้ำอีกอันบรรจุขมูเอซที่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนค่า R_{Σ} และ C_{Σ} พื้นที่ปัดคือเล็กโทรดมีขนาด 70 ตาราง มิลลิเมตรซึ่งจะห่างจากขั้วอิเล็กโทรดเล็ก 5 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตรตามลำดับ



รูปที่ 2.19 แสดงค่าความถี่ที่มีผลต่อค่า R_{Σ} และ C_{Σ} และ $\phi_{\Sigma} = \arctan(-1/R_{\Sigma}C_{\Sigma})$ ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ Z_{Σ} เพื่อกล่องบรรจุน้ำภายใน

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ที่ความถี่ต่ำควรวัดค่า คาปาซิแตนซ์ C_{Σ} จะขึ้นกับพื้นที่ผิวของรูร้วอย่างมากและมีผลขึ้นกับระยะห่างจากขั้วอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่ทำการวัดจะขึ้นอยู่กับทั้งพื้นที่ผิวร้วและระยะทางจากขั้วอิเล็กโทรด

เมื่อรวมข้อมูลจาก R_{Σ} และ C_{Σ} ก็จะทำให้รู้ว่าขนาดพื้นที่ผิวของรูร้วเท่าไรและระยะห่างจากขั้วอิเล็กโทรดเล็กเท่าไร ค่า Phase Shift ϕ_{Σ} ของ ค่าอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยค่า R_{Σ} และ C_{Σ} ของการร้วจากสิ่งเหล่านี้ทำให้สามารถพิจารณาค่าที่ดีที่สุดในการตรวจจบบรรจุร้วภายใน ในช่วงกว้าง ๆ ทั้งขนาดรูร้วและตำแหน่งการร้วที่สวจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 การทดลองกับกล่องบรรจุอาหารแบบขวดพลาสติก

เริ่มต้นประเมินว่าการเบี่ยงเบนของผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยนอมูเอชที ที่ปิดคเชื้อในขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ที่ 3 ความถี่คือ ที่ความถี่ 1 MHz , 5 MHz และ 10 MHz โดยใช้เครื่อง HP 4192A Impedance Analyzer ค่า คาปาซิแตนซ์ C_2 ที่วัดได้เท่ากับ 220 pF และมีช่วงความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นมาจากความบางของผนังขวดและมาจากแรงกดของขั้วอิเล็กโทรดที่ประกบขวด ส่วนค่าความต้านทาน R_2 นั้นจะมีค่าประมาณ 50 Ω ทั้งนี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความถี่ที่ใช้ดังตาราง

Frequency	1 MHz	5 MHz	10 MHz
Average value, Ohms	53.64	52.92	51.89
Std. deviation, Ohms	0.30	0.20	0.21
Avg deviation, Ohms	0.24	0.15	0.16

ตารางที่ 2.5 แสดงผลของค่าความต้านทาน R_2 ของค่าอิมพีแดนซ์ ที่วัดได้

เมื่อเพิ่มความถี่ค่าจะเกิดความเบี่ยงเบนน้อยเนื่องมาจากค่าของ R_{C1} และ R_{C2} ที่ไม่เสถียรภาพทำให้ค่าที่วัดมีค่าลดลง

ที่ความถี่มากกว่า 10 MHz ปัจจัยที่เพิ่มเข้ามาเช่น ค่า C แผลง ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และความแม่นยำของเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยลงสิ่งเหล่านี้เป็นผลรวมให้ผลที่ได้มีการเบี่ยงเบนได้

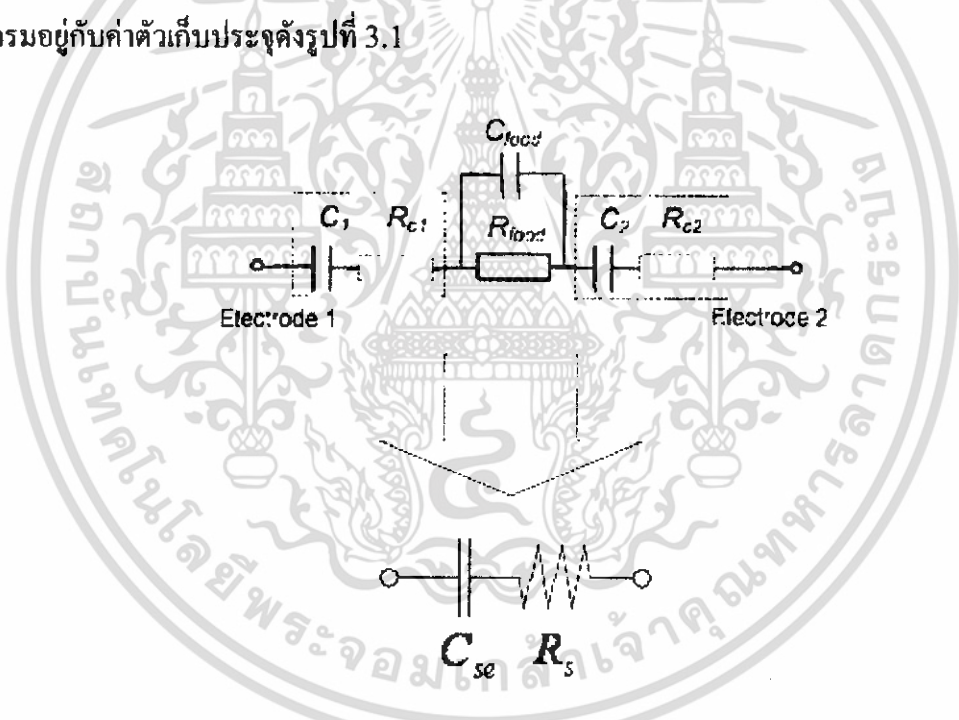
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบวงจร

3.1 แนวคิดในการออกแบบ

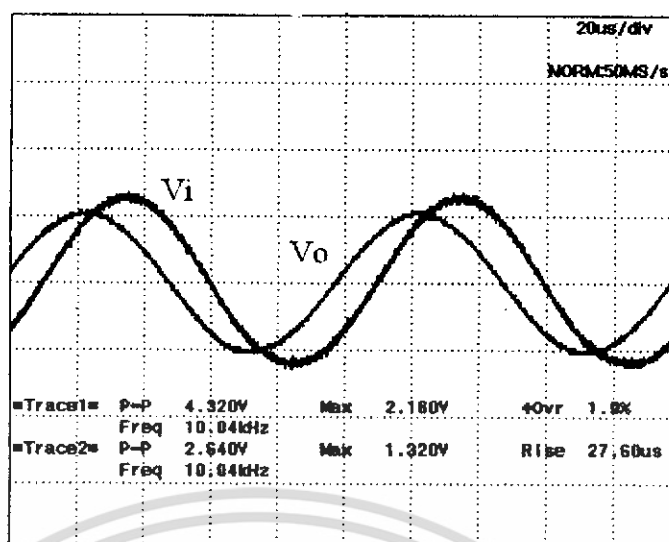
ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบวงจรนี้จะเป็นเพียงการดำเนินงานและการออกแบบวงจรกล่องบรรจุอาหาร(กล่องนม) ที่เป็นกล่องแบบขวดพลาสติกเท่านั้น ส่วนการการดำเนินงานและการออกแบบวงจรกล่องบรรจุอาหารแบบทีบีเอ (TBA-Tetra Brik Aseptic) จะไม่กล่าวถึง

จากทฤษฎีข้างต้น จะเห็นว่ากล่องนมแบบขวดพลาสติก(รวมทั้งนมและแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ด้วย) จะประกอบด้วย ค่าความต้านทาน และค่า ความเก็บประจุ ต่ออนุกรมหรือขนานกันอยู่ ซึ่งถ้าหากรวมค่าความต้านทานทุกตัวเข้าด้วยกันเป็น R_{Σ} หรือเป็น R_s และตัวเก็บประจุทุกตัวเข้าด้วยกันเป็น C_{Σ} หรือเป็น C_{se} แล้ว จะพบว่าวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของกล่องนมแบบพลาสติกนี้จะเสมือนกับว่ามีค่าความต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับค่าตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ ค่า R และ C

ดังนั้น จากวงจรในรูปที่ 3.1 ถ้าหากมีการป้อนสัญญาณไซน์ ผ่านวงจรที่มี R C ต่ออยู่ในวงจรจะทำให้เอาต์พุตที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากอินพุตดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบสัญญาณ V_i กับ V_o

ดังนั้นในวงจรอย่างง่าย ถ้ามี R C ที่ไม่ทราบค่าต่ออยู่ในวงจร หากต้องการหาค่าของ R C ที่ไม่ทราบค่านี้ ถ้าสามารถวัดค่าเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากอินพุตได้ ก็จะสามารถทราบค่า R C ที่ไม่ทราบค่าได้

แล้วในการหาค่า R C ของนมิยูเอชที ในกล่องพลาสติก ควรจะออกแบบอย่างไรและเลือกวิธีใดที่จะนำมาใช้ทำการทดลอง เพื่อที่จะให้ได้ค่าที่ถูกต้อง มีความละเอียด และตรงกับหลักทฤษฎีมากที่สุด

3.2 การศึกษาออกแบบวงจรที่ใช้ตรวจจับสัญญาณเอาต์พุต

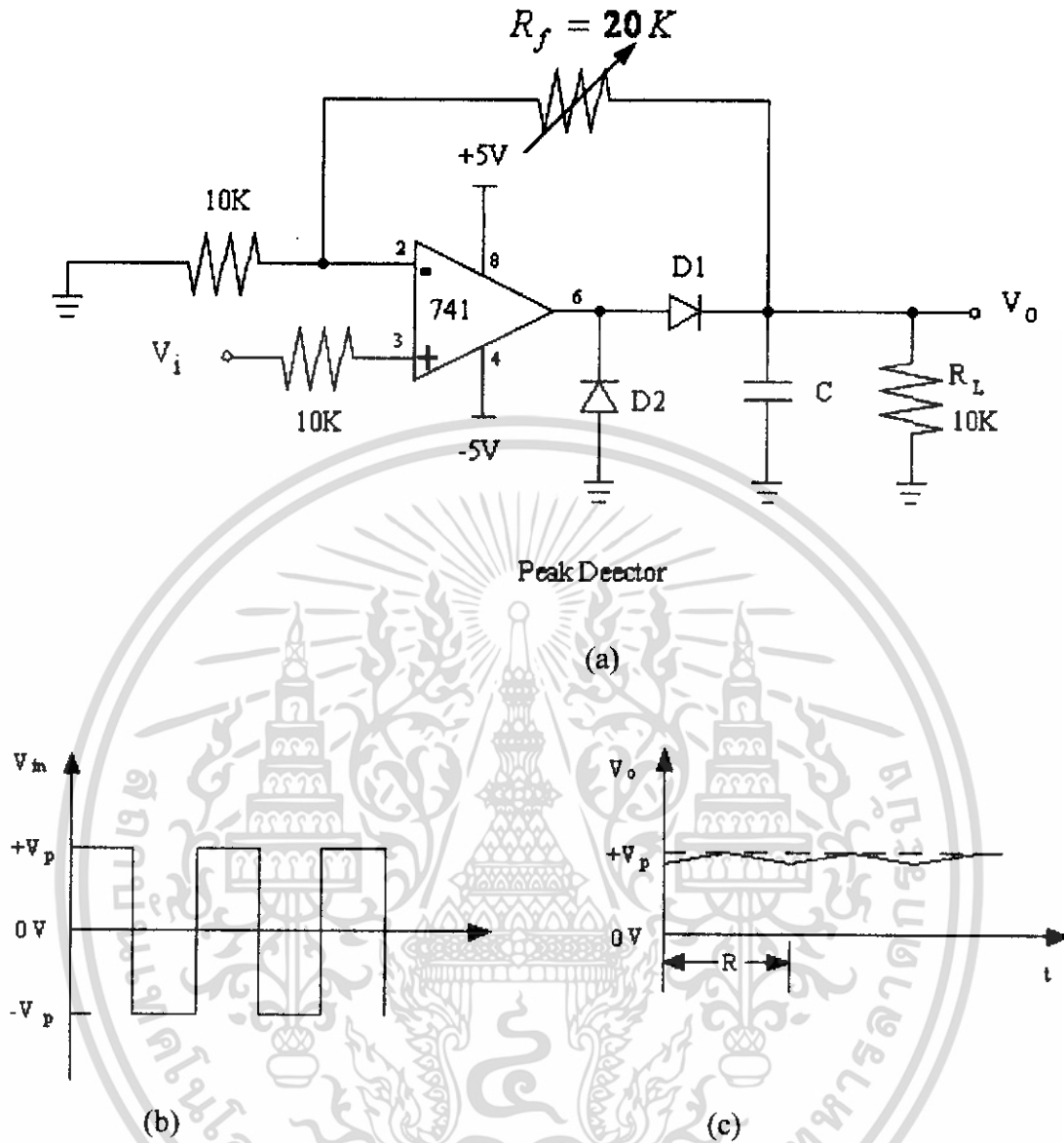
ค่าที่จะต้องใช้ในการนำไปประมวลผลนั้นประกอบด้วย สัญญาณเอาต์พุต จากวงจรในหัวข้อที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย V_o กับ มุมเฟสที่เปลี่ยนไปของเอาต์พุตเทียบกับอินพุต ซึ่งมีวงจรที่จะต้องใช้ ดังนี้

3.2.1 วงจรตรวจจับค่ายอด (Peak Detector)

สัญญาณนอนไซน์ซุชอยคอล (Nonsinusoidal) โดยทั่วไปเช่น สัญญาณ สี่เหลี่ยม (Square) สามเหลี่ยม (Triangular) สัญญาณฟันเลื่อย (Saw Tooth) สัญญาณพัลส์ (Pulse Waves) เป็นต้นเฮซีโวลต์มิเตอร์ (AC Voltmeter) จะไม่สามารถวัดสัญญาณนอนไซน์ซุชอยคอลเหล่านี้ได้ เนื่องจากว่าถูกออกแบบมาเพื่อวัดค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ดังนั้นในกรณีที่ต้องการจะใช้ค่ายอด (Peak) ในการคำนวณจึงต้องใช้วงจรนี้ในการหาค่า

หลักการโดยทั่วไปของการหาค่ายอดนั้น โดยมากคือจะแปลงสัญญาณซิกลบบให้มาอยู่ฝั่งบวก หรือว่าตัดซิกลบบทิ้งโดยใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier) แล้วใช้ ตัวเก็บประจุ C ต่อคร่อมที่เอาต์พุตลงกราวด์ เพื่อทำการเก็บประจุในช่วงที่สัญญาณอินพุตเป็นซิกลบบ และทำการคายประจุเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นซิกลบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 (a) วงจรพีคดีเทคเตอร์ (Peak Detector)
 (b) สัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม
 (c) สัญญาณเอาต์พุต

เมื่อสัญญาณซีกบวกของ V_{in} เข้าในวงจร V_{out} ที่ออกจากออปแอมป์ จะเป็น $+V_p$ ทำให้ไดโอด D1 นำกระแสชาร์จประจุให้กับ C ให้เอาต์พุตออกมาเป็น V_i โดยมีอัตราขยายเท่ากับ $1 + R_f / 10 \text{ k}\Omega$ อัตราขยายที่ใช้ที่นี่เพื่อปรับแก้ ค่าความผิดพลาด (Error) ที่ออกมาทางเอาต์พุตที่เกิดจากโวลต์ดรอปใน ไดโอด ให้เอาต์พุตที่ออกมามีค่าตรงกับอินพุตและเมื่อสัญญาณซีกลบของ V_{in} เข้าในวงจร V_{out} ที่ออกจาก ออปแอมป์จะเป็น $-V_p$ ไดโอด D1 จะเป็นรีเวอร์สไบแอส (Reverse Bias) ทำให้ไม่นำกระแส ทำให้ C คายประจุผ่าน R_L ให้ค่าเอาต์พุตออกมา

