

ระบบวัดตัวประกอบคุณภาพของผลึกควอตซ์โดยวิธีส้อมสัญญาณต่ำกว่าความถี่กำหนด



นายกฤษณ์ สันติวิภารัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

QUARTZ Q-FACTOR MEASURING SYSTEM USING SUB-RESONANT SAMPLING SYSTEM

Mr. Kristanai Santiviparat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบวัดตัวประกอบคุณภาพของผลึกควอตซ์โดยวิธีส้อม
	สัญญาณต่ำกว่าความถี่ก้ำจร
โดย	นายกฤตชัย สันติวิภากรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปธา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาธรรม)

กฤตัญญ์ สันติวิภารัตน์ : ระบบวัดตัวประกอบคุณภาพของผลึกควอตซ์โดยวิธีสุ่มสัญญาณต่ำกว่าความถี่ก้ำจร (QUARTZ Q-FACTOR MEASURING SYSTEM USING SUB-RESONANT SAMPLING SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์, 37 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบวัดค่าคงตัวเวลาของตัวตรวจวัด QCM เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางวิทยาศาสตร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ การวัดค่าคงตัวเวลาจะคำนวณจากการลดลงของสัญญาณออสซิลเลต โดยทำการซัดตัวอย่างที่ความถี่ต่ำกว่าสัญญาณเป้าหมาย ในการทำงานจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานวงจรออสซิลเลเตอร์ การเก็บสัญญาณการสั่นของออสซิลเลเตอร์และคำนวณหาค่าคงตัวเวลาจากการลดลงของสัญญาณออสซิลเลตหลังหยุดการทำงาน

ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบวัดด้วยการหยดน้ำปราศจากไอออนปริมาตรต่างๆ ลงบนผิวของ QCM ที่มีความถี่ก้ำจร 12 MHz พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการตรวจจับน้ำปราศจากไอออนได้ดีในช่วงที่ปริมาตรต่ำกว่า 2 ไมโครลิตร และจากการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกแยะสัดส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ที่ปะปนในน้ำในช่วง 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าระบบสามารถแยกแยะความแตกต่างของปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในน้ำได้อย่างชัดเจน ผลการวัดสารตัวอย่างน้ำที่มีแอลกอฮอล์นี้แสดงให้เห็นว่าระบบวัดสามารถวัดตรวจจับความแตกต่างของความหนืดของสารตัวอย่างได้ดี จากผลการทดลองพบว่าระบบสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดได้ในระดับ 2 mPa*s

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5670113721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: QCM / TIME CONSTANT / UNDER-SAMPLING / MICROCONTROLLER / DISSIPATION ENERGY

KRISTANAI SANTIVIPARAT: QUARTZ Q-FACTOR MEASURING SYSTEM USING SUB-RESONANT SAMPLING SYSTEM. ADVISOR: ASSOC. PROF. MANA SRIYUDTHSAK, Ph.D., 37 pp.

This thesis presents a time constant measuring system of the QCM detector for scientific applications. The developed system consists of oscillator and microcontroller. The time constant is determined from the decay oscillation signal using an under-sampling technique. In the operation, the microcontroller is used to control the on/off switch of the oscillator, record the oscillation signals and calculate the time constant of the decay oscillation signals after turning the oscillator off.

In the performance testing, the different quantities of deionized water (DI water) were dropped onto the surface of the QCM with 12 MHz resonant frequency. It was found that the system was effective in detecting the DI water having the volume less than 2 microliters. Additionally, the system was used to classify the water samples with 1-4 % of ethyl alcohol. It was found that the system could clearly classify the difference of ethyl alcohol content in the water. The result indicates that our system can be applied to detect the viscosity of the samples with the resolution of 2 mPa*s.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

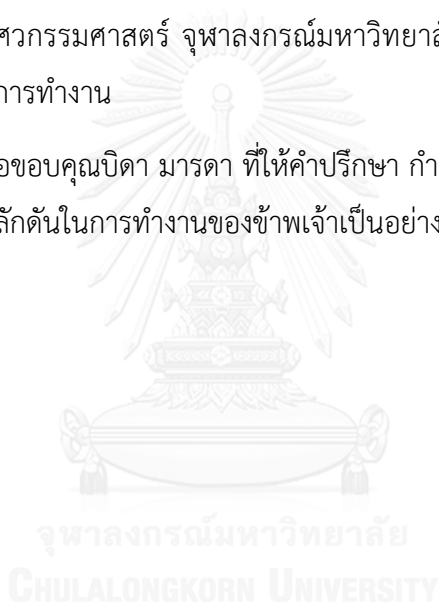
กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา และชี้แนะในสิ่งต่างๆทำให้งานวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดีและเป็นแบบอย่างในการประพฤติและปฏิบัติในการเรียนรู้และการทำงานที่ถูกต้อง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัมย์ และ ผศ. ดร.วันเฉลิม โปรา ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และนิสิตจากห้องปฏิบัติการไปโออิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการเรียนและการทำงาน

และสุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้คำปรึกษา กำลังใจและสนับสนุนทั้งกำลังทรัพย์และเวลา เพื่อเป็นแรงผลักดันในการทำงานของข้าพเจ้าเป็นอย่างดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	1
บทที่1.บทนำ	3
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	3
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	6
บทที่2 ความรู้พื้นฐาน.....	7
2.1. QCM (Quartz Crystal Microbalance).....	7
2.2 ความถี่ก้ำกรของ QCM ค่าคงตัวเวลา และค่า D.....	10
2.2.1 ความถี่ก้ำกร ของ QCM.....	10
2.2.2 ค่าคงตัวเวลา และ ค่า D (Energy dissipation).....	12
2.3 การชักตัวอย่างที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คลื่นสัญญาณ (under sampling).....	14
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	14
บทที่ 3 การออกแบบวงจร	16
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในวงจรวัดค่าคงตัวเวลา.....	16
3.2 หลักการในการคำนวณหาค่าคงตัวเวลาจากความถี่ของการชักตัวอย่างต่ำกว่าความถี่ QCM.....	20
3.3 ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน.....	21

บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	27
4.1 การทดสอบบวจรด้วยผลึกควอตซ์ที่มีความถี่แตกต่างกัน.....	27
4.2 การทดสอบบวจรด้วยน้ำปราศจากอออน (DI water, Deioized water).....	28
4.3 การทดสอบบวจรด้วยการตรวจความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร.....	30
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลงานวิจัยและผลการทดสอบ	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
รายการอ้างอิง	34
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	37



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 QCM ที่ใช้ในการทดสอบ.....	7
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของ QCM.....	8
รูปที่ 2.3 ขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์จากวงจรสมมูลของ QCM โดยกำหนดค่า $L_q = 75\text{mH}$, $C_q = 10\text{fF}$, $R = 100 \Omega$, และ $C_0 = 10\text{pF}$	9
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูล QCM เมื่อมีมวลบนผิว.....	10
รูปที่ 2.5 ขนาดของอิมพีแดนซ์ของ QCM เปรียบเทียบกับ ความถี่ โดยกำหนดค่าดังนี้ $C_1 = 10\text{fF}$, $R_1 = 100 \Omega$, $C_0 = 10\text{pF}$ และเปลี่ยนค่า L_1 เป็นค่าต่าง ๆ.....	11
รูปที่ 2.6 สัญญาณจากการชั่งตัวอย่างต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณเป้าหมาย (เส้นสีน้ำเงิน) เทียบกับ สัญญาณเป้าหมาย (เส้นสีแดง).....	14
รูปที่ 3.1 แผนภาพรวมของวงจรวัดความถี่.....	16
รูปที่ 3.2 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรออสซิลเลเตอร์.....	17
รูปที่ 3.3 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลลีพิตต์.....	17
รูปที่ 3.4 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลลีพิตต์ที่มี tri - state buffer.....	18
รูปที่ 3.5 สัญญาณของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อป้อนลอจิก '0' ให้กับ tri-state buffer.....	19
รูปที่ 3.6 สัญญาณของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อมีลอจิก '1' ให้กับ tri-state buffer.....	19
รูปที่ 3.7 สัญญาณออสซิลเลตก่อนและหลังปิดวงจรออสซิลเลเตอร์และการชั่งตัวอย่างของ ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	20
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหาค่าคงตัวเวลาโดยรวม.....	21
รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงตัวเวลา.....	22
รูปที่ 3.10 ช่วงเวลาที่ทำให้สัญญาณออสซิลเลตมีค่ายอดคงที่.....	23
รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่ายอดสูงสุดในช่วงก่อนปิดวงจรออสซิลเลเตอร์.....	24

รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาและเก็บข้อมูลที่เป็น envelope ของสัญญาณซีกตัวอย่างในช่วงสัญญาณลดลง.....	25
รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณค่าคงตัวเวลา.....	26
รูปที่ 4.1 ค่าคงตัวเวลาของผลึกควอตซ์ที่มีความถี่แตกต่างกัน ($n = 5$).....	27
รูปที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าคงตัวเวลากับค่า D เทียบกับปริมาตรน้ำปราศจากไอออน ($n = 3$).....	28
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวเวลาและค่า D กับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล ($n=5$).....	30



บทที่1.บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ปัจจัยพื้นฐานหนึ่งที่ทำให้เทคโนโลยีมีการพัฒนาได้ คือ การตรวจวัด การตรวจวัดเป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาและวิจัยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์และนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ในการตรวจวัดจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัด ที่เรียกว่าเซนเซอร์ หรือทรานสดิวเซอร์ โดยทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นรูปแบบหนึ่งและยังสามารถแปลงพลังงานรูปแบบนั้นๆให้กลับมาเป็นพลังงานรูปแบบเดิมได้ เช่น อุปกรณ์การวัดที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นอุปกรณ์วัดที่เปลี่ยนพลังงานกลให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าและเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้ากลับเป็นพลังงานกลได้ เป็นต้น

QCM (Quartz crystal microbalance) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่มีความไวสูงและถูกผลิตมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารเพียโซอิเล็กทริก กล่าวคือ โดยทั่วไป QCM จะมีค่าความถี่กัมมาตรเฉพาะตัวที่ค่าๆ หนึ่ง ซึ่งขึ้นกับชนิด การตัด และความหนาของผลึกที่นำมาใช้ QCM มีคุณสมบัติที่ดีหลายข้อ เช่น สามารถตรวจวัดสารในรูปของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซได้ วัดของเหลวในระดับไมโครลิตรได้ มีราคาไม่สูง เป็นต้น ทำให้นักวิจัยนำ QCM มาใช้งานที่หลากหลาย เช่น การตรวจวัดชั้นฟิล์มบางบนผิวของ QCM[1], การตรวจจับดีเอ็นเอ[2] เป็นต้น ในการตรวจวัดของ QCM นั้น โดยทั่วไปจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของมวลที่วางลงไปบนผิวของ QCM จากความถี่กัมมาตรของผลึกที่เปลี่ยนไป[3] มีรายงานงานวิจัยว่า ได้นำคุณสมบัติดังกล่าวไปใช้เป็นระบบตรวจจับปฏิกิริยาต่างๆทางชีวภาพ เช่น การตรวจจับปฏิกิริยาไฮบริดเซชันของ DNA โดยพบว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาทำให้สายของ DNA ยาวมากขึ้น ความถี่กัมมาตรของ QCM จะมาค่าลดลง[4] แต่ข้อจำกัดในการวัดเกิดขึ้นเนื่องจากสารต้อง มีลักษณะ 1.เป็นเนื้อเดียวกัน (uniform) 2.เป็นของแข็ง (rigid) 3.เป็นฟิล์มบาง (thin film) เมื่อวัดสารที่มีสถานะเป็นของเหลวทำให้เกิดข้อผิดพลาดเกิดขึ้น จึงงานวิจัยที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่กัมมาตรมีผลจากความหนาแน่นและความหนืดของของเหลวที่สัมผัสกับ QCM [5]