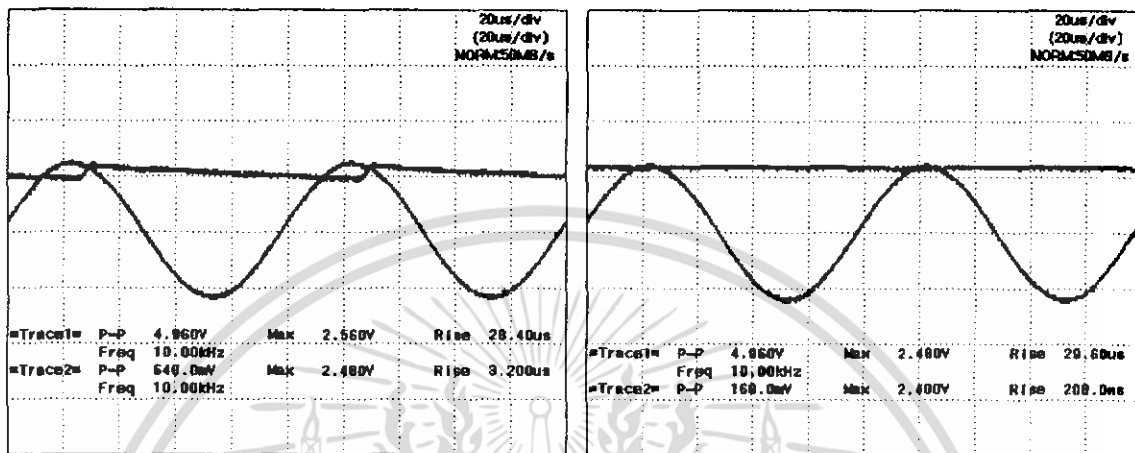
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ CR_L คือ Discharge Time Constant

โดย $CR_L \geq 10T$

R_L คือ ค่าความต้านทานโหลด

T คือ คาบของสัญญาณอินพุท



(a)

(b)

รูปที่ 3.4 (a) สัญญาณเอาต์พุท เทียบกับอินพุท โดยใช้ $C = 0.1 \mu\text{F}$

(b) สัญญาณเอาต์พุท เทียบกับอินพุท โดยใช้ $C = 1 \mu\text{F}$

ถ้า R_L มีค่าน้อยๆสมการนี้จะไม่สามารถใช้ได้ ต้องใช้วงจรมัฟเฟอ (Buffer) ต่อบetween C กับ R_L แทน

สำหรับในกรณีที่ต้องการค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำก็สามารถใช้ออปแอมป์ไฮสปีด (High Speed) ได้ เช่น uA771 หรือ uA714 ในกรณีที่ต้องการตรวจจับค่ายอด (Peak V_{in}) ในซีกกลับนั้นทำได้โดยการรีเวอร์ส (Reverse) ไดโอด D_1 กับ D_2

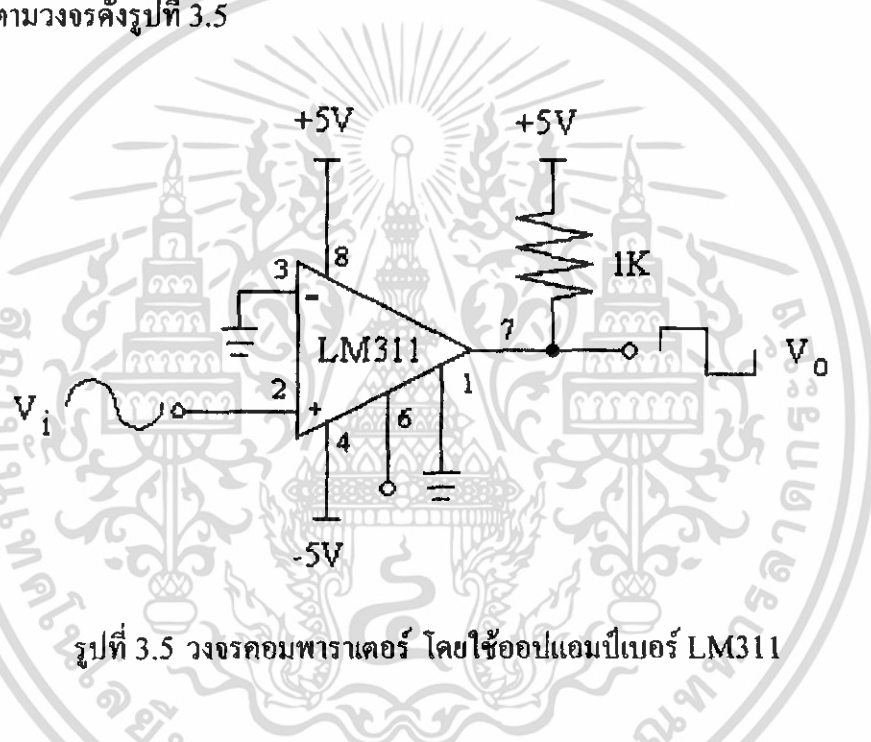
3.2.2 วงจรแปลงสัญญาณ ไซน์เป็นสี่เหลี่ยม

ในการเปรียบเทียบระดับลอจิกที่เป็นออน-ออฟ (On-Off) ที่มีความจำเป็นต้องใช้สัญญาณ ดิจิตอล นั้น ถ้าหากว่าสัญญาณที่จะมาทำการทางลอจิกนั้น ไม่ได้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการแปลงสัญญาณจากสัญญาณเหล่านั้นมาเป็นสี่เหลี่ยม โดยใช้วงจรรวมพาราเตอร์ (Comparator) โดยทั่วไปจะเป็น ออปแอมป์จากหลักการของ ออปแอมป์ในทางอุดมคติ คือ $V_o = A_v(V^+ - V^-)$ ซึ่ง A_v คือ เกนของ ออปแอมป์มีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น เอาต์พุทที่ออกมาจะมีค่าขึ้นกับ สัญญาณ V^+ กับ V^- ที่จ่ายให้กับ วงจร โดยจะมีค่ามากที่สุด น้อยสุด เท่ากับ แรงดัน V_{cc} , $-V_{cc}$ ที่จ่ายให้กับ ออปแอมป์เช่น ถ้าแรงดันที่จ่ายให้กับ ออปแอมป์เป็น 5V กับ 0V เมื่อ $V^+ > V^-$ จะได้ แรงดันเอาต์พุท เป็น 5V และเมื่อ $V^- > V^+$ จะให้

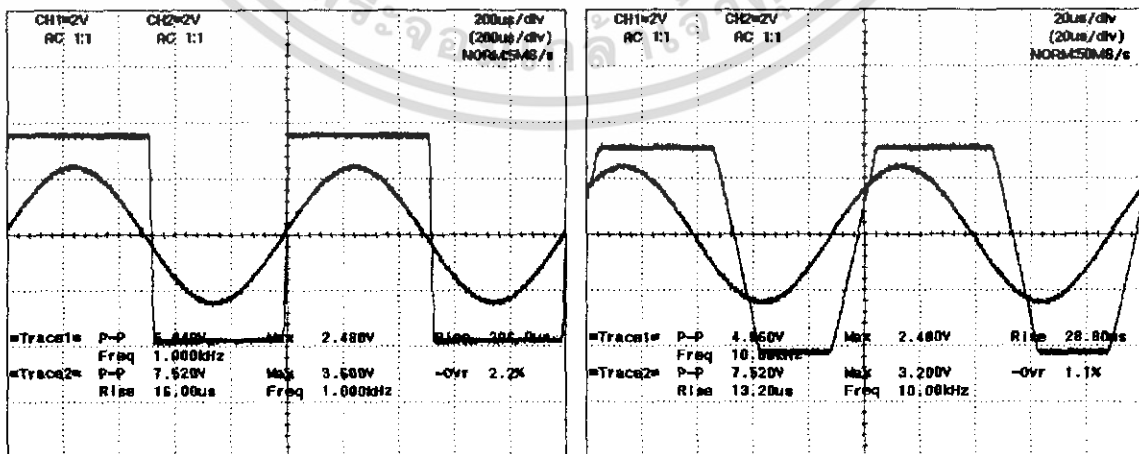
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาท์พุทเป็น 0V ซึ่งในการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) จะใช้การตรวจจับการตัด 0 (Zero Crossing) ของสัญญาณอินพุท คือจะให้แรงดันที่ V^- ต่อลงกราวด์ คือมีแรงดันเป็น 0 เมื่อสัญญาณ V^+ (V_i) เป็นบวก เอาท์พุทก็จะเท่ากับแรงดันสูงสุดที่จ่ายให้กับ ออปแอมป์และเมื่อ V^+ เป็น ลบ เอาท์พุทก็จะเท่ากับแรงดันต่ำสุดที่จ่ายให้กับวงจร

ออปแอมป์โดยทั่วไปสามารถใช้เป็นวงจรคอมพาราเตอร์ (Comparator) ได้ แต่ก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของออปแอมป์ เช่น ออปแอมป์ 741 สามารถใช้ได้ทั่วไปในกรณีที่ความถี่ไม่มาก (ประมาณ 1 kHz) เพราะว่าเมื่อความถี่มากขึ้น ออปแอมป์ 741 จะไม่สามารถเปลี่ยนสถานะได้เร็วพอก็จะทำให้เกิดมีไรซ์ไทม์ (Rise Time) มาก ไม่สามารถใช้ได้ จึงต้องใช้ใช้ออปแอมป์แบบไฮสปีด ที่สามารถเปลี่ยนสถานะได้เร็วพอที่มีความถี่สูงโดยไม่มี ไรซ์ไทม์ ออปแอมป์แบบไฮสปีด ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะเป็น ออปแอมป์เบอร์ LM311 ซึ่งต่อตามวงจรดังรูปที่ 3.5



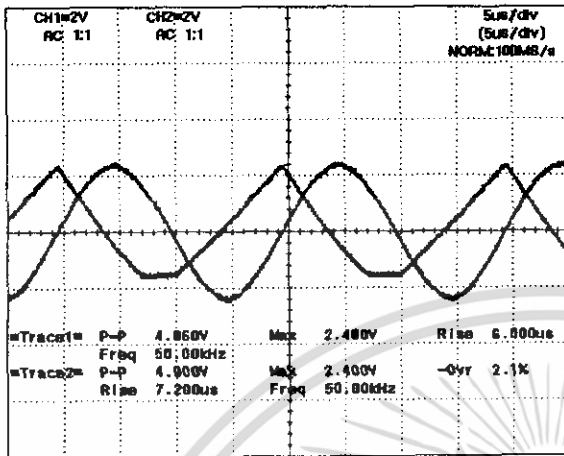
รูปที่ 3.5 วงจรคอมพาราเตอร์ โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM311



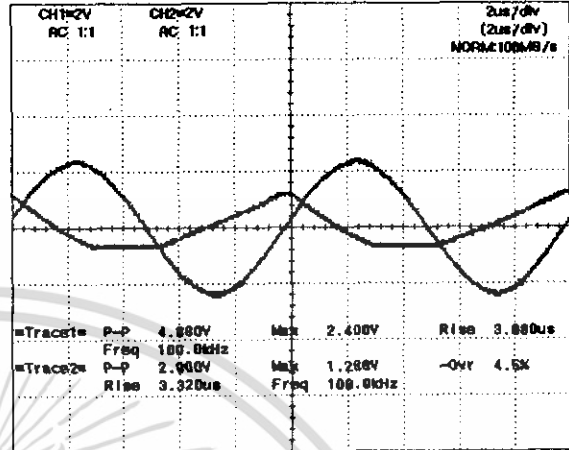
(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)

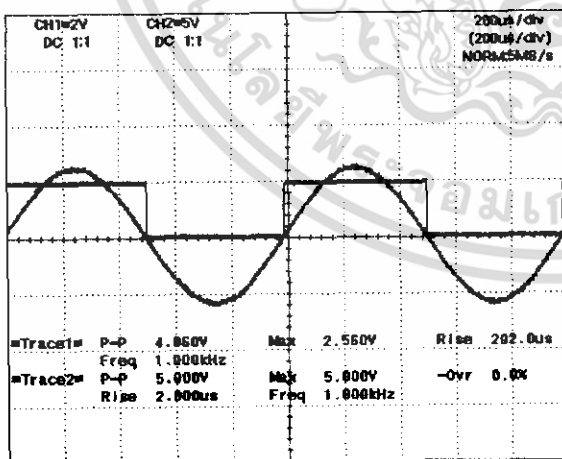
รูปที่ 3.6 รูปของสัญญาณไซน์แปลงเป็นสี่เหลี่ยมโดยใช้ ออปแอมป์เบอร์ 741

(a) ที่ความถี่ 1 kHz

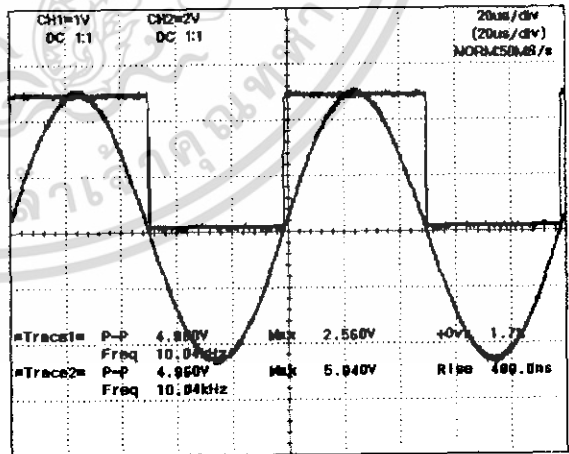
(b) ที่ความถี่ 10 kHz

(c) ที่ความถี่ 50 kHz

(d) ที่ความถี่ 100 kHz

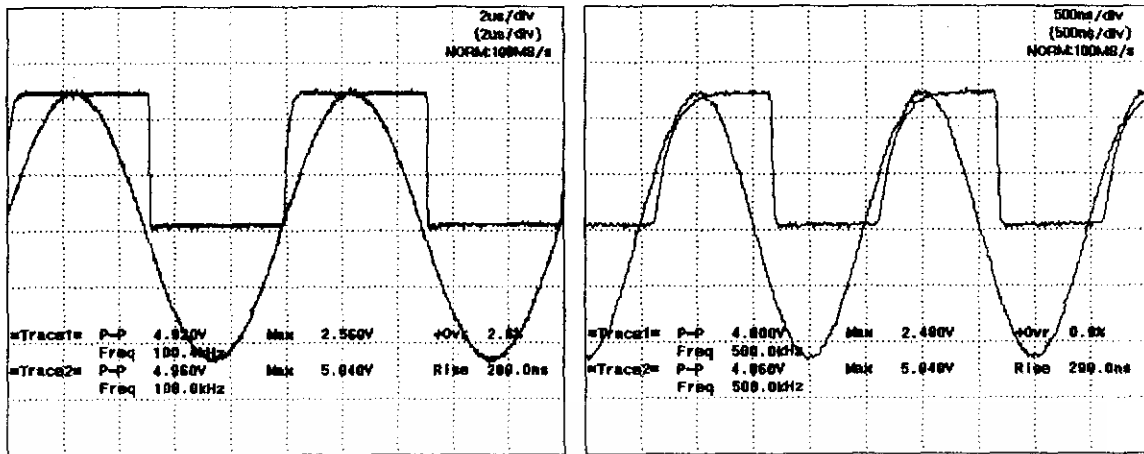


(a)



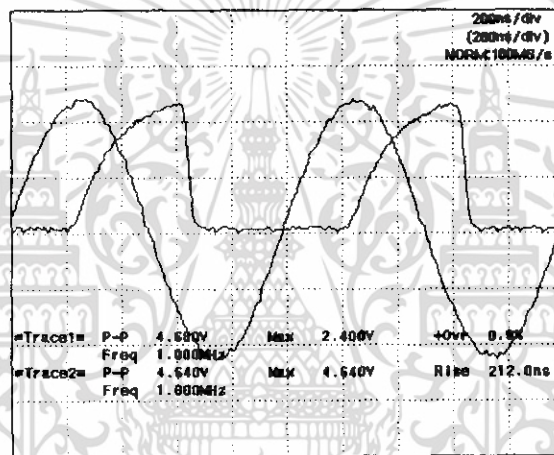
(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

(d)



(e)

รูปที่ 3.7 รูปของสัญญาณไซน์แปลงเป็นสี่เหลี่ยมโดยใช้ ออปแอมป์เบอร์ LM 311

- (a) ที่ความถี่ 1 kHz
- (b) ที่ความถี่ 10 kHz
- (c) ที่ความถี่ 100 kHz
- (d) ที่ความถี่ 500 kHz
- (e) ที่ความถี่ 1.0 MHz

วงจรนี้จะใช้ในการแปลงสัญญาณจาก ไซน์เป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งจะใช้แปลงทั้งสัญญาณอินพุต และ เอาท์พุตจากวงจรรูปที่ 3.5 เพื่อที่จะมาทำการเปรียบเทียบกัน โดยใช้ซอร์เกส (Xor gate) เพื่อหาค่าเฟสใน วงจรถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วงจรตรวจจับเฟส (Phase Detector)

หน้าที่ของวงจรตรวจจับเฟส จะสร้างแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่มีความสัมพันธ์กับความต่างเฟส (Phase Difference, θ) ระหว่างสัญญาณอินพุตสองตัว ซึ่งหลักการของวงจรตรวจจับเฟสเกือบทั้งหมด จะมีทั้งแบบ อนุalog และแบบดิจิตอล โดยในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะแบบ ดิจิตอล

วงจรตรวจจับเฟส แบบดิจิตอล ทั่วไปมี 3 แบบ คือ

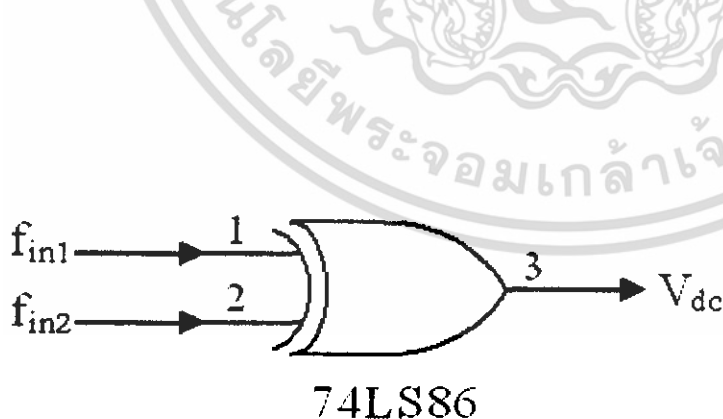
1. Exclusive-OR Gate Phase Detector
2. Edge-Triggered Phase Detector
3. Monolithic Phase Detector (Type 4044)

1. Exclusive-OR Gate Phase Detector

จากรูปที่ 3.8 (a) แสดงถึงวงจรตรวจจับเฟสแบบเอกซ์คลูซีฟออร์เกต (Exclusive-OR Gate) จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตที่ออกจากเอกซ์คลูซีฟออร์เกตจะเป็นไฮ (High) ก็ต่อเมื่อ f_{in} หรือ f_{out} เป็นไฮ เท่านั้น

รูปที่ 3.8 (b) จะเห็นว่า f_{in} นำ f_{out} เป็นมุม θ (phi) องศา ซึ่งก็คือ มุมต่างเฟสระหว่าง f_{in} กับ f_{out} เป็นมุม θ องศา ค่าเฉลี่ยเอาต์พุตโวลต์เดจ (DC Output Voltage) ที่ออกจากเอกซ์คลูซีฟออร์เกตจะมีความสัมพันธ์ กับความต่างเฟสของ 2 อินพุต ระหว่าง f_{in1} กับ f_{in2} รูปที่ 3.8 (c) จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยเอาต์พุตโวลต์เดจ จะมีค่าสูงสุดเมื่อความต่างเฟสคือ π เรเดียน หรือ 180° ซึ่งจะได้ ค่าความชันของกราฟจาก $0-\pi$ เรเดียน คือ V_{cc}/π โดยที่ V_{cc} คือซัพพลายโวลต์เดจ (Supply Voltage) ของเอกซ์คลูซีฟออร์เกต

โดยทั่วไปแล้วเอกซ์คลูซีฟออร์เฟสดีเทคเตอร์ (XOR Phase Detector) จะใช้กับสัญญาณ ที่เป็นสี่เหลี่ยม หรือสัญญาณ ดิจิตอล



Truth table

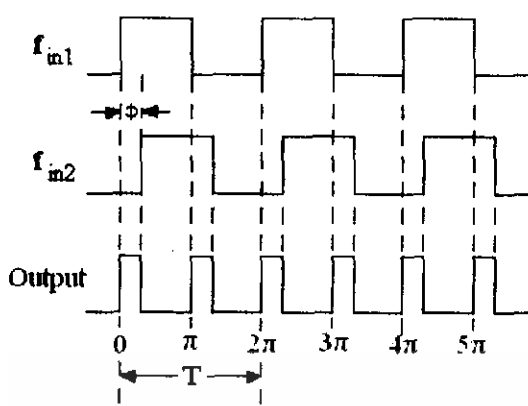
Input		Output
A	B	Y
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	L

L = Low

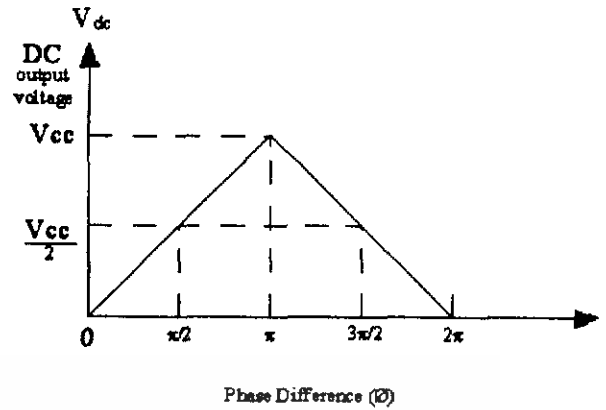
H = High

(a)

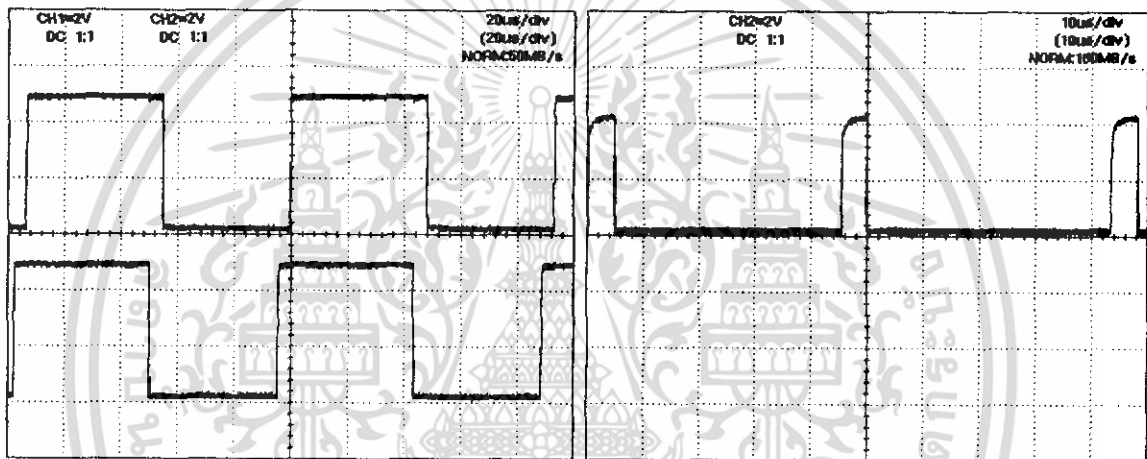
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

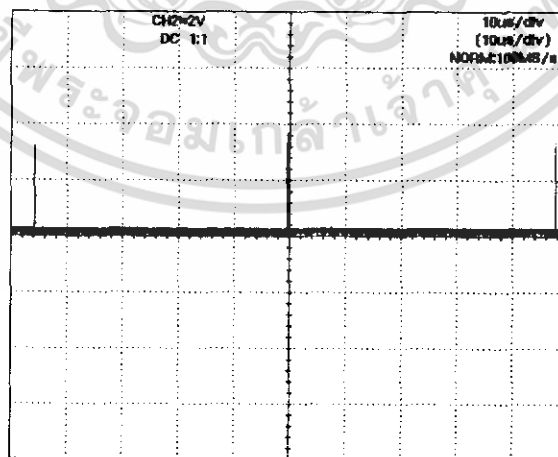


(c)



(d)

(e)



(f)

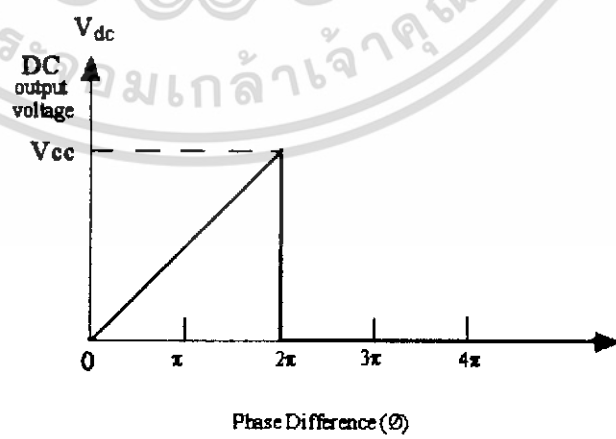
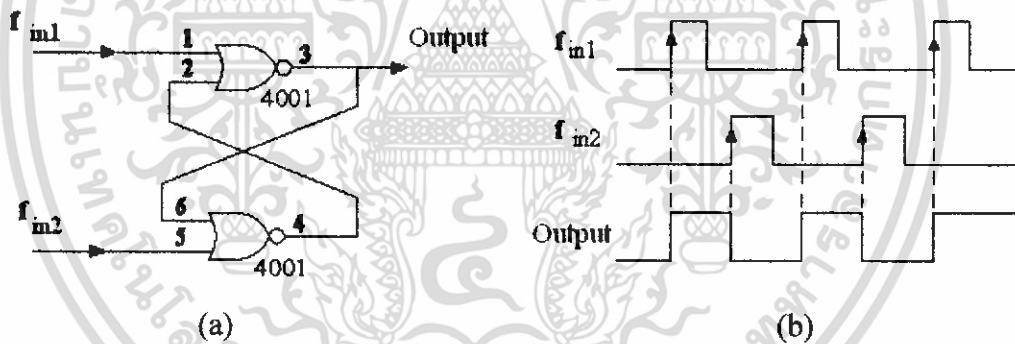
รูปที่ 3.8 (a) Exclusive – OR Phase Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (b) สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต
- (c) แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยเปรียบเทียบกับความต่างเฟสระหว่าง f_{in1} กับ f_{in2}
- (d) สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน
- (e), (f) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเอ็กซ์คลูซีฟออร์เฟสดีเทคเตอร์

2. Edge-Triggered Phase Detector

วงจรตรวจจับเฟสแบบนี้จะใช้อาร์เอสฟลิปฟล็อพ (R-S (Set-Reset) Flip-Flop) ในที่นี้ขอยกตัวอย่างอาร์เอสฟลิปฟล็อพที่ใช้ NOR Gate (CD4001) จากรูปที่ 3.9 ค่าเอาต์พุตที่ออกมาจะเกิดจากการตรวจจับขอบขาขึ้นของสัญญาณอินพุต โดยที่ค่าดีซีเอาต์พุตโวลต์เดจ (รูปที่ 3.9 (c)) จะมีค่าแปรผันตามความต่างเฟสของสัญญาณ f_{in1} กับ f_{in2} จาก $0-2\pi$ เรเดียน หรือ 360° เฟสดีเทคเตอร์แบบนี้มีข้อดีคือสามารถตรวจจับความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตที่ไม่จำเป็นต้องมีควิตซ์ไซเคิล 50% ได้ และก็จับความต่างเฟสของสัญญาณได้ดีกว่าแบบเอ็กซ์คลูซีฟออร์ด้วย



(c)

รูปที่ 3.9 (a) R-S Flip-Flop โดยใช้ NOR Gate CD4001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) เอาท์พุทที่เกิดจากความต่างเฟสของสอง อินพุท

(c) ค่าคิซีเอาท์พุทโวลต์เคจทีแปรผันตามมุมเฟสของ f_{in1} กับ f_{in2}

3. Monolithic Phase Detector (Type 4044)

วงจรถววจับเฟสแบบนี้จะอยู่ในรูปของไอซี เช่น ซีโมสเบอร์ 4044 ซึ่ง วงจรถววจับแบบนี้จะช่วยแก้ปัญหาที่เกิดจากคิวิตีไซเคิลของสัญญาณ อินพุทได้ โดยวงจรถววจับแบบนี้จะสามารถตรวจจับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดหรือคิวิตีไซเคิลต่างๆกันได้ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการความแม่นยำในการตรวจจับ เอาท์พุทที่ออกมาสามารถบอกได้ทั้งเป็นมุมแลค (lag) หรือ มุมลีด (Lead) วงจรถววจับเฟสแบบนี้จึงดีกว่า ทั้งแบบเอ็กซ์คลูซีฟออร์และ แบบฟลิปฟลอป ไอซี (Flip-Flop IC) ชนิดนี้ส่วนมากจะใช้ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเฟสลอคลูป (Phase Lock Loop)

จากวงจรถววจับเฟสทั้งสามแบบจะเห็นได้ว่า แบบที่สามจะดีที่สุด แต่ในที่นี้จะเลือกใช้แบบเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกทในการตรวจจับเฟสเนื่องจากว่า ง่าย สะดวก และให้สัญญาณเอาท์พุทที่ง่ายในการทำการตรวจสอบด้วย

3.3 การนำสัญญาณเอาท์พุทที่ตรวจจับได้มาประมวลผล

การประมวลผลสัญญาณนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 สัญญาณที่จะนำมาประมวลผลนั้นคือสัญญาณ ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณผลหาค่า R และ C ที่ไม่ทราบค่ามันเอง ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนๆดังนี้

3.3.1 สัญญาณจากวงจรถววจับค่ายอด

(วงจรรูปที่ 3.3) สัญญาณเอาท์พุทที่เข้ามาเป็นสัญญาณอนาลอก ในการจะใช้ประมวลผลนั้นจะต้องการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลก่อน จึงจะใช้ฟังก์ชันในพิก (PIC) ในการทำการแปลงสัญญาณได้ซึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 จะมีโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีความละเอียดถึง 10 บิต (แสดงได้ 1024 ค่า) ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ละเอียดถึง $V_{ref}/1023 = 0.0048828125$ โวลต์/ค่า ซึ่งค่าดิจิตอลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แปลงและคำนวณออกมาได้ก็คือค่ายอดนั่นเอง

3.3.2 สัญญาณจากวงจรถววจับเฟส

จากเอาท์พุทที่ออกมาจากเอ็กซ์คลูซีฟออร์เฟสดีเทกเตอร์ซึ่งจะเป็นสัญญาณพัลส์โดยมีความกว้างของพัลส์เท่ากับความต่างเฟสของสองสัญญาณ อินพุท การวัดความกว้างของพัลส์นี้จะ

ใช้หลักการอน-ออฟของสัญญาณ โดยใน ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 จะมี ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ (Timer/Counter) ให้ใช้งานได้มากถึง 3 ตัว คือ

Timer0 เป็นตัวตั้งเวลาและนับ ขนาด 8 บิต และมีพรีสเกลเลอร์ (Prescaler) ขนาด 8 บิต

Timer1 เป็นตัวตั้งเวลาและนับ ขนาด 16 บิต และมีพรีสเกลเลอร์(Prescaler)ขนาด16 บิต

Timer2 เป็นตัวตั้งเวลาและนับ ขนาด 8 บิต

ดังนั้นเมื่อมีพัลส์เข้ามาและมีการอน-ออฟของสัญญาณก็จะไทเมอร์ในโหมดเคาน์เตอร์ นับเวลาที่ใช้ในการอนของสัญญาณก็จะ ได้เวลาของมุมต่างเฟสแล้วเอาค่าที่ได้ไปหาค่ามุมเฟส ต่อไป

มุมเฟสที่ได้จากการนับของคอนโทรลเลอร์จะเป็นหน่วยเวลา (sec) ซึ่งต้องทำการ เปรียบเทียบกับคาบของสัญญาณอินพุตเพื่อจะทำการแปลงเป็นมุม ซึ่งความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ ใช้ คือ 10kHz มีคาบคือ 100 us ดังนั้น จะได้มุมเฟส คือ $\theta = [\text{ความกว้างพัลส์ (sec)}/100\text{us}] \times 2\pi$ หน่วยจะเป็นเรเดียน

3.3.3 หลักการทำงานของโปรแกรมเพื่อหาค่า R และ C

เมื่อมีแรงดันอนาล็อกอินพุตเข้าที่ขา RA0 ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะอ่านข้อมูลสัญญาณ ดิจิตอลที่ถูกแปลงมาจากสัญญาณอนาล็อก แล้วนำไปคำนวณค่าออกมา ก็จะได้ค่าแอมพลิจูดใน หน่วยของโวลต์มาเก็บไว้