ถึงแม้ว่ามีการวัดความถี่กัมมาตรของ QCM จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของมวลและความหนืดของเหลวที่อยู่บนผิวของ QCM ได้ แต่มีงานวิจัยที่เสนอว่าการวัดความถี่ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ เช่น ในการวัดตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงจากความถี่กัมมาตรได้ แต่ในการวัดตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดปัญหาให้การวัด[6] ทำให้มีการเสนอ

การหาค่า Q (Quality factor) [6, 7] หรือค่า D (Energy dissipation) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของมวลที่สัมผัสกับ QCM ซึ่งค่าทั้งสองเป็นค่าที่แปรผกผันซึ่งกันและกัน โดยที่ค่า D เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนพลังงานที่สูญเสียไปต่อพลังที่สะสมภายใน QCM ซึ่งระบบมีค่า D ที่มากจะแสดงถึงการสูญเสียพลังงานที่มากด้วย ตัวแปร D มีความสัมพันธ์กับสารที่สัมผัสอยู่กับ QCM ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากตัวตรวจวัด QCM กับสารที่นำมาตรวจวัดได้หลากหลายมากขึ้น ในการวัดค่า Q หรือค่า D สามารถวัดได้หลายวิธี เช่น การวัดค่าจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ และการวัดค่าจากค่าคงตัวเวลา

ทำให้มีกลุ่มวิจัยเสนอให้วัดค่าของ Q ของ QCM พร้อมกับหาความถี่ก่าธร [7] จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้ การวัดเริ่มด้วยการใช้เครื่อง VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator) ให้สัญญาณแรงดัน RF รูปไซน์ที่มีความถี่กวาดอยู่ในช่วง 9962 kHz ถึง 9993 kHz กับ QCM ผ่านเครื่อง AGC (Automatic Gain Control) amplifier จากนั้นวัดค่ากระแสที่ได้มาจาก QCM โดยจะถูกแปลงให้เป็นแรงดัน เพื่อนำไปคูณเข้าสัญญาณแรงดันที่ออกมาจากเครื่อง AGC amplifier ทำให้ได้สัญญาณออกมาเป็น 2 สัญญาณ ได้แก่ สัญญาณฮาร์โมนิกที่ 2 (2 ω) และสัญญาณกระแสตรง ซึ่งสัญญาณกระแสตรงจะมีความสัมพันธ์กับส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ของ QCM จึงต้องกำจัดสัญญาณฮาร์โมนิกที่ 2 ผ่านวงจรกรองต่ำ (low pass filter) และทำงานเก็บค่ายอดของสัญญาณกระแสตรงระหว่างการกวาดความถี่ด้วยวงเก็บค่ายอด ซึ่งจะสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์และค่า Q ได้จากค่าสัญญาณกระแสตรงที่จุดต่ำสุด อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวเป็นการตรวจวัดที่ไม่ได้หาค่า D โดยตรง

นอกจากนี้ยังมีกลุ่มวิจัยเสนอให้เก็บค่า D จากการวัดค่าคงตัวเวลา [8] จากการลดลงของสัญญาณ QCM ด้วยการใช้รีเลย์ในการเปิด-ปิดแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่ออสซิลเลเตอร์ที่มี QCM เป็นรีโซเนเตอร์ เมื่อทำงานปิดแหล่งจ่ายจะส่งผลให้สัญญาณรูปไซน์จาก QCM ตกลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากนั้นจะใช้เครื่องออสซิลโลสโคปจับรูปสัญญาณที่เปลี่ยนไปและส่งไปที่คอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลหาค่าคงตัวเวลาต่อไป

ในปี 2555 นายศวิษฐ์ ฌ สงขลา ได้วิจัยหาค่า Q โดยการใช้ FPGA รุ่น CYCLONE 3 ของบริษัท Altera ในการหา Q จากการหาค่าคงตัวเวลา จากการวัดการลดลงของสัญญาณ QCM หลังจากการตัดสัญญาณไฟฟ้าของวงจรออสซิลเลเตอร์โดยใช้ tri-state buffer โดยพิจารณาจาก envelope ของสัญญาณผ่านทางคอมพิวเตอร์ พร้อมวัดความถี่ก่าธรจากการสร้างโมดูลหาค่าความถี่ภายใน FPGA อย่างไรก็ตามพบว่ายังมีค่าแปรปรวนมากในการหาค่าคงตัวเวลาเมื่อมีมวลเกาะที่ผิวของ QCM ในปริมาณมากจากกล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่า D หรือค่า Q ของ QCM เป็นข้อมูลที่

สำคัญ นอกเหนือจากค่าความถี่ โดยสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน [9]

ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ DNA ซึ่งในปี 2004 ได้มีกลุ่มนักวิจัยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ DNA ด้วยตัวตรวจจับ QCM พบว่า การวัดความถี่ กัมพรและค่า D ของ DNA มีการเปลี่ยนแปลงของที่สอดคล้องกันและมีไม่สอดคล้องกันในบางกรณี [10] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวัดค่า D เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของ QCM นอกจากการวัดความถี่กัมพร ดังนั้นจึงเสนอระบบการวัดค่า D ของตัวตรวจวัด QCM โดย ออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC33FJ128GP708 I/PT ของบริษัท Microchip และหาค่า D จากการวัดคงตัวเวลาของ QCM ในช่วงที่ลดลงของสัญญาณ QCM หลังจากปิดการทำงานของวงจร ออสซิลเลเตอร์ผ่านทาง tri-state buffer ด้วยวิธีการซิกตัวอย่างต่ำกว่าสัญญาณ QCM (under-sampling) ซึ่งจะสามารถลดหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่า D ต่อไป โดยมีเป้าหมายในการวัดค่า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบระบบของการอ่านค่าคงตัวเวลาของการตกลงของสัญญาณ QCM ด้วยวิธี under sampling
2. ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาระบบที่เหมาะสมกับหาค่าคงตัวเวลา จากการวัดค่ายอดของสัญญาณที่ตกลงของ QCM ด้วยความถี่ในการสุ่มเก็บสัญญาณที่ต่ำกว่าความถี่ QCM
2. ใช้ QCM 12 MHz ในการทำการทดสอบ
3. ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือในการวัดหาค่าคงตัวเวลาของของเหลว