เมื่อมีสัญญาณพัลส์อินพุตเข้าที่ขา RC0 เคาน์เตอร์ก็จะนับเวลาที่ใช้ในการอนของ สัญญาณพัลส์ออกมา จากค่าเวลาที่ได้นำไปคำนวณค่าออกมาในหน่วยของมุมเรเดียน

จากค่าแอมพลิจูดและมุมเรเดียนที่วัดได้นำไปหาค่า R และ C จากสมการที่ได้แสดงไว้ข้างต้นก็จะได้ค่า R และ C ดังนี้

$$\text{จากสมการ (3.1)} \quad R_s = (R_{fix} A_i / A_o) \cos \phi - R_{fix}$$

$$\text{จากสมการ (3.2)} \quad X_{se} = (R_{fix} A_i / A_o) \sin \phi$$

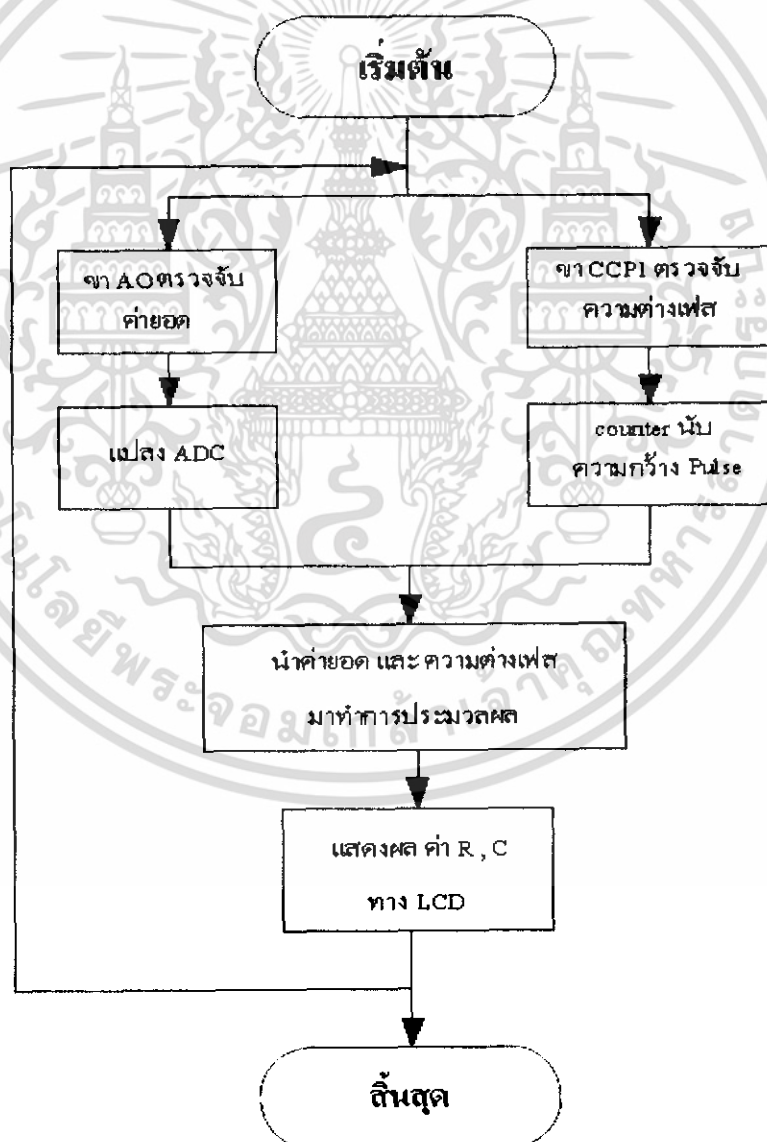
$$\text{ดังนั้น} \quad C = 1/2\pi f X_{se}$$

เมื่อ	A_i	=	แอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต $V_i = 2.5V$
	A_o	=	แอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต V_o (คำนวณได้จากคอนโทรลเลอร์)
	f	=	ความถี่ของสัญญาณ V_i ในที่นี้ใช้ 10kHz
	θ	=	มุมเฟสที่ขีฟไปจากสัญญาณอินพุต (คำนวณได้จาก คอนโทรลเลอร์)

เมื่อคำนวณค่าได้แล้วก็นำค่าที่ได้ไปแสดงผลทางแอลซีดีโมดูลขนาด 16 ตัวอักษรสองบรรทัด (16 Character 2 Line) ดังรูปที่ 3.10



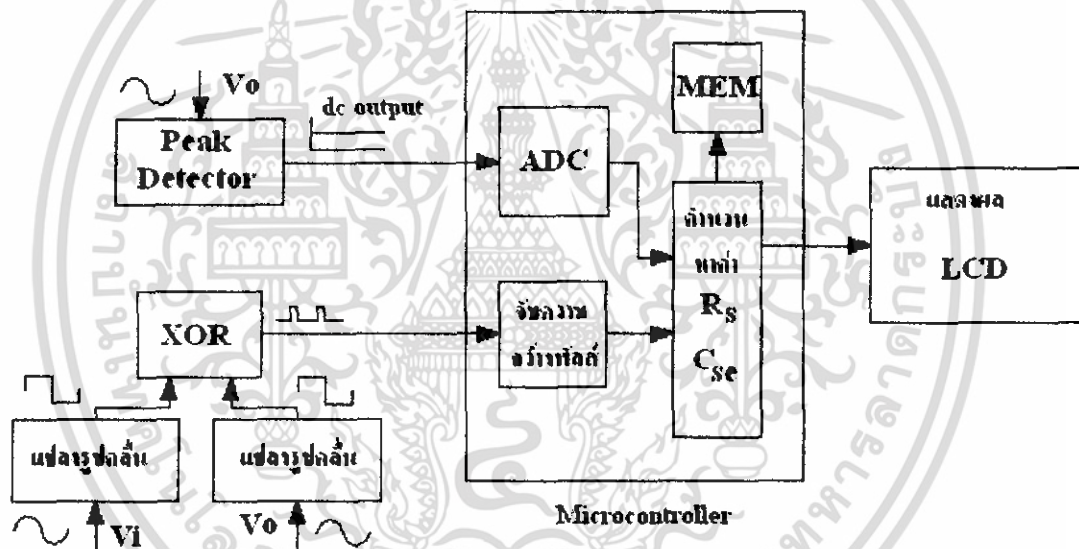
รูปที่ 3.10 การแสดงผลการคำนวณค่า R C ที่ไม่ทราบค่าทางโมดูลแอลซีดี



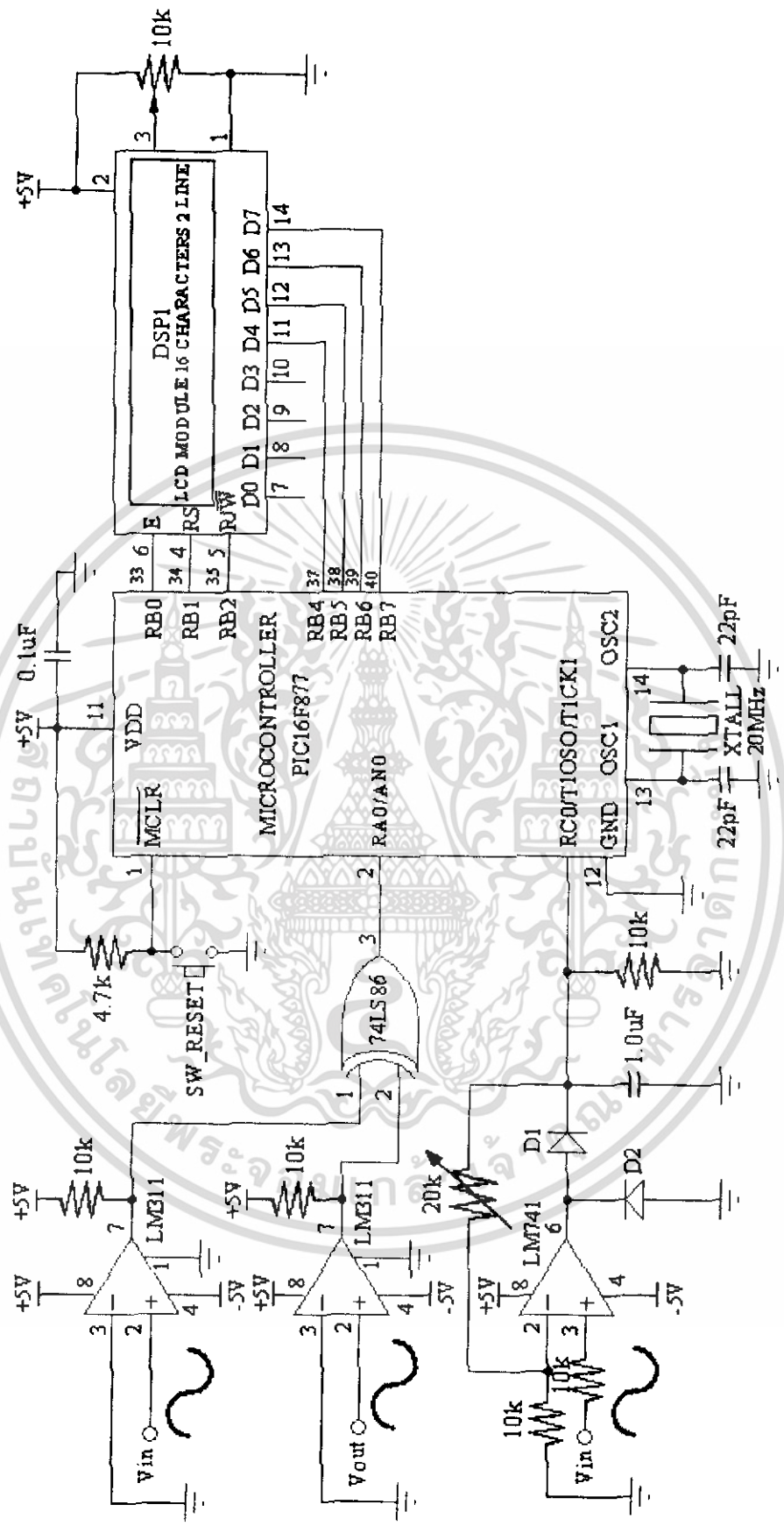
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.11 แผนผังการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทำงานของวงจรรวมทั้งหมด

จากรูปที่ 3.1 ถ้าหากมีการป้อนสัญญาณไซน์ ผ่านวงจรที่มี RC ต่ออยู่ในวงจรจะทำให้เอาต์พุตที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากอินพุตดังรูปที่ 3.2 คือ V_o พร้อมกับมุมเฟสที่ขีฟไป เอาต์พุตจากวงจรนี้จะส่งเข้าวงจรตรวจจับค่ายอด (Peak Detector) เพื่อวัด V_{peak} และ เข้าวงจรแปลงรูปคลื่นเพื่อแปลงสัญญาณจากไซน์เป็นสี่เหลี่ยม เพื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสี่เหลี่ยมของสัญญาณอินพุต ที่เรากำหนดขนาดและความถี่ไว้ โดยใช้ซอร์เกท (Xor Gate) ทำการเปรียบเทียบ ซึ่งเอาต์พุตที่ออกมา จะเป็นพัลส์มีความกว้างพัลส์เท่ากับความต่างเฟสของสัญญาณ V_i และ V_o ความกว้างของพัลส์นี้จะส่งเข้าคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการวัดค่าความกว้างพัลส์โดยใช้เคาน์เตอร์ ในการนับโดยสัมพันธ์กับความถี่คริสตัล (Crystal) แล้วเก็บค่าข้อมูลไว้เพื่อทำการคำนวณ ส่วนค่า V_{peak} ก็ส่งเข้าคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการแปลงจากสัญญาณอนาล็อก เป็น ดิจิตอลและเก็บค่าเพื่อทำการคำนวณหาค่า RC ที่ไม่ทราบค่า



รูปที่ 3.12 รายละเอียดการทำงานของวงจรทั้งหมด โดย V_i กับ V_o มาจากวงจรรูปที่ 3.2 หรือ รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.13 แสดงรูปรวมวงจรทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

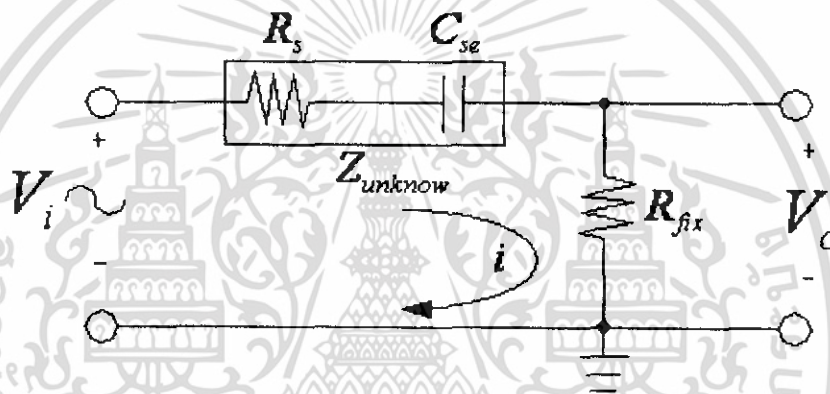
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การออกแบบวงจรที่ใช้ในการตรวจวัดหาค่า R C ที่ไม่ทราบค่า

ในการหาค่า R_s และ C_{se} ของนมิซูเอซที โดยใช้คาปาซิทีปเซ็นเซอร์ ทำการวัดค่า โดยการป้อนสัญญาณไซน์ ผ่าน R C ที่ไม่ทราบค่า แล้ววัดกระแสในวงจรโดยวัดสัญญาณเอาต์พุตที่คกคร่อม R ที่ทราบค่า สามารถทำได้ดังนี้

4.1 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่าแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน อย่างง่าย

จากรูปวงจรข้างต้น จะใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ช่วยในการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad V_i &= A_i \sin(\omega t) = A_i \angle 0 \\ V_o &= A_o \sin(\omega t + \phi) = A_o \angle \phi = A_o \cos \phi + A_o \sin \phi \cdot i \\ Z &= R_s - X_{se} i \quad \text{โดยที่} \quad X_{se} = 1/2\pi f C_{se} \\ V_o &= \frac{R_{fx} V_i}{(R_{fx} + Z)} \\ Z &= \frac{R_{fx} (V_i - V_o)}{V_o} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad R_s &= \text{Real}(Z) \\ X_{se} &= \text{Image}(Z) \\ C_{se} &= 1/2\pi f X_{se} \end{aligned}$$

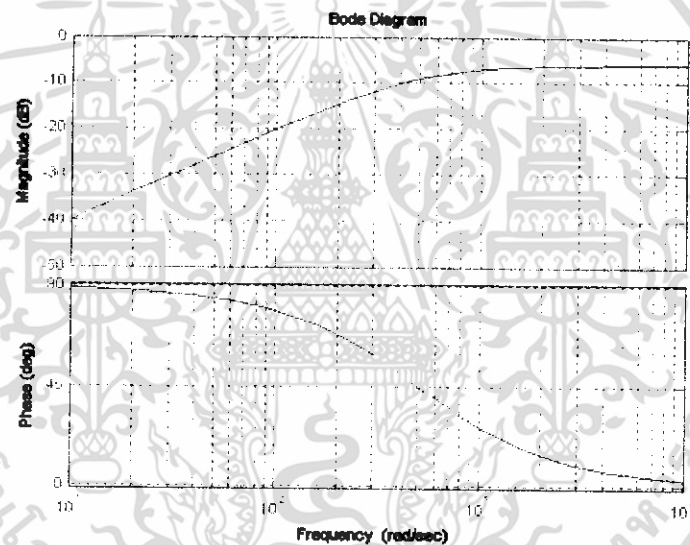
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ A_i = แอมพลิจูดของสัญญาณ V_i
 A_o = แอมพลิจูดของสัญญาณ V_o
 f = ความถี่ของสัญญาณ V_i ใช้
 \emptyset = มุมเฟสที่รีฟไปจากสัญญาณอินพุต

Transfer function:

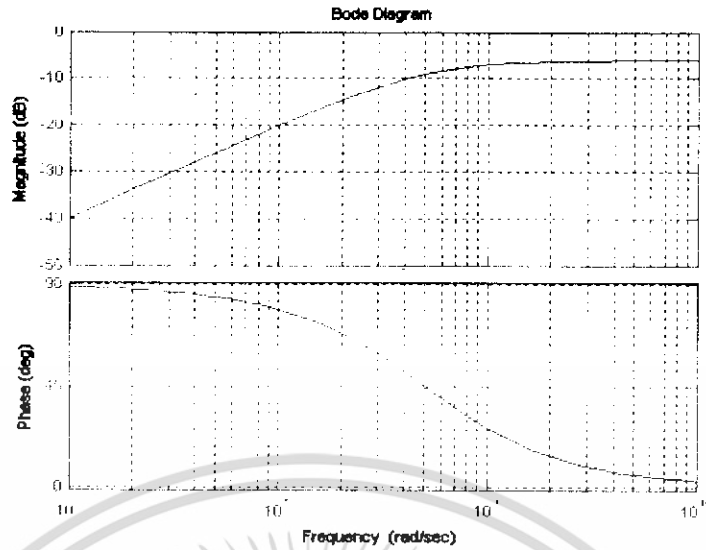
$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_{fix} C_{se} \cdot s}{C_{se} (R_s + R_{fix}) \cdot s + 1}$$

Bode Plot



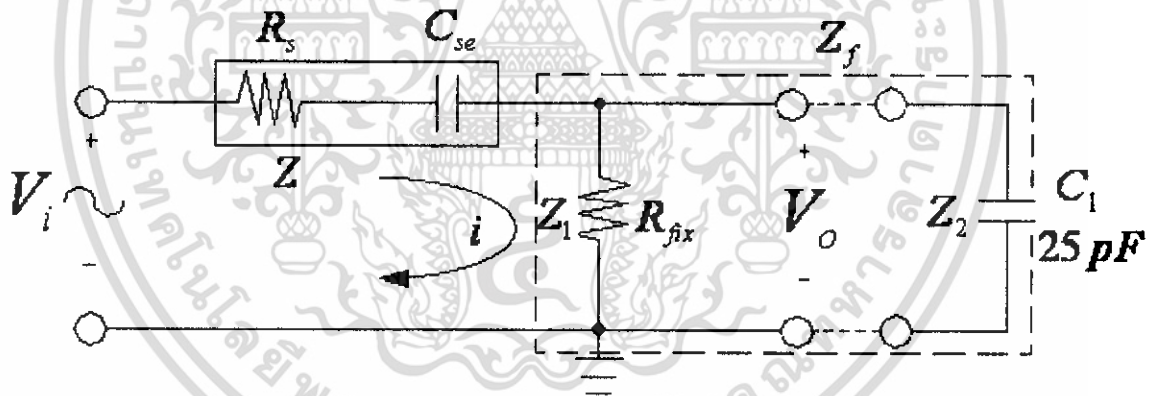
รูปที่ 4.2 แสดงโบดพล็อต (Bode Plot) ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
 เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดง โบทพล็อตของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 200 \text{ pF}$

4.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน(High Pass Filter) โดยคิด $C_{PROPE} = 25 \text{ pF}$ ต่อขนาน



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่า
แบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25 \text{ pF}$ ต่อขนาน

จากรูปวงจรข้างต้น จะใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ช่วยในการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } V_i &= A_i \sin(\omega t) = A_i \angle 0 \\
 V_o &= A_o \sin(\omega t + \phi) = A_o \angle \phi = A_o \cos \phi + A_o \sin \phi \cdot i \\
 Z &= R_s - X_{se}i \quad \text{โดยที่} \quad X_{se} = 1/2\pi f C_{se} \\
 Z_1 &= R_{fix} \\
 Z_2 &= -X_1i \quad \text{โดยที่} \quad X_1 = 1/2\pi f C_1
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_f = \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)}$$

$$V_o = \frac{Z_f V_i}{(Z + Z_f)}$$

$$Z = \frac{Z_f (V_i - V_o)}{V_o}$$

ดังนั้นจะได้

และ

$$R_s = \text{Real}(Z)$$

$$X_{se} = \text{Image}(Z)$$

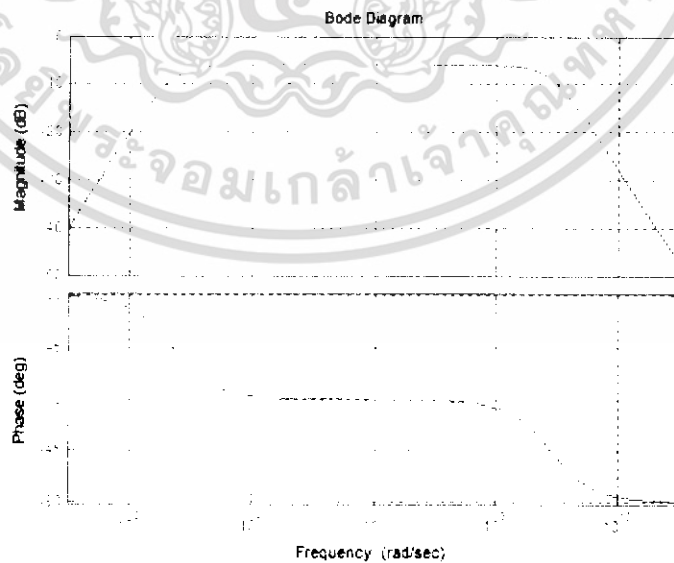
$$C_{se} = \frac{1}{2\pi f X_{se}}$$

- เมื่อ A_i = แอมพลิจูดของสัญญาณ V_i
 A_o = แอมพลิจูดของสัญญาณ V_o
 f = ความถี่ของสัญญาณ V_i ใช้
 \emptyset = มุมเฟสที่ซิปไปจากสัญญาณอินพุต

Transfer function:

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_{fix} C_{se} \cdot s}{R_s R_{fix} C_{se} C_1 \cdot s^2 + (R_s C_{se} + R_{fix} C_{se} + R_{fix} C_1) \cdot s + 1}$$

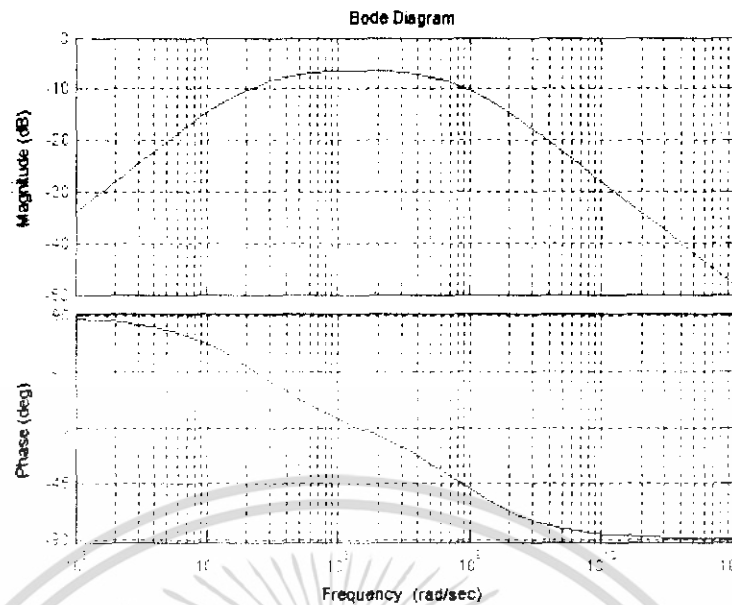
Bode Plot



รูปที่ 4.5 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu\text{F}$ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงโบคพล็อตของวงจรรองความถี่สูงผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขานาน
เมื่อ $R_s = R_f = 100\ \Omega$, $C_{se} = 200\ \text{pF}$

$R_f = 100\ \Omega$, $R_s = 100\ \Omega$ แปรค่าความถี่

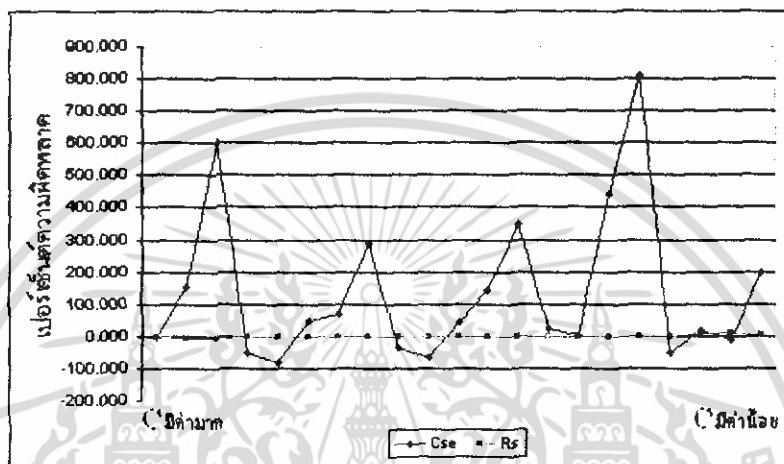
ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	V_o (v)	V_i (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
$C_{se}(\mu\text{F})$	$R_s(\Omega)$	f_{cut}	f_{use}				$C_{se}(\mu\text{F})$	$R_s(\Omega)$	Cse	R_s
10	100	0.5k	0.5k	20	2.5	5.04	0.000	0.000	0.000	0.000
			1k	5.1	2.56	5.02	25.333	95.993	153.330	-4.007
			2k	0.46	2.56	5.02	70.204	96.091	602.040	-3.909
			5k	1	2.56	5.04	5.147	96.778	-48.527	-3.222
			10k	0.64	2.56	5.04	2.011	96.716	-79.891	-3.284
4.7	100	1.5k	1.5k	8	2.52	5.04	7.043	99.432	49.849	-0.568
			2k	4	2.54	5.04	7.980	98.175	69.787	-1.825
			5k	0.28	2.56	5.04	18.237	98.418	288.021	-1.583
			10k	0.44	2.56	5.04	2.925	96.800	-37.777	-3.200
			15k	0.35	2.54	5.04	1.669	98.323	-64.489	-1.677
2.2	100	2.272k	2.5k	6.5	2.52	5.04	3.123	98.958	41.955	-1.042
			5k	0.96	2.54	5.04	5.320	98.335	141.809	-1.665
			10k	0.13	2.54	5.04	9.820	98.419	346.359	-1.581
			15k	0.21	2.54	5.04	2.702	98.386	22.814	-1.614
1	100	5k	10k	1.25	2.5	5	1.027	98.173	2.680	-1.827
			15k	0.11	2.54	5.04	5.404	98.416	440.350	-1.585
			20k	0.04	2.54	5.04	9.118	98.424	811.840	-1.576
			50k	0.1	2.54	5.04	0.491	98.319	-50.900	-1.681

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณค่า C_{se} และ R_s ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ $R_s = 100\ \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
Cse(uF)	Rs(Ω)	fcut	fuse				Cse(uF)	Rs(Ω)	Cse	Rs
0.1	100	50k	50k	0.41	2.4	5.04	0.118	108.260	18.000	8.260
			100k	0.07	2.4	4.88	0.090	109.713	-9.700	9.713
			200k	0.01	2.34	4.88	0.299	103.316	199.400	3.316

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ Rs ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ Rs = 100 Ω (ต่อ)



รูปที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ Cse และ Rs เมื่อทดลองเปลี่ยนค่า Cs โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน และ Rs = 100 Ω

Rf = 100 Ω แปรค่าความถี่ตาม Rs ที่เปลี่ยนไป

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
Cse(uF)	Rs(Ω)	fcut	fuse				Cse(uF)	Rs(Ω)	Cse	Rs
10	10	909.1	1k	13.6	4.5	5	16.783	10.706	67.830	7.057
			2k	1.25	4.5	5	42.219	11.095	322.190	10.951
			5k	0.76	4.5	5	12.000	11.079	20.000	10.794
	200	333.33	1k	1.7	1.64	5.04	48.486	207.300	384.860	3.650
			2k	1.14	1.64	5.04	18.076	207.286	80.760	3.643
			5k	0.92	1.64	5.04	3.584	207.189	-64.158	3.594
			10k	0.58	1.64	5.04	1.421	207.113	-85.786	3.557
	330	232.55	0.5k	9.8	1.16	5.04	0.000	0.000	0.000	0.000
			1k	0.6	1.2	5.2	0.000	0.000	0.000	0.000
			2k	1.75	1.2	5.2	8.351	333.229	-16.487	0.978
			5k	1.14	1.2	5.18	2.055	331.390	-79.451	0.421

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ Rs ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า Rs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

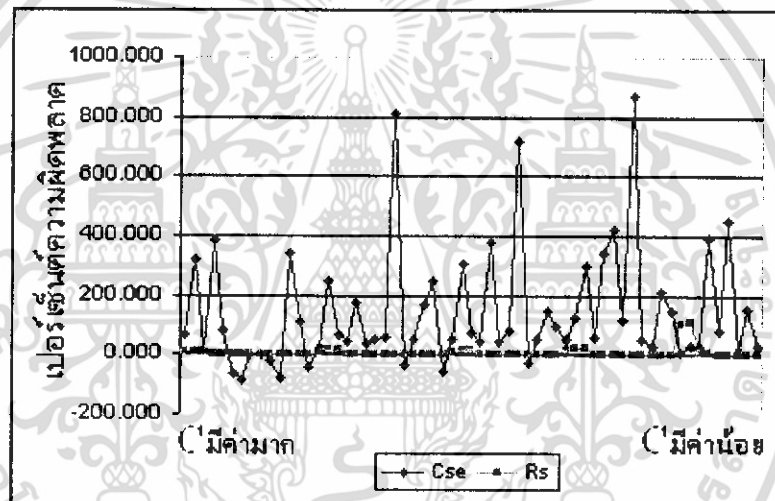
ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
Cse(uF)	Rs(Ω)	fcut	fuse				Cse(uF)	Rs(Ω)	Cse	Rs
4.7	500	166.67	0.5k	3.8	0.84	5.04	44.440	499.957	344.400	-0.009
			1k	2	0.84	5.04	21.109	499.953	111.090	-0.009
			2k	1.9	0.84	5.04	5.555	499.829	-44.446	-0.034
	10	1.934k	2k	9.5	4.48	5	5.987	10.813	27.379	8.128
			5k	0.56	4.48	5	16.212	11.590	244.936	15.899
			10k	0.29	4.48	5	7.827	11.589	66.523	15.886
	200	709.2	1k	12.2	1.64	5.04	6.763	206.415	43.887	3.207
			2k	1.6	1.64	5.04	12.880	207.255	174.043	3.628
			5k	0.5	1.64	5.04	6.594	207.279	40.302	3.640
	330	494.8	0.5k	33	1.16	5.04	7.079	332.150	50.623	0.651
			1k	7.6	1.16	5.04	7.674	333.988	63.277	1.208
			2k	0.34	1.16	5.04	42.868	334.479	812.085	1.357
500	354.6	0.5k	24	0.84	5.04	7.043	498.295	49.849	-0.341	
		1k	3.35	0.84	5.04	12.603	499.867	168.149	-0.027	
		2k	0.64	0.84	5.04	16.491	499.981	250.872	-0.004	
2.2	10	4.132k	5k	2.75	4.44	5.04	3.305	11.191	50.241	11.909
			10k	0.26	4.48	5.04	8.901	11.593	304.586	15.928
			20k	0.15	4.48	5.04	3.783	11.587	71.950	15.873
	200	1.515k	2k	6.45	1.62	5.04	3.159	210.090	43.600	5.045
			5k	0.31	1.62	5.04	10.506	211.096	377.545	5.548
			10k	0.25	1.62	5.04	3.257	211.073	48.041	5.536
	330	1.057k	2k	3.65	1.16	5.04	3.995	334.026	81.568	1.220
			5k	0.13	1.16	5.04	17.938	334.479	715.364	1.357
			10k	0.36	1.16	5.04	1.620	334.372	-26.382	1.325
	500	757	1k	12.8	0.84	5.04	3.302	498.061	50.082	-0.388
			2k	1.95	0.84	5.04	5.413	499.820	146.045	-0.036
			5k	0.39	0.84	5.04	4.330	499.955	96.818	-0.009
1	10	9.091k	10k	1.45	4.48	5.04	1.555	12.033	55.500	20.334
			15k	0.45	4.48	5.04	2.225	12.399	122.450	23.988
			20k	0.14	4.48	5.04	4.021	12.483	302.090	24.826
	200	3.333k	5k	2.04	1.62	5.04	1.598	210.472	59.750	5.236
			10k	0.19	1.64	5.04	4.456	207.296	345.550	3.648
			15k	0.07	1.64	5.04	5.233	207.310	423.300	3.655
	330	2.325k	5k	1.07	1.16	5.04	2.180	334.237	117.980	1.284
			10k	0.06	1.16	5.04	9.717	334.480	871.670	1.357
			15k	0.17	1.16	5.04	1.524	334.427	52.420	1.342
	500	1.667k	2k	7.9	0.84	5.04	1.338	497.046	33.820	-0.591
			5k	0.54	0.84	5.04	3.127	499.914	212.730	-0.017
			10k	0.17	0.84	5.04	2.483	499.966	148.340	-0.007