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ออกแบบวงจรตรวจวัดค่าคงตัวเวลา

- ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวเวลาจาก QCM ด้วยน้ำและสารละลาย แอลกอฮอล์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ได้พัฒนาระบบการหาค่าคงตัวเวลาของ QCM เพื่อใช้คำนวณค่า D (Dissipation energy) เพื่อเป็นแนวทางและประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม

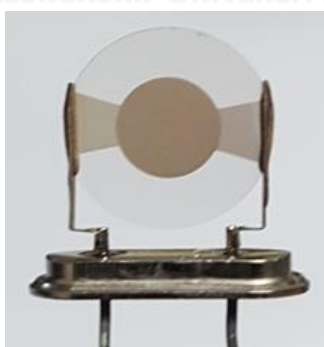


บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่จำเป็นในการดำเนินการ โดยเริ่มจากหลักการการทำงานของ QCM การเปลี่ยนแปลงความถี่กัซทร การวัดค่าคงคงตัวเวลาและการคำนวณค่า Q (Quality factor) หรือ ค่า D (Energy dissipation) เพื่อนำไปความรู้ไปใช้ในการออกแบบระบบ

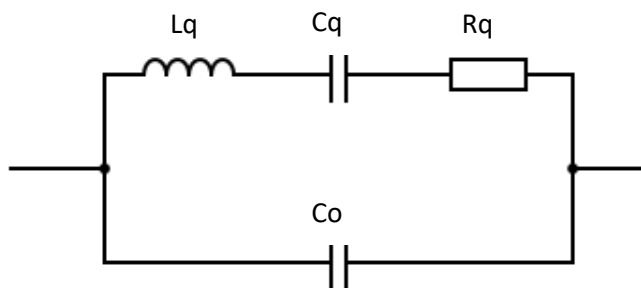
2.1. QCM (Quartz Crystal Microbalance)

QCM (Quartz Crystal Microbalance) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตมาจากผลึกควออตซ์ ที่มีคุณสมบัติของ piezoelectric กล่าวคือ เมื่อทำการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับผลึกควออตซ์ ผลึกจะทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลในรูปแบบการสั่นของผลึก ในทางกลับกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการสั่นของผลึกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเกิดขึ้น ทำให้สามารถตรวจวัดแรงหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนผิวของผลึกได้จากของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้น การตัดผลึกควออตซ์เพื่อนำมาใช้งานนั้นมีหลายรูปแบบขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน โดยทั่วไปหากจะนำไปประยุกต์ใช้งานทั่วไปที่ไม่ใช่การวัดอุณหภูมิ ก็จะใช้ในรูปแบบ AT-cut ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิมีค่าประมาณศูนย์ที่อุณหภูมิในช่วง 0-50°C ทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้ในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของ QCM ที่นำมาใช้งาน จากรูปจะเห็นว่าจะมีอิเล็กโทรดติดอยู่ทั้งสองด้านของผลึก ซึ่งมีไว้สำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้ผลึกสั่น



รูปที่ 2.1 QCM ที่ใช้ในการทดสอบ

โครงสร้างของ QCM สามารถอธิบายได้ในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ตามวงจรของ Butterworth-van-Dyke ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของ QCM

วงจรถังกล่าวจะใช้อธิบายผลต่างๆที่เกิดขึ้นภายใน QCM ในเชิงกลศาสตร์ได้ดังนี้

- ค่า C_q แทนความยืดหยุ่นเชิงกลของ QCM
- ค่า L_q แทนมวลเบื้องต้นของ QCM
- ค่า R_q แทนการสูญเสียภายในระบบ การต้านการเปลี่ยนแปลงของผลึก และการลดลงของสัญญาณ
- ค่า C_o แทนค่าเก็บประจุที่เกิดจากอิเล็กโทรดของ QCM

เมื่อคำนวณผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์รวมจากวงจรสมมูลของ QCM จากคำนวณการนำไฟฟ้าจากวงจรสมมูลของ QCM ได้ดังนี้

$$Y = j\omega C_0 + \frac{1}{R + j\omega L_q + \frac{1}{j\omega C_q}}$$

$$Y = j\omega C_0 + \frac{j\omega C_q}{(1 - \omega^2 L_q C_q) + j\omega R C_q}$$

$$Y = \frac{-\omega^2 R C_q C_0 + j(\omega C_0 - \omega^3 C_0 C_q L_q + \omega C_q)}{(1 - \omega^2 L_q C_q) + j\omega R C_q}$$

เมื่อคำนวณหาความต้านทานรวมของวงจรสมมูลของ QCM ดังสมการที่ (2.1)