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ Rs ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า Rs (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
Cse(uF)	Rs(Ω)	fcut	fuse				Cse(uF)	Rs(Ω)	Cse	Rs
0.1	10	90.91k	100k	0.17	4.16	5.04	0.110	20.292	10.300	102.915
			150k	0.07	4.08	4.96	0.132	21.304	32.400	113.042
	200	33.33k	50k	0.25	1.56	5.04	0.128	222.120	28.300	11.060
			100k	0.02	1.56	5	0.490	223.061	390.000	11.530
	330	23.26k	50k	0.13	1.16	5.04	0.182	334.132	82.200	1.252
			100k	0.01	1.16	5.04	0.550	334.473	450.000	1.355
	500	16.67k	20k	0.86	0.82	5.04	0.120	511.048	20.000	2.210
			50k	0.07	0.82	5.04	0.254	514.506	153.600	2.901
100k			0.03	0.82	4.98	0.130	507.194	30.300	1.439	

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ Rs ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า Rs (ต่อ)



รูปที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ Cse และ Rs เมื่อทดลองเปลี่ยนค่า Cs โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน และ เมื่อเปลี่ยนค่า Rs

ความถี่(Hz) fuse	Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ	
				Cse(pF)	Rs(Ω)
3M	0.0215	0.96	4.08	21.292	1731.6
2.75M	0.0231	0.95	4.08	23.307	1884.5
2.5M	0.0268	0.95	4.16	24.772	1987.4
2.25M	0.032	0.93	4.16	26.316	2073.1
2M	0.0376	0.98	4.24	27.43	2330.9

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรแบบกรองความถี่สูงผ่าน จากนมิซูเอซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจรข้างต้น จะใช้โปรแกรมเมทแลปช่วยในการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } V_i &= A_i \sin(\omega t) = A_i \angle 0 \\ V_o &= A_o \sin(\omega t + \phi) = A_o \angle \phi = A_o \cos \phi + A_o \sin \phi \cdot i \\ Z &= R_s - X_{ci} \quad \text{โดยที่ } X_c = 1/2\pi f C_{se} \\ Z &= \frac{R_{fix} V_o}{(V_i - V_o)} \\ V_o &= \frac{Z V_i}{(Z + R_{fix})} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

และ

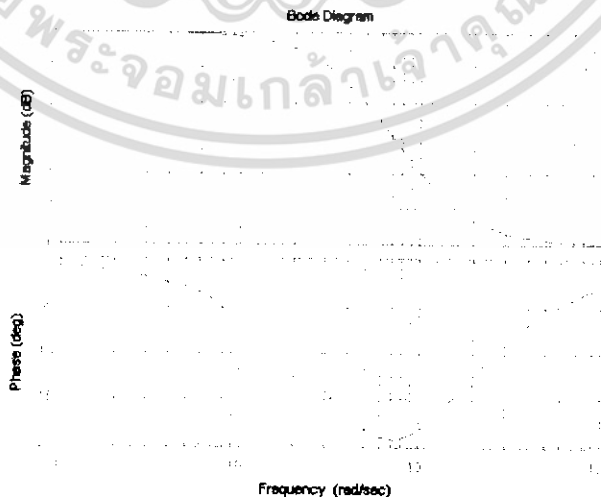
$$\begin{aligned} R_s &= \text{Real}(Z) \\ X_{se} &= \text{Image}(Z) \\ C_{se} &= 1/2\pi f X_{se} \end{aligned}$$

เมื่อ A_i = แอมพลิจูดของสัญญาณ V_i
 A_o = แอมพลิจูดของสัญญาณ V_o
 f = ความถี่ของสัญญาณ V_i ใช้
 ϕ = มุมเฟสที่ขีฟไปจากสัญญาณอินพุต

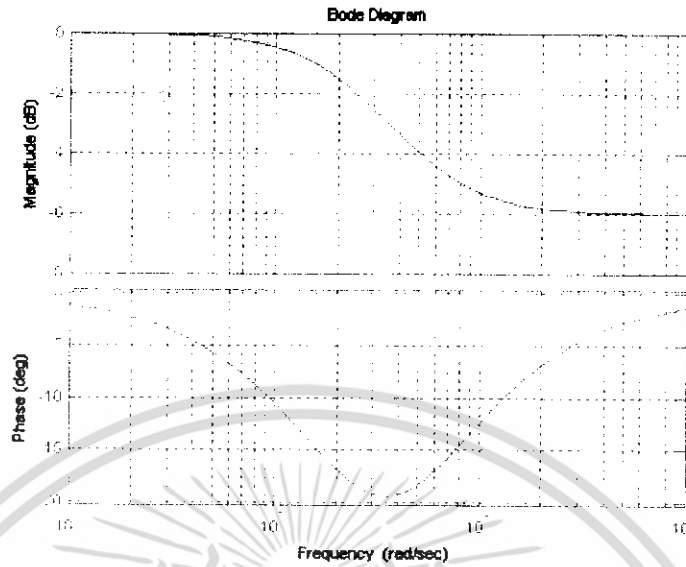
Transfer function:

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_{fix} C_{se} \cdot s + 1}{C_{se} (R_s + R_{fix}) \cdot s + 1}$$

Bode Plot

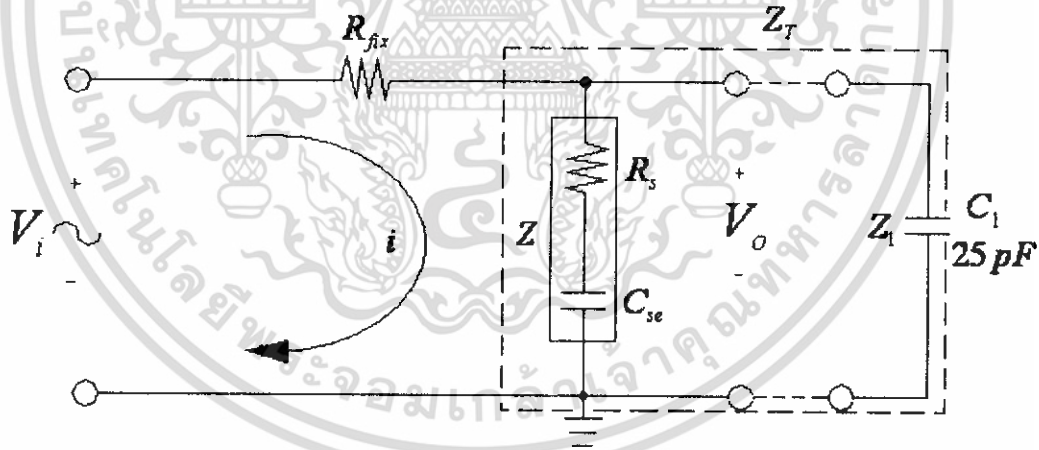


รูปที่ 4.11 แสดงโบคพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 10 \mu F$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเนื้อหาเปิดเผยเนื้อหาเอกสารนี้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงโบดพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega$, $C_{se} = 200 \text{ pF}$

4.4 แบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) โดยคิด $C_{PROPE} = 25 \text{ pF}$ ต่อขนาน



รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์หา R และ C ไม่ทราบค่า
แบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25 \text{ pF}$ ต่อขนาน

จากรูปวงจรข้างต้น จะใช้โปรแกรมแมทแลปช่วยในการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } V_i &= A_i \sin(\omega t) = A_i \angle 0 \\ V_o &= A_o \sin(\omega t + \phi) = A_o \angle \phi = A_o \cos \phi + A_o \sin \phi \cdot i \\ Z &= R_s - X_{ci} \quad \text{โดยที่ } X_c = 1/2\pi f C_{se} \\ Z_L &= X_{ci} \quad \text{โดยที่ } X_{ci} = 1/2\pi f C_1 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_T = \frac{R_{fix} V_o}{(V_i - V_o)}$$

$$Z_T = \frac{Z Z_1}{(Z + Z_1)}$$

ผลรวมของอิมพีแดนซ์ $Z = \frac{Z_1 Z_T}{(Z_1 - Z_T)}$

ดังนั้นจะได้

$$R_s = \text{Real}(Z)$$

และ $X_{se} = \text{Image}(Z)$

$$C_{se} = 1/2\pi f X_{se}$$

เมื่อ $A_i =$ แอมพลิจูดของสัญญาณ V_i

$A_o =$ แอมพลิจูดของสัญญาณ V_o

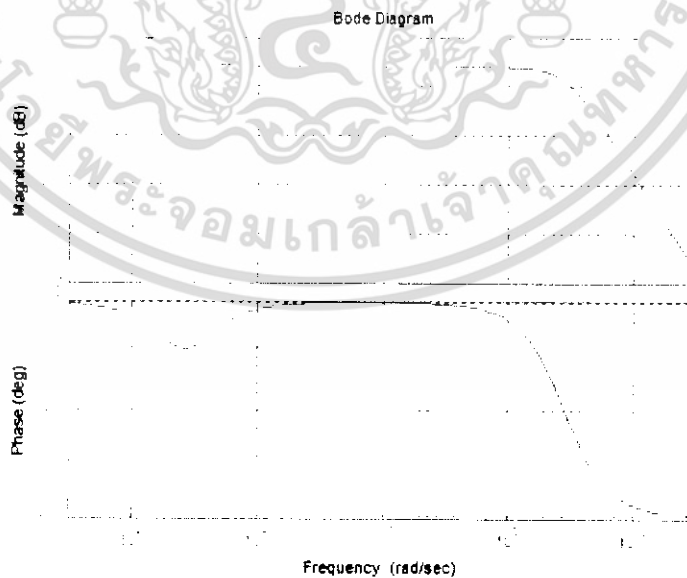
$f =$ ความถี่ของสัญญาณ V_i ใช้

$\emptyset =$ มุมเฟสที่ชิฟไปจากสัญญาณอินพุต

Transfer function:

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_{fix} C_{se} \cdot s + 1}{R_s R_{fix} C_{se} C_1 \cdot s^2 + (R_s C_{se} + R_{fix} C_{se} + R_{fix} C_1) \cdot s + 1}$$

Bode Plot

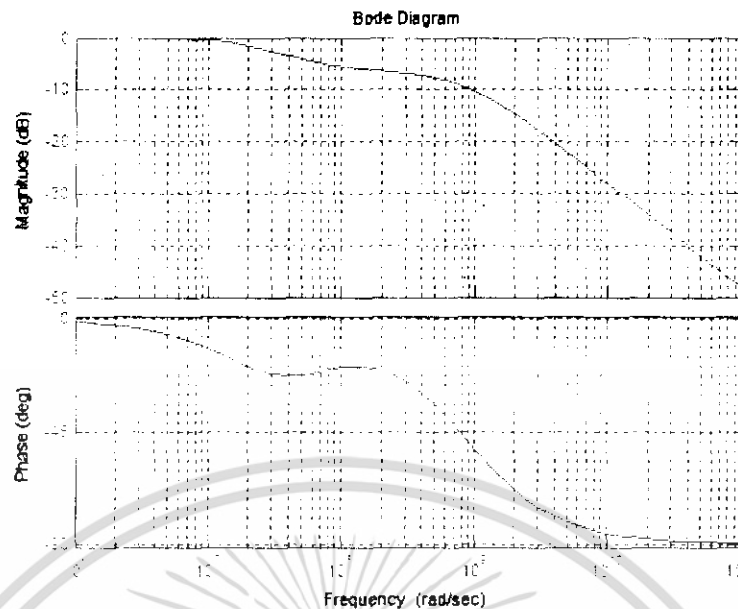


รูปที่ 4.14 แสดง โบทพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขานาน

เมื่อ $R_s = R_f = 100 \Omega, C_{se} = 10 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



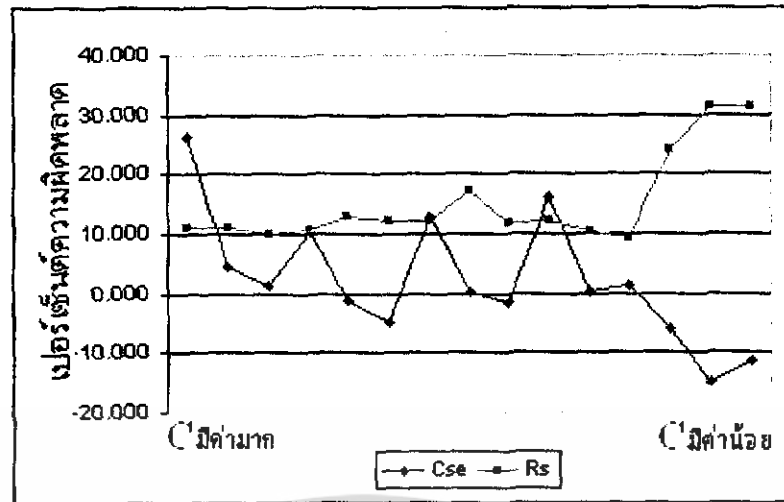
รูปที่ 4.15 แสดงโบดพล็อตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยคิด $C_{PROPE} = 25\text{pF}$ ต่อขานาน
เมื่อ $R_s = R_f = 100\ \Omega$, $C_{se} = 200\ \text{pF}$

$R_f = 100\ \Omega$, $R_s = 100\ \Omega$

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase	V_o	V_i	ค่าคำนวณ		Error (%)	
$C_{se}(\mu\text{F})$	$R_s(\Omega)$	f_{cut}	f_{use}	(us)	(v)	(v)	$C_{se}(\mu\text{F})$	$R_s(\Omega)$	Cse	R_s
10	100	0.5k	0.5k	33.2	2.7	5.04	12.635	111.035	26.350	11.035
			0.3k	98	2.84	5.08	10.473	111.031	4.730	11.031
			0.1k	506	2.92	5.36	10.128	109.864	1.280	9.864
4.7	100	1.063k	1k	20	2.72	5.04	5.186	110.783	10.340	10.783
			0.7k	41.6	2.84	5.04	4.643	112.999	-1.221	12.999
			0.5k	76.8	3.04	5.12	4.475	112.323	-4.794	12.323
2.2	100	2.272k	2k	10.2	2.74	5.04	2.487	112.184	13.041	12.184
			1k	36.8	3.08	5.12	2.202	117.248	0.109	17.248
			0.5k	100	3.84	5.36	2.165	111.659	-1.609	11.659
1	100	5k	5k	3.54	2.72	5.04	1.162	112.139	16.150	12.139
			2k	20.9	3.12	5.16	1.003	110.388	0.250	10.388
			1k	50.8	3.92	5.36	1.013	109.234	1.290	9.234
0.1	100	50k	50k	0.37	2.86	5.04	0.094	124.067	-5.807	24.067
			20k	1.87	3.36	5.2	0.085	131.206	-14.986	31.206
			10k	4.44	4.2	5.52	0.089	131.474	-11.188	31.474

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณค่า C_{se} และ R_s ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อ $R_s = 100\ \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ Cse และ Rs
เมื่อทดลองเปลี่ยนค่า Cs โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ $R_s = 100 \Omega$

$R_f = 100 \Omega$ แปรค่าความถี่ตาม R_s ที่เปลี่ยนไป

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	V_o (v)	V_i (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
Cse(uF)	$R_s(\Omega)$	f_{cut}	f_{use}				Cse(uF)	$R_s(\Omega)$	Cse	R_s
10	10	909.1	0.9k	107	0.8	4.36	12.441	16.073	24.410	60.734
			0.5k	257	1.26	4.4	10.555	16.907	5.550	69.066
			0.2k	604	2.8	4.72	9.573	15.980	-4.269	59.800
	200	333.33	0.3k	32.5	3.74	5.36	11.669	223.040	16.690	11.520
			0.2k	76.5	3.8	5.36	10.671	222.527	6.710	11.263
			0.1k	263	4.16	5.52	10.429	215.931	4.290	7.966
	330	232.55	0.3k	13	4.32	5.6	14.794	334.095	47.940	1.241
			0.2k	33.5	4.4	5.64	12.051	343.583	20.510	4.116
			0.1k	131	4.56	5.68	10.686	351.070	6.860	6.385
500	166.67	0.2k	14	4.88	5.8	13.667	524.489	36.670	4.898	
		0.15k	27.2	4.88	5.8	12.650	517.954	26.500	3.591	
		0.1k	64	4.88	5.8	12.479	500.662	24.790	0.132	
4.7	10	1.934k	2k	50.4	0.86	4.4	5.052	16.310	7.496	63.104
			1k	128	1.46	4.44	4.381	18.401	-6.794	84.011
			0.5k	225	2.68	4.72	3.958	24.019	-15.787	140.192
	200	709.2	0.5k	28.2	3.8	5.4	4.771	220.494	1.500	10.247
			0.3k	71	3.92	5.52	5.415	206.262	15.211	3.131
			0.1k	284	5.04	5.84	4.797	226.365	2.070	13.182
	330	494.8	0.5k	11.9	4.4	5.6	5.096	356.936	8.428	8.162
			0.3k	34.5	4.48	5.68	4.965	343.906	5.636	4.214
			0.1k	192	5.04	5.84	4.798	357.553	2.083	8.349

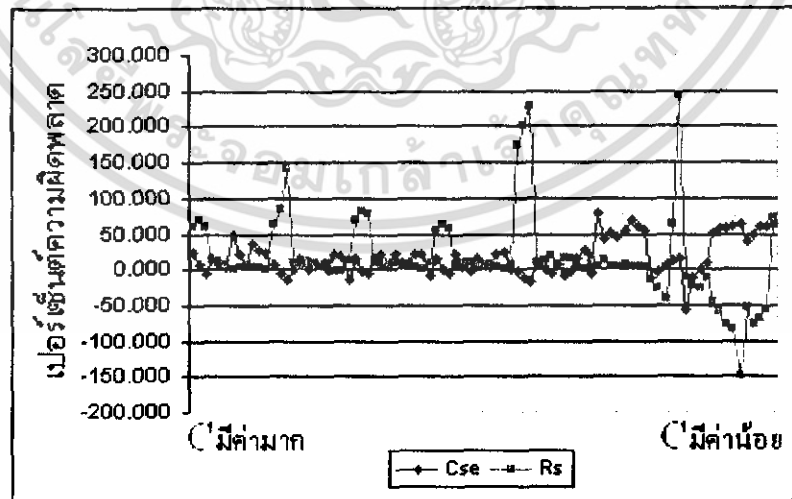
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ R_s ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า R_s
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase	Vo	Vi	ค่าคำนวณ		Error (%)		
Cse(uF)	Rs(Ω)	fcut	fuse	(us)	(v)	(v)	Cse(uF)	Rs(Ω)	Cse	Rs	
	500	354.6	0.3k	16.2	4.88	5.84	5.781	492.686	23.000	-1.463	
			0.2k	36.5	4.88	5.8	5.555	492.290	18.194	-1.542	
			0.1k	119	5.2	5.84	4.064	559.845	-13.526	11.969	
2.2	10	4.132k	4k	24.6	0.86	4.4	2.528	16.823	14.886	68.234	
			2k	64.4	1.46	4.4	2.161	18.225	-1.773	82.249	
			1k	122	2.64	4.72	2.090	17.758	-4.995	77.576	
	200	1.515k	1.5k	6.05	3.72	5.36	2.572	220.316	16.905	10.158	
			1k	13.2	3.76	5.4	2.677	215.490	21.682	7.745	
			0.5k	49.4	4.08	5.52	2.391	214.326	8.682	7.163	
	330	1.057k	1k	5.6	4.4	5.6	2.700	358.024	22.727	8.492	
			0.5k	24.6	4.52	5.68	2.407	344.699	9.409	4.454	
			0.2k	99.5	5.04	5.84	2.384	345.794	8.355	4.786	
500	757	0.7k	5.59	4.88	5.8	2.658	517.440	20.814	3.488		
		0.5k	11.8	4.88	5.8	2.686	504.936	22.105	0.987		
		0.2k	61	5.2	5.84	2.012	550.863	-8.550	10.173		
1	10	9.091k	9k	11.4	0.82	4.4	1.167	15.560	16.690	55.597	
			5k	26.3	1.3	4.4	1.006	16.440	0.630	64.399	
			2k	60.2	2.88	4.8	0.941	15.667	-5.900	56.673	
	200	3.333k	3k	3.3	3.7	5.36	1.219	215.501	21.880	7.750	
			1.5k	13.8	3.92	5.44	1.027	216.624	2.720	8.312	
			1k	26.6	4.24	5.56	0.974	219.570	-2.630	9.785	
	330	2.325k	2k	3.32	4.4	5.6	1.148	354.618	14.820	7.460	
			1k	13.4	4.56	5.68	1.054	349.184	5.360	5.813	
			0.5k	38.6	4.96	5.8	1.032	350.594	3.190	6.241	
	500	1.667k	1.5k	2.8	4.88	5.8	1.231	517.226	23.050	3.445	
			1k	6.5	4.88	5.8	1.231	499.774	23.070	-0.045	
			0.5k	23	5.12	5.84	0.995	535.015	-0.550	7.003	
	0.1	10	90.91k	90k	0.79	1.14	4.44	0.097	27.558	-3.430	175.579
				50k	1.93	1.58	4.52	0.088	30.137	-12.480	201.367
				20k	4.88	3.04	4.88	0.082	32.876	-18.060	228.763
200		33.33k	30k	0.36	3.76	5.4	0.107	219.890	7.240	9.945	
			20k	0.78	3.92	5.48	0.100	227.746	-0.080	13.873	
			10k	2.47	4.32	5.6	0.094	235.994	-5.520	17.997	
330		23.25k	20k	0.36	4.4	5.6	0.106	352.571	6.440	6.840	
			10k	1.3	4.64	5.68	0.093	376.806	-6.940	14.184	
			5k	3.6	5.04	5.84	0.097	378.311	-2.640	14.640	
500		16.67k	15k	0.28	4.88	5.76	0.116	540.157	15.550	8.031	
			10k	0.62	4.88	5.8	0.128	502.405	28.410	0.481	
			5k	2.08	5.2	5.88	0.095	585.372	-5.480	17.074	
0.01		100	500k	500k	0.03	2.52	4.88	0.018	104.505	79.290	4.505
				200k	0.16	2.88	5.04	0.014	112.231	42.110	12.231
				100k	0.5	3.36	5.2	0.015	104.541	50.220	4.540
	50k			0.97	4.48	5.52	0.014	104.746	44.160	4.746	

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ Rs ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า Rs (ต่อ)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจริง		ความถี่(Hz)		Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ		Error (%)	
Cse(uF)	Rs(Ω)	fcut	fuse				Cse(uF)	Rs(Ω)	Cse	Rs
	200	333.3k	300k	0.03	3.6	5.24	0.016	214.980	55.840	7.490
			200k	0.06	3.6	5.28	0.017	205.161	68.070	2.581
			100k	0.22	3.84	5.4	0.016	206.353	60.220	3.177
			50k	0.61	4.4	5.56	0.015	207.072	53.010	3.536
820pF	100	6.097k	2M	0.03	3.04	4.72	729.5pF	85.484	-11.043	-14.516
			1M	0.06	4.16	5.2	809.7pF	74.075	-1.246	-25.925
			500k	0.08	5.28	5.68	863.2pF	59.719	5.270	-40.281
			200k	0.09	5.92	6.08	918.0pF	163.114	11.954	63.114
	200	4.065M	2M	0.02	4.24	5.32	364.2pF	175.403	-55.579	-12.298
			1M	0.04	4.24	5.32	731.8pF	153.105	-10.745	-23.448
			500k	0.07	5.12	5.68	826.1pF	145.804	0.740	-27.098
			200k	0.08	5.84	6	896.0pF	177.875	9.263	-11.063
200pF	100	25M	3M	0.02	3.76	4.8	305.0pF	54.694	52.485	-45.306
			2M	0.03	4.64	5.24	314.4pF	40.467	57.185	-59.533
			1M	0.03	5.6	5.76	317.5pF	22.967	58.755	-77.033
			500k	0.03	5.96	6	321.7pF	15.948	60.845	-84.052
	200	16.67M	3M	0.02	3.76	4.8	277.3pF	91.784	38.635	-54.108
			2M	0.03	4.56	5.12	297.5pF	46.058	48.725	-76.971
			1M	0.03	5.52	5.76	318.2pF	62.896	59.100	-68.552
			500k	0.03	5.92	6	320.1pF	85.545	60.040	-57.228
			200k	0.03	6.12	6.16	328.4pF	342.629	64.220	71.314

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณค่า Cse และ Rs ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อเปลี่ยนค่า Rs (ต่อ)

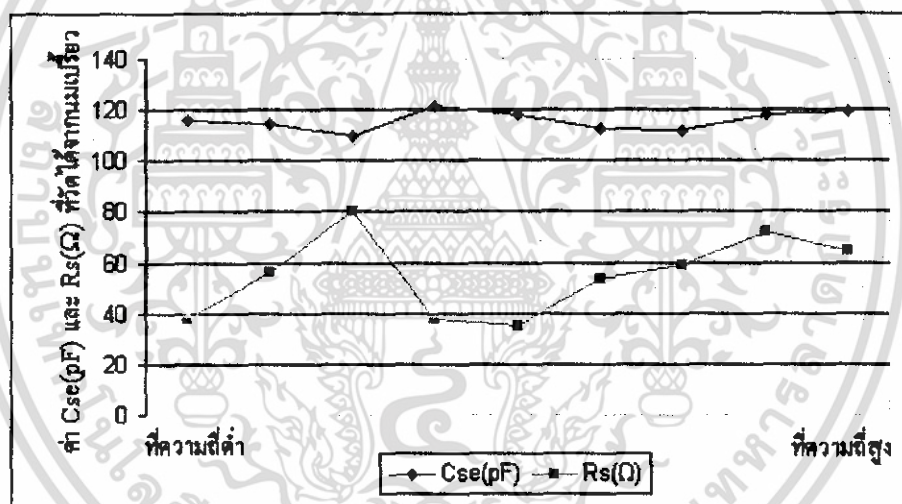


รูปที่ 4.17 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ Cse และ Rs เมื่อทดลองเปลี่ยนค่า Cs โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ เมื่อเปลี่ยนค่า Rs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ (Hz) fuse	Phase (us)	Vo (v)	Vi (v)	ค่าคำนวณ	
				Cse(pF)	Rs(Ω)
3M	0.059	1.33	3.96	119.08	64.5021
2.75M	0.0626	1.34	3.96	117.97	71.8238
2.5M	0.0678	1.64	4	112.04	59.3099
2.25M	0.0736	1.8	4.04	112.77	53.5883
2M	0.082	1.96	4.1	118.06	34.6781
1.75M	0.0895	2.2	4.24	121.27	37.759
1.5M	0.0914	2.7	4.5	109.94	80.283
1M	0.1124	3.4	4.6	114.93	56.3497
750k	0.1235	3.8	4.6	116.25	37.4839

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรแบบกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่วัดจากนมิซูเอซที



รูปที่ 4.18 แสดงผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรแบบกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่วัดจากนมิซูเอซที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

จากผลการทดลองจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการวัดโดยการกำหนดค่าขึ้นมานั้น ที่ค่า C_{se} มีค่ามาก คือประมาณ 10 μF ค่าที่วัดและคำนวณได้จะใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร แต่พอเมื่อค่า C_{se} น้อยๆ เช่น ประมาณ 200 pF ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์สมมูลของนม ค่าที่วัดและคำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนมาก เห็นได้จากผลการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนจะเห็นได้ว่าเกี่ยวข้องกับการเลือกวงจรที่ใช้ในการตรวจวัด และการเลือกค่าต่างๆที่เหมาะสม เช่น การเลือกความถี่ การเลือกค่า R_f ซึ่งมีผลทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกัน

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากหลายๆอย่าง และเมื่อมารวมกันก็จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เราพอจะแยกแยะค่าความคลาดเคลื่อนออกได้ดังนี้

1. ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของ C จากที่ต่างๆ จากการทำการทดลองคือทำการวัดค่า อิมพีแดนซ์ ค่า C_{se} ที่ทำการวัดนั้นเมื่อค่ามีน้อยลง คือ ประมาณเป็น พิโกฟารัด ซึ่งมีค่าน้อยทำให้ถูกรบกวนจากค่า C ที่โดยธรรมชาติมีอยู่แล้ว เช่นในสาย Probe จะเห็นได้ว่ามีค่าประมาณ 20 pF เมื่อนำมาเทียบกับค่า C_{se} ของวงจรแล้วก็มีผลกระทบมากพอสมควร และยังมีในบอร์ดที่ทำการทดลองอีก ทำให้ค่า C ที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าจริง และจากงานวิจัยของ Josep M. Torrent (Error Analysis in Two-Terminal Impedance Measurement With Residual Correction)[6] ก็แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากสายสัญญาณก็มีผลกับวงจรที่ต้องการวัดค่าเล็กๆมากพอสมควร
2. ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากส่วนต่างๆของวงจร จะเห็นได้จากวงจรที่นำมาทำการวัดค่า เช่น วงจรตรวจจับค่าขอด ค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเล็กน้อย เช่น ค่าขอดที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าจริงเล็กน้อย ซึ่งมีสาเหตุมาจากมีโวลต์ครอปในโคโอดวงจรแปลงสัญญาณเป็นสี่เหลี่ยม โดยการใช้ออปแอมป์ ในช่วงเปลี่ยนระดับลอจิกทำให้มีไรซ์ไทม์ (Rise Time) ในช่วงที่ความถี่สูงขึ้นซึ่งทำให้ค่าของมูมเฟสที่จะทำการเปรียบเทียบโดยซอร์เกท (Xor-Gate) มีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย จากความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ก็ทำให้ค่าที่วัดและคำนวณออกมามีค่าความคลาดเคลื่อน จากการทำการทดลองพบว่าค่า เอทพุทที่วัดได้เปลี่ยนแปลงเพียงนิดเดียวก็จะมีผลทำให้ค่าความที่วัดได้คลาดเคลื่อนเพิ่มมาก
3. ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวผู้ทำการทดลองเอง มีหลายครั้งที่ต้องทำการวัดค่าจากสโคป (Scope) ซึ่งผู้ทำการทดลองต้องกะประมาณค่าเองซึ่งทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

แนวทางที่จะทำการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนนั้น ก็จะทำการพิจารณาไปที่ละส่วน โดยในส่วนแรกจะต้องทำการชดเชยวงจรด้วยการคำนวณค่า C ที่มีอยู่ตามสายต่างๆเข้าไปด้วย หรือทำการเลือกสายวัด

สัญญาณที่มีการรบกวนจากค่า C น้อยๆ ในส่วนของวงจรคือต้องเลือกวงจรที่มีประสิทธิภาพในการที่จะทำการจัดการสัญญาณที่มีละเอียด และในส่วนที่สาม คือต้องเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่เป็นแบบดิจิทัลเพื่อง่ายและแม่นยำในการอ่านค่า