$$Z = \frac{1}{Y} = R + jX \quad (2.1)$$

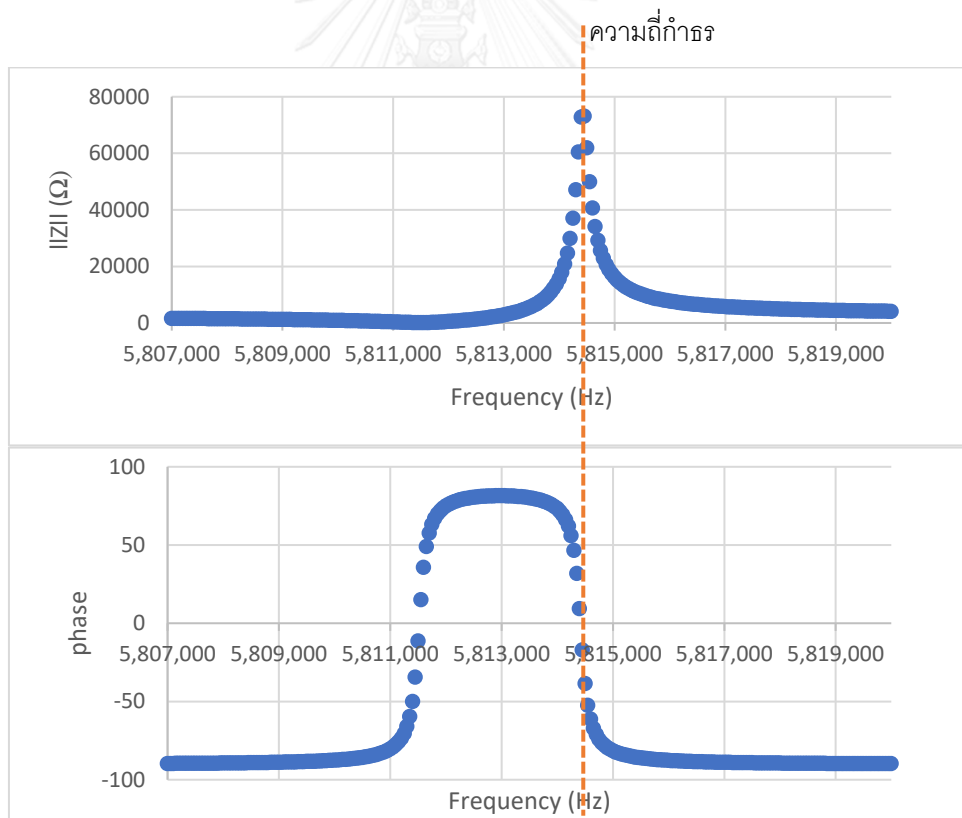
$$\|Z\| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad (2.3)$$

$$\text{โดยที่ } R = \frac{\omega^2 R C_q^2}{(\omega^2 R C_q C_0)^2 + (\omega C_0 + \omega C_q - \omega^3 C_0 C_q L_q)^2}$$

$$X = \frac{-\omega^5 C_0 C_q^2 L_q^2 + 2\omega^3 C_0 C_q L_q - \omega^3 R^2 C_0 C_q^2 + \omega^3 L_q C_q^2 - \omega C_0 - \omega C_q}{(\omega^2 R C_q C_0)^2 + (\omega C_0 + \omega C_q - \omega^3 C_0 C_q L_q)^2}$$

จากสมการ (2.1) จะสามารถหาขนาดของอิมพีแดนซ์ได้จากสมการ (2.2) และมุมของอิมพีแดนซ์จากสมการ (2.3) เมื่อพิจารณาในช่วงที่เกิดความถี่ก้ำกัหรือมีของอิมพีแดนซ์สูงสุด และมีมุมของอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นศูนย์ จะมีลักษณะขนาดอิมพีแดนซ์และมุมเป็นดังรูปที่ 2.1

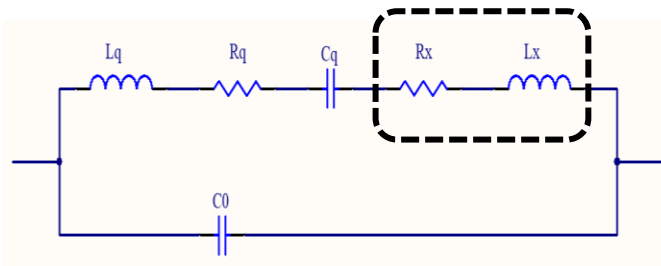


รูปที่ 2.3 ขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์จากวงจรสมมูลของ QCM โดยกำหนดค่า $L_q = 75\text{mH}$,

$$C_q = 10\text{fF}, R = 100 \Omega, \text{ และ } C_0 = 10\text{pF}$$

2.2 ความถี่ก้ำจรของ QCM ค่าคงตัวเวลา และค่า D

ในการใช้ QCM วัดมวลและความหนืดของสารมีตัวแปรที่น่าสนใจ 2 ตัว คือ ความถี่ก้ำจร (Resonant frequency) ของ QCM และค่า D ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการสูญเสียพลังงานของ QCM โดยการเปลี่ยนแปลงค่าทั้ง 2 จะเกิดจากมวลหรือของเหลวที่มาเกาะอยู่บนผิวของ QCM ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยอธิบายได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูล QCM เมื่อมีมวลบนผิว

2.2.1 ความถี่ก้ำจร ของ QCM

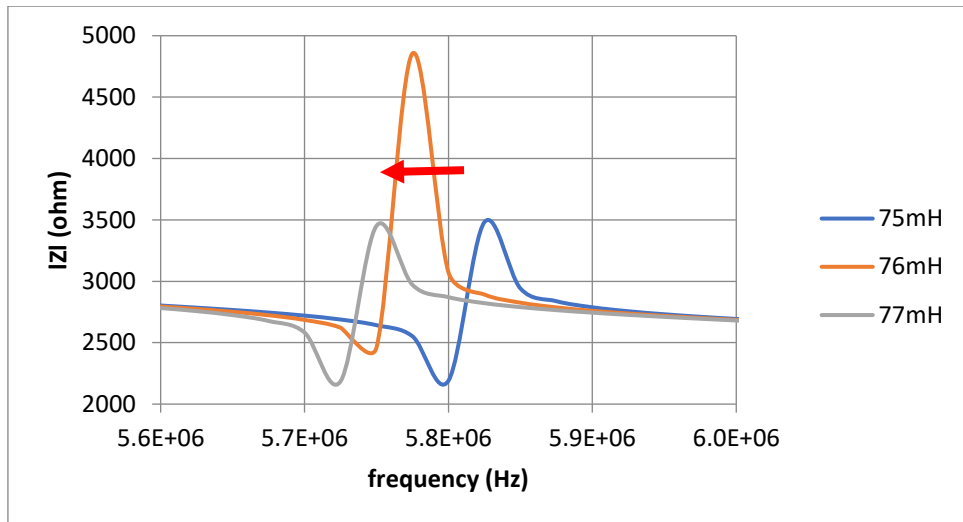
ความถี่ก้ำจร (f_0) เป็นความถี่ที่เกิดจากการสั่นพ้องภายในของ QCM สามารถหาได้จากการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ด้วยวิธีเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network analyzer) หรือการวัดจากสัญญาณออสซิลเลเตอร์ที่มี QCM เป็นรีโซเนเตอร์โดยตรง จากสมการ (2.4) เป็นสมการคำนวณความถี่ก้ำจรตั้งต้นจากโมเดลของ Butterworth-van-Dyke [11] โดยไม่มีผลจากการกระทำภายนอกมารบกวน

$$f_0 = \left[2\pi \sqrt{C_q L_q} \right]^{-1} \quad (2.4)$$

$$f_0 = \left[2\pi \sqrt{C_q (L_q + L_x)} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

เมื่อมีมวลมาเกาะที่พื้นผิวของ QCM ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปดังรูป 2.3 ซึ่งส่งผลให้ความถี่ก้ำจรของ QCM เปลี่ยนแปลงไปตามสมการ(2.5) และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์จากวงจรสมมูลพบว่า ความถี่ก้ำจรของ QCM จะมีการเปลี่ยนแปลงไปค่าเหนี่ยวนำของวงจรสมมูล เมื่อค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นจะส่งผลให้ความถี่ก้ำจรของ QCM มีค่าลดลงดังรูปที่

2.5



รูปที่ 2.5 ขนาดของอิมพีแดนซ์ของ QCM เปรียบเทียบกับ ความถี่ โดยกำหนดค่าดังนี้ $C1 = 10\text{fF}$, $R1 = 100 \Omega$, $C0 = 10\text{pF}$ และเปลี่ยนค่า $L1$ เป็นค่าต่าง ๆ

สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความถี่กับมวลที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถคำนวณจากสมการของซอร์เบอรี (Sauerbrey's equation) ดังสมการที่ (2.6)

$$\Delta f = - \left[\frac{2f_0^2}{A\sqrt{\mu_q\rho_q}} \right] \Delta m \quad (2.6)$$

โดยที่	Δf	คือ ความถี่การที่เปลี่ยนแปลงไป (Hz)
	f_0	คือ ความถี่การตั้งต้น (Hz)
	μ_q	คือ ค่ามอดูลัสเฉือนของผลึกควออร์ตซ์ = $2.947 \times 10^{11} \text{ (g}^*\text{cm}^{-1}\text{s}^{-2}\text{)}$
	ρ_q	คือ ค่าความหนาแน่นของผลึกควออร์ตซ์ = $2.648 \text{ (g}^*\text{cm}^{-3}\text{)}$
	A	คือ พื้นที่ของผลึกที่มีอิเล็กโทรด (cm^2)
	Δm	คือ มวลของวัตถุที่เกาะบนผิวผลึกควออร์ตซ์ (g)

ข้อจำกัดของสมการของซอร์เบอรีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ลดลงกับมวลที่เพิ่มขึ้นเป็นแบบลักษณะเชิงเส้นนั้น สารที่มาวัดนั้นต้องมีลักษณะดังนี้ คือ 1.เป็นเนื้อเดียวกัน (uniform) 2.เป็นของแข็ง (rigid) 3.เป็นฟิล์มบาง (thin film) จึงจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการของซอร์เบอรี สมการของซอร์เบอรีไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนความถี่ที่เกิดในการวัด

สารที่มีสถานะเป็นของเหลว ที่มีผลของความหนาแน่นและความหนืดของของเหลว ในกรณีนี้การเปลี่ยนแปลงของความถี่ก่าธจากการที่ QCM สัมผัสกับของเหลวจะสามารถอธิบายได้จากสมการของคานาซาวา (Kanazawa's equation) ดังสมการที่ (2.7)

$$\Delta f = f_0^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\eta \rho}{\pi \mu_q \rho_q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

โดยที่	Δf	คือ ความถี่ก่าธที่เปลี่ยนแปลงไป (Hz)
	f_0	คือ ความถี่ก่าธตั้งต้น (Hz)
	η	คือ ค่าความหนืดของของเหลวที่ผิวผลึกควอร์ซ (g*s*cm ⁻¹)
	ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว (g*cm ⁻³)
	μ_q	คือ ค่ามอดูลัสเฉือนของผลึกควอร์ซ = 2.947*10 ¹¹ (g*cm ⁻¹ *s ⁻²)
	ρ_q	คือ ค่าความหนาแน่นของผลึกควอร์ซ = 2.648 (g*cm ⁻³)

2.2.2 ค่าคงตัวเวลา และ ค่า D (Energy dissipation)

ค่า Q เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนของพลังงานที่สะสมต่อพลังงานที่สูญเสียของ QCM ซึ่งพลังงานที่สะสมของ QCM จะถูกเก็บไว้ภายในตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำและพลังงานที่สูญเสียจะสามารถดูได้จากค่า ความต้านทานของ QCM ค่า Q สามารถหาได้โดยหาจากค่าคงตัวเวลาที่เกิดจากการลดลงของสัญญาณ QCM เมื่อตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่วงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณไซน์ที่ตกลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามสมการดังสมการ (2.8)

$$A(t) = Ae^{\frac{-t}{\tau}} \sin(2\pi ft + \alpha) \quad (2.8)$$

โดยที่	f	คือความถี่ก่าธสัญญาณที่มาจาก QCM (Hz)
	τ	คือค่าคงตัวเวลาในการลดลงของสัญญาณ (s)
	A	คือแรงดันยอดของสัญญาณ (V)

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของ QCM จากรูป 2.2 เพื่อใช้ในการพิจารณาหาค่า Q จากค่าอิมพีแดนซ์ของ QCM ได้ดังนี้

โดยการพิจารณาค่า Q จะประมาณค่าของอิมพีแดนซ์จากวงจรสมมูลของ QCM ให้อยู่ในรูปของวงจรลำดับที่หนึ่งตามสมการ (2.1) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Q ได้จากอัตราส่วนพลังงานสะสมที่เก็บอยู่ในตัวแปร x ต่อพลังงานที่สูญเสียคิดจากตัวแปร R ได้ตามสมการที่ (2.9) และคำนวณค่าคงตัวเวลาได้จากสมการ (2.10)

$$Q = \frac{1}{D} = \frac{I^2 X}{I^2 R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{R}{L} = RC \quad (2.10)$$