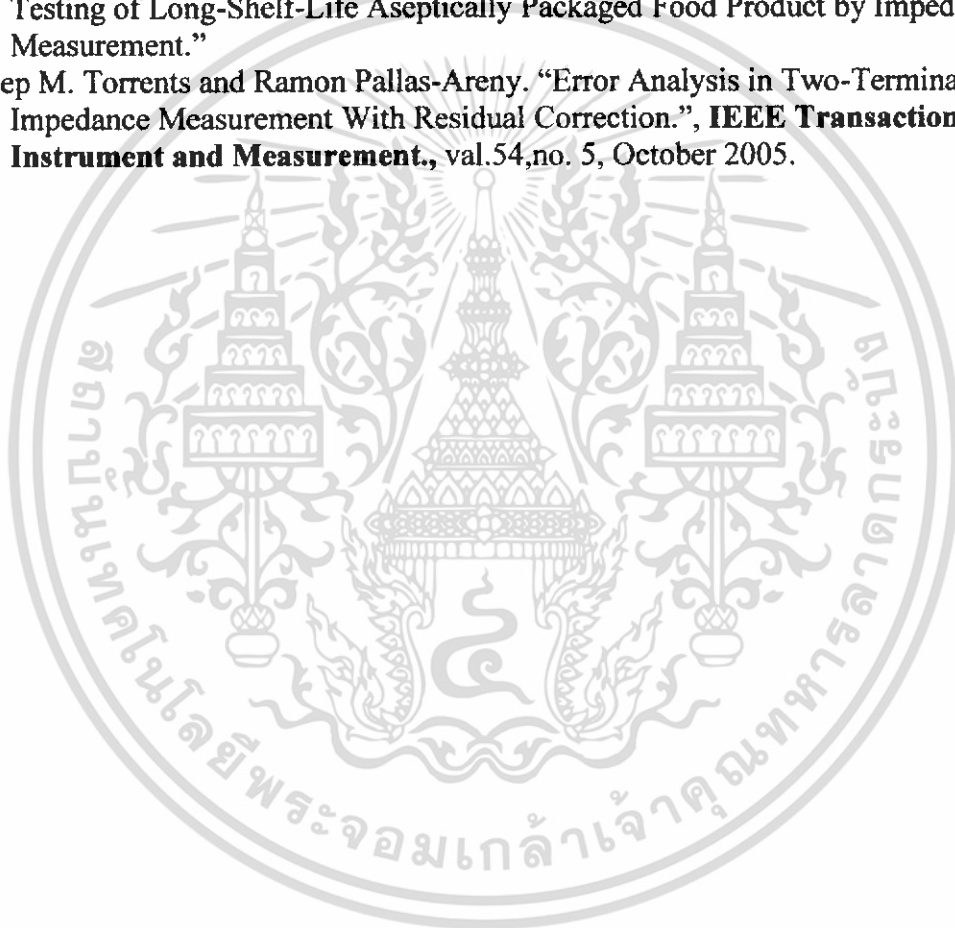
ในการทำการทดลองวัดค่านี้ต้องใช้วงจรที่มีความแม่นยำมาก และต้องสามารถทำงาน ได้ดีที่ความถี่สูงซึ่ง โดยปกติแล้วการที่จะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมที่มีค่า C ประมาณ 200 pF นั้นจะต้องใช้ความถี่ที่สูง (มากกว่า 1 MHz) ซึ่งวงจรที่ได้ออกแบบมาทำการวัดค่าใช้เป็นออปแอมป์ ซึ่งมีประสิทธิภาพจำกัดดังนั้นในความถี่ที่สูงๆ จึงไม่สามารถใช้ได้ถึงแม้จะใช้เป็นออปแอมป์แบบไฮสปีดแล้วก็ตาม ซึ่งก็เป็นข้อจำกัดของวงจรในการตรวจวัดค่า ดังนั้นการเลือกวิธีการและวงจรในการวัดค่านี้ต้องพิจารณาถึงเรื่องความถี่ เป็นหลัก

จุดประสงค์อย่างหนึ่งของโครงการนี้ คือ ทำการทดลองหาค่า ความถี่ และค่า R_f ที่เหมาะสมที่จะสามารถทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมให้มีค่าใกล้เคียงมากที่สุด จากข้อจำกัดของอุปกรณ์บางอย่าง เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ให้ความถี่สูงสุดที่ประมาณ 3 MHz ทำให้ทำการวัดค่าได้ในเฉพาะช่วงนี้เท่านั้น จึงไม่อาจจะสรุปได้ว่าที่ความถี่เท่าใดจึงเป็นค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนที่ยังสามารถยอมรับได้

โครงการนี้เป็นเพียงการศึกษาและทำการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของนมวิธีหนึ่ง ซึ่งในการที่จะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์สมมูลนี้ก็มีอีกหลายๆ วิธี ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะของการนำไปประยุกต์ใช้ ความละเอียดที่ต้องการ เป็นต้น ในการทำการออกแบบวงจรที่จะนำไปวัดการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียนี้ยังต้องการความละเอียดเท่าไรวงจรที่ใช้ก็ต้องมีความแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะสามารถวัดค่าได้ละเอียดขนาดไหน ก็ขึ้นอยู่กับเทคนิคและเทคโนโลยีที่มีอยู่ในขณะนั้นซึ่งก็เป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างแพร่หลาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.M. Gibson and A.C. Jason, Impedance Techniques for Microbial Assay
- [2] Operational Amplifier and Linear Integrated Circuit
- [3] Larry K Baxter . **Capacitive Sensor Design and Application**. New York : Institute of Electrical and Electronic Engineers. Inc. 1997.
- [4] ประจัน พลังสันติกุล, เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์, บริษัท อิน โนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด; 2541
- [5] Stoyan N. Nihtianov and Gerard C. M. Meijer. “ Non-Destructive on-line Sterility Testing of Long-Shelf-Life Aseptically Packaged Food Product by Impedance Measurement.”
- [6] Josep M. Torrents and Ramon Pallas-Areny. “Error Analysis in Two-Terminal Impedance Measurement With Residual Correction.”, **IEEE Transactions on Instrument and Measurement.**, val.54,no. 5, October 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ ที่ความถี่ 10 kHz Rf = 100 Ohm

```

/*****
//////////EXAMPLE : PROGRAM TEST UHT MILK//////////
*****/

#include <16F877.h>           // Standard Header file for the PIC16F877 device

#define TxD    PIN_C6        // Define Transmitted Data
#define RxD    PIN_C7        // Define Received Data
#define CLOCK_SP 20000000    // Clock Speed(Hz)

// Device Specification
#define HS           // Oscillator mode HS
#define NOLVP, NOWDT // No Low Voltage Program, No Watchdog timer
#define NOPROTECT   // Code no protection

#define ADC=10       // ADC 10 Bit (111111111=1,023)

#define delay (clock=CLOCK_SP) // Use built-in function: delay_ms() & delay_us()
#define rs232(baud=9600, xmit=TxD,rcv=RxD) // Use serial I/O port (RS232)
#define fast_io(A) // programming of the direction register.

#define use_portb_lcd // define for use portb lcd

#include <math.h>
#include "lcd.c" // use module function

/*****
                        Constants
*****/

#define PIN_COUNTERS    PIN_C0
#define PIN_BUTTON_ON  PIN_C1
#define PIN_CLEAR_ON    PIN_C2
#define Vbe              0.0048875855327468230694037145650049 // Vref/1023 (5/1023)

char str[16];

/*****
                        LCD.C : Driver for common LCD modules
*****/

// As defined in the following structure the pin connection is as follows:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// B0 = E(enable), B1 = RS, B2 = R/W
// B4 = D4, B5 = D5, B6 = D6
// B7 = D7
// LCD pins D0-D3 are not used and PIC B3 is not used.
```

```
/******
```

Functions prototypes

```
*****/
```

```
void lcd_command(int cm);
void lcd_clear(void);
void lcd_jumporigin(void);
void strcpy(char *s1, char *s2);
void lcd_string(char *s, int dly);
void convert_to_lcd(int add,float data);
```

```
/******
```

```
* FUNCTION      : LCD_Command
* DESCRIPTION   : LCD Command
* PARAMETERS    : cm
* RETURNED      : nothing
```

```
*****/
```

```
void lcd_command(int cm)
{
    lcd_send_byte(0,cm);
}
```

```
/******
```

```
*Function      : lcd_clear
*Description    : lcd_clear
*Parameters    : nothing
*Returned      : nothing
```

```
*****/
```

```
void lcd_clear(void)
{lcd_send_byte(0,0x01);}
```

```
/******
```

```
*Function      : lcd_jumporigin
*Description    : lcd_jumporigin
*Parameters    : nothing
*Returned      : nothing
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*****/
void lcd_jumporigin(void)
{lcd_send_byte(0,0x02);}

/*****
* FUNCTION      :      strcpy
* DESCRIPTION   :      string copy
* PARAMETERS   :      *s1, *s2
* RETURNED     :      nothing
*****/

void strcpy(char *s1, char *s2)
{
    while(*s1++ = *s2++);
}

/*****
* FUNCTION      :      LCD_String
* DESCRIPTION   :      LCD String
* PARAMETERS   :      *s, dly
* RETURNED     :      nothing
*****/

void lcd_string(char *s, int dly)
{
    while(*s!=0)
    {
        lcd_putc(*s++);
        delay_ms(dly);
    }
}

/*****
* FUNCTION      :      convert_to_lcd
* DESCRIPTION   :      convert_to_lcd
* PARAMETERS   :      add,data
* RETURNED     :      nothing
*****/

void convert_to_lcd(int add,float data)
{
    BYTE i;
    char data_string[7];
    float temp,div;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i      = 0;
data   = data*1e15;
div    = 1e15;
for(i=0;i<=12;i++)
{
temp=data/div;
    data_string[i]=(BYTE)temp+'0';
    if(i==0)
    {
        data_string[1]='.';
        i++;
    }
    temp  = div*(BYTE)temp;
data    = data-temp;
div     = div/10;
}
data_string[i]='\0';
lcd_command(add);
strcpy(str,data_string);
lcd_string(str,0);
}

/*****
* FUNCTION      :    main
* DESCRIPTION   :    This is the main entry point for the program.
* PARAMETERS    :    nothing
* RETURNED     :    nothing
*****/
void main(void)
{
    long int value1,value2;
    float R,f,Ao,tms,time1,time2,ph,x,y,Xc,Rs,Cp;
    R      = 100;                               // M?=>>20K?
    f      = 10e3;
    lcd_init();                                 // LCD initialize
    lcd_clear();
    lcd_jumporigin();
    while(TRUE)
    {
        lcd_command(0x80);
        strcpy(str,"TEST CAP. SENSER");
        lcd_string(str,0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lcd_command(0xC0);
strcpy(str," IN U.H.T. MILK ");
lcd_string(str,0);

setup_adc_ports(RA0_RA1_RA3_ANALOG);           // A0 A1 A3 Ref=Vdd
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);                 // Clock RC Internal 2-6us
setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);       // Setup timer 1

if(!input(PIN_BUTTON_ON))                      // PIN_C1 on
{
    value1 = 0;
    value2 = 0;
    Ao      = 0;
    tms     = 0;

    set_adc_channel(0);
    value1=Read_ADC();
    set_adc_channel(1);
    value2=Read_ADC();
    Ao    = (Vbe*(float)((value1+value2)/2));

    while(input(PIN_COUNTERS));                // If it's high, wait for a low
    while(!input(PIN_COUNTERS));              // Wait for signal to go high
    set_timer1(0);                             // Start timer
    while(input(PIN_COUNTERS));                // Wait for signal to go high
    time1= get_timer1();
    delay_us(5);

    while(input(PIN_COUNTERS));                // If it's high, wait for a low
    while(!input(PIN_COUNTERS));              // Wait for signal to go high
    set_timer1(0);                             // Start timer
    while(input(PIN_COUNTERS));                // Wait for signal to go high
    time2= get_timer1();

    tms = ((time1+time2)/2)*8*200*0.000000001;
    ph  = (2*pi*tms)/0.1e-3;
    Rs  = (R*2.5*cos(ph)/Ao)-R;
    Xc  = (R*2.5*sin(ph)/Ao);
    Cse = 1/(2*pi*f*Xc);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    lcd_command(0x80);
    strcpy(str,"C");
    lcd_string(str,0);
    lcd_command(0xC0);
    strcpy(str,"R");
    lcd_string(str,0);

    lcd_command(0x89);
    strcpy(str,"T");
    lcd_string(str,0);
    lcd_command(0xC9);
    strcpy(str,"A");
    lcd_string(str,0);

    convert_to_lcd(0x81,Cp);
    convert_to_lcd(0xC1,Rs);

    lcd_command(0x88);
    strcpy(str,"u");
    lcd_string(str,0);
    lcd_command(0xC8);
    strcpy(str,"M");
    lcd_string(str,0);

    tms = tms*1e3;
    convert_to_lcd(0x8A,tms);
    convert_to_lcd(0xCA,Ao);

    lcd_command(0x8F);
    strcpy(str,"m");
    lcd_string(str,0);
    lcd_command(0xCF);
    strcpy(str,"V");
    lcd_string(str,0);
    while (TRUE)
    {
        if (!input(PIN_CLEAR_ON)) break;
    }
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
4.1 แสดงความหนาเฉลี่ยของกล้วยที่หั่นได้ที่ความเร็วรอบต่างๆ แบบ 2 ใบมีด	35
4.2 แสดงความหนาเฉลี่ยของกล้วยที่หั่นได้ที่ความเร็วรอบต่างๆ แบบ 3 ใบมีด	36
4.3 แสดงอัตราการทำงานของเครื่องหั่นที่ความเร็วรอบต่างๆ	37
4.4 แสดงสัดส่วนความเสียหายที่ความเร็วรอบต่างๆ	39
4.5 แสดงน้ำหนักกล้วยที่ใช้ได้ที่ความเร็วรอบต่างๆ	42



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้าที่
2.1 กลั้วน้ำว้า	5
2.2 กลั้วห้กมูก	6
2.3 กลั้วไข่	7
2.4 ผลิตภัณฑ์กลั้วทอดกรอบ (banana chip)	14
3.1 แสดงแบบโครงสร้างรับน้ำหนัก	23
3.2 แสดงแบบชุดใบมีด	24
3.3 แสดงรูปชุดใบมีด	25
3.4 แสดงแบบหน้าแปลน และเพลที่ใช้ชุดชุดใบมีด	26
3.5 แสดงรูปหน้าแปลน และเพลที่ใช้ชุดชุดใบมีด	26
3.6 แสดงแบบชุดรองรับกลั้ว	27
3.7 แสดงรูปชุดรองรับกลั้ว	28
3.8 แสดงแบบชุดป้อนกลั้ว	29
3.9 แสดงแบบชุดป้อนกลั้ว	29
3.10 แสดงรูปชุดส่งกำลัง	30
4.1 ขั้นตอนการทดลองหาความหนาเฉลี่ยของชั้นกลั้วที่หั่นได้	33
4.2 ขั้นตอนการทดลองหาอัตราการทำงานและเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย	34
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำงานของเครื่องหั่นกลั้วที่ความเร็วรอบต่างๆ	38
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเสียหายที่ความเร็วรอบต่างๆ	40
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำงานสัดส่วนความเสียหายที่ความเร็วรอบต่างๆแบบ 2 ใบมีด	41
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำงานสัดส่วนความเสียหายที่ความเร็วรอบต่างๆแบบ 3 ใบมีด	41
4.7 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักกลั้วที่ใช้ได้ที่ความเร็วรอบต่างๆ	42
4.8 แสดงผลกลั้วที่ปอกเปลือกที่จะใช้ในการหั่น	43
4.9 แสดงชั้นกลั้วที่ผ่านการหั่นด้วยเครื่องหั่นกลั้ว	43
4.10 แสดงการแยกชั้นกลั้วที่สมบูรณ์ และชั้นกลั้วที่เสียหาย	44
4.11 แสดงการแยกชั้นกลั้วที่สมบูรณ์ และชั้นกลั้วที่เสียหายที่ความเร็วรอบต่างๆ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาคผนวก

ตารางที่	หน้าที่
ก.1 แสดงผลการทดลองเพื่อหาความหนาของกล้วยที่ช่วงความเร็วรอบต่างๆ ด้วยเครื่องหั่นกล้วยแบบ 2 ใบมีด	49
ก.2 แสดงผลการทดลองเพื่อหาความหนาของกล้วยที่ช่วงความเร็วรอบต่างๆ ด้วยเครื่องหั่นกล้วยแบบ 3 ใบมีด	50
ก.3 แสดงผลการทดลองเพื่อหาช่วงความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสม ของเครื่องหั่นกล้วยแบบ 2 ใบมีด	51
ก.4 แสดงผลการทดลองเพื่อหาช่วงความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่เหมาะสมของเครื่องหั่นกล้วยแบบ 3 ใบมีด	52
ก.5 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนน้ำหนักเสียหายและสมบูรณ์ของกล้วย ที่หั่น โดยเครื่องหั่นกล้วยแบบ 2 ใบมีด	53
ก.6 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนน้ำหนักเสียหายและสมบูรณ์ของกล้วย ที่หั่น โดยเครื่องหั่นกล้วยแบบ 3 ใบมีด	54
ภาพที่	
ข.1 แบบด้านหน้าของเครื่องหั่นกล้วย	56
ข.2 แบบด้านข้างของเครื่องหั่นกล้วย	57
ข.3 ภาพ 3 มิติ ของเครื่องหั่นกล้วย	58
ข.4 รูปเครื่องหั่นกล้วย	59