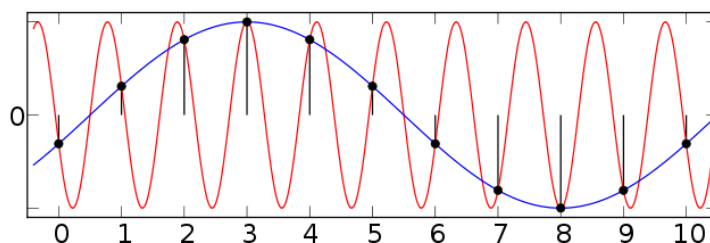
โดยที่	Q	คือ อัตราส่วนของพลังงานสะสมต่อพลังงานที่สูญเสีย
	ω	คือ ความถี่เชิงมุมของความถี่กำลัง (rad/s)
	R_q	คือ ความต้านทานของ QCM (Ω)
	L_q	คือ ค่าเหนี่ยวนำสมมูล (H)
	C_q	คือ ค่าความจุสมมูล (F)

จากวงจรสมมูลของ QCM เมื่อมีมวลอยู่บนผิวของ QCM ในรูปที่ 2.4 เมื่อมีมวลอยู่บนผิวของ QCM จะส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าคงตัวเวลาจะมีเปลี่ยนแปลงไปตามสมการ (2.11)

$$\tau = \frac{R+R_x}{L+L_x} \quad (2.11)$$

โดยที่	R_x	คือ ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีมวลอยู่บนผิวของผลึกควอตซ์ (Ω)
	L_x	คือ ค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีมวลอยู่บนผิวของผลึกควอตซ์ (H)

2.3 การซัดตัวอย่างที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คลื่นสัญญาณ (under sampling)



รูปที่ 2.6 สัญญาณจากการซัดตัวอย่างต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณเป้าหมาย (เส้นสีน้ำเงิน) เทียบกับสัญญาณเป้าหมาย (เส้นสีแดง) (ที่มา <https://en.wikipedia.org/wiki/Aliasing>)

รูปที่ 2.6 แสดงการซัดตัวอย่างที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณขาเข้า ผลลัพธ์ของการซัดตัวอย่างที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งเรียกว่า Aliasing ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital convertor) การซัดตัวอย่างลักษณะนี้จะได้ผลลัพธ์ที่มีความถี่ต่ำกว่าสัญญาณจริง จะเห็นได้จากรูปที่ 2.4 เส้นสีแดงเป็นสัญญาณเป้าหมาย และเส้นสีน้ำเงินเป็นผลจากการซัดตัวอย่าง โดยในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลการซัดตัวอย่างดังกล่าวจะสามารถช่วยลดพื้นที่หน่วยเก็บข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ แต่มีข้อเสียจากข้อมูลที่ผิดพลาดจากผลที่เกิดจาก Aliasing

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

เป็นอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กที่มีความสามารถคล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ ที่สามารถเขียนโปรแกรมในการควบคุมระบบทางอิเล็กทรอนิกส์และสามารถเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโปรแกรมภายในหน่วยความจำในภายหลังได้ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีโครงสร้างโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ ดังต่อไปนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit)
2. หน่วยความจำ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกหน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program memory) ซึ่งข้อมูลที่เก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไป แม้ไม่มีไฟเลี้ยงอีกส่วนเป็นหน่วยความจำข้อมูล (Data memory) ใช้ในการเก็บข้อมูลชั่วคราว โดยข้อมูลในส่วนนี้จะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง
3. ส่วนติดต่ออุปกรณ์ภายนอก (Port) เป็นส่วนรับและส่งสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอก

4. ส่วนช่องทางสัญญาณ (Bus) เป็นเส้นทางในการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต
5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา เป็นส่วนกำหนดจังหวะการทำงานที่เกิดขึ้นในไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้บอร์ด ET-dsPIC33WEB V1.0 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล dsPIC ของบริษัท Microchip โดยได้นำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต เบอร์ dsPIC33FJ128GP708 มาพัฒนาเป็นบอร์ดใช้งาน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ความเร็วในการประมวลผล 40 MIPS (16 Bit Data / 24 Bit Instruction Code)
- โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีความละเอียด 10-bit จำนวน 24 ช่อง และสามารถโปรแกรมเป็น 12-bit ได้ 2 ช่อง ความเร็วในการซิกตัวอย่างสัญญาณสูงสุด 1.1 MSPS
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash Memory ขนาด 128 K Byte
- หน่วยความจำข้อมูล SRAM ขนาด 16 K Byte
- I/O Ports ใช้งานจำนวน 69 บิต(รวม Peripheral Function ต่างๆ)
- โมดูลการสื่อสาร UART จำนวน 2 ช่อง
- โมดูลการสื่อสารแบบ SPI จำนวน 2 ช่องรองรับทั้ง Master และ Slave Modes
- โมดูลการสื่อสารแบบ I2C จำนวน 2 ช่องรองรับทั้ง Master และ Slave Modes
- โมดูลการสื่อสารแบบ CAN จำนวน 2 ช่อง
- โมดูล Timer ขนาด 16-bit จำนวน 9 ช่อง และสามารถจับคู่ใช้งานเป็น Timer ขนาด 32 Bit ได้พร้อมกันจำนวน 4 ช่อง
- โมดูล Capture , Compare / PWM จำนวน 8 ชุด

บทที่ 3 การออกแบบวงจร

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรที่ใช้ในการวัดค่าคงตัวเวลา โดยอธิบายรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ของวงจร หลักการในการคำนวณค่าคงตัวเวลาและรายละเอียดของของโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์

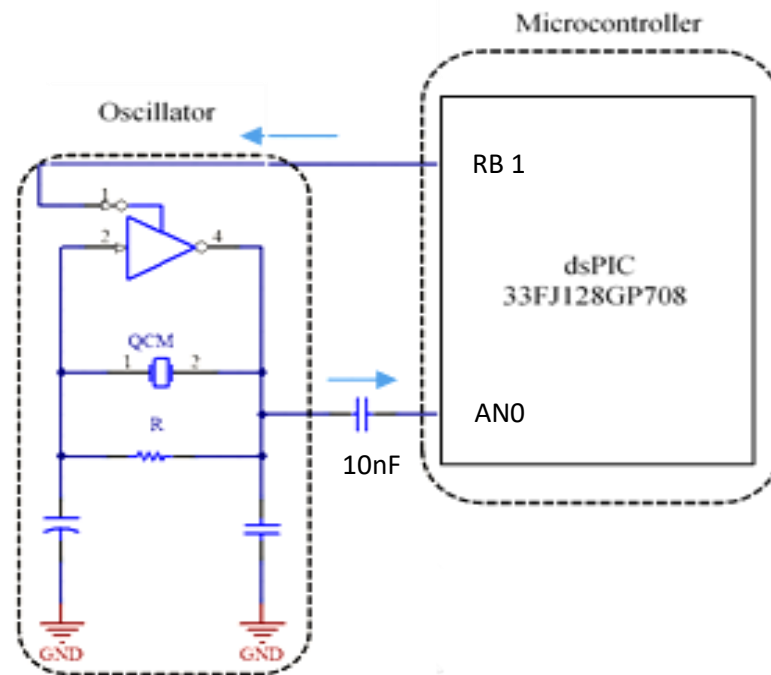
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในวงจรวัดค่าคงตัวเวลา

วงจรพื้นฐานในการวัดค่าคงตัวเวลามีส่วนประกอบหลักแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ วงจรออสซิลเลเตอร์ที่มี QCM เป็นรีโซเนเตอร์ และวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ และ ใช้เก็บข้อมูลสัญญาณก่อนและหลังปิดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์พร้อมทั้งคำนวณหาค่าคงตัวเวลาและส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพรวมของวงจรวัดความถี่

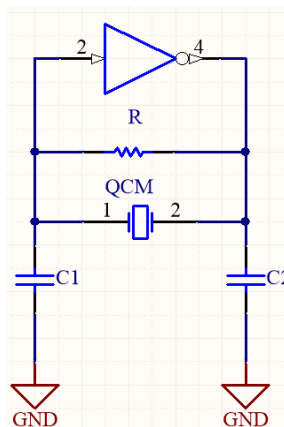
ในการเชื่อมต่อระหว่างวงจรออสซิลเลเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเชื่อมต่อขาแอนะล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 10 นาโนฟารัด ต่ออนุกรมระหว่างวงจรออสซิลเลเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้เป็นตัวกรองสัญญาณไฟฟ้า กระแสตรงก่อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจะทำการเก็บค่าจากสัญญาณออสซิลเลตทั้งก่อนและหลังปิดวงจรออสซิลเลเตอร์ และใช้ขาเอาต์พุตอาร์บี 1 (RB 1) เป็นตัวส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยป้อนให้กับ Tri-state buffer ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรออสซิลเลเตอร์

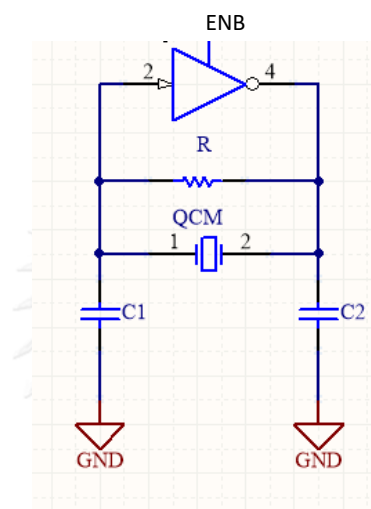
วงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิตต์ (col-pitt oscillator) เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์พื้นฐาน โดยมีไอซีอินเวอร์เตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ 2 ตัวเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเฟสของสัญญาณให้ครบ 360 องศา โดยมี QCM เป็นรีโซเนเตอร์ มีลักษณะการต่อวงจรเป็นรูปพาย (Pi) ดังรูปที่ 3.3



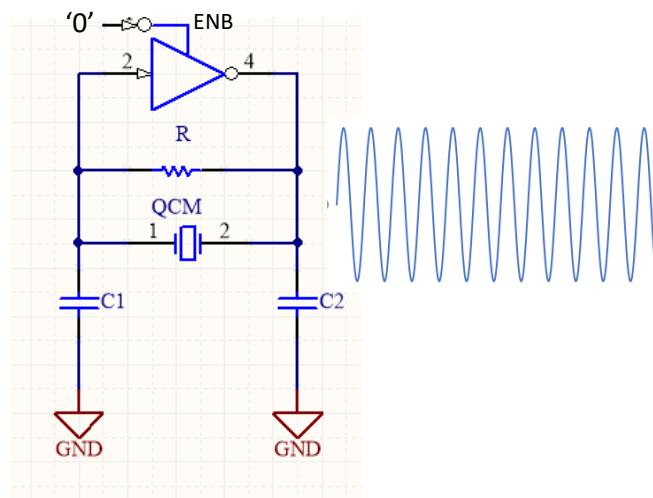
รูปที่ 3.3 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิตต์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีเป้าหมายในการวัดค่าคงตัวเวลาจากการตกลงของสัญญาณออสซิลเลตจากนิยามของค่าคงตัวเวลา (Time constant) คือระยะเวลาที่ระบบตอบสนองต่อการลดลงแบบบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step) โดยจะลดลงไป 63.2% ของค่ายอดของสภาวะกระตุ้น ทำให้การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ต้องสามารถหยุดการทำงานได้เพื่อให้สัญญาณออสซิลเลตลดลง ในการควบคุมนี้ได้อุปกรณ์ไอซี Tri-state buffer แบบอินเวอร์เตอร์แทนอินเวอร์เตอร์ธรรมดาเพื่อสามารถควบคุมการทำงานหรือกล่าวคือการเปิด-ปิดออสซิลเลตของ QCM ได้ โดยมีลักษณะของวงจรใหม่เป็นดังรูปที่ 3.4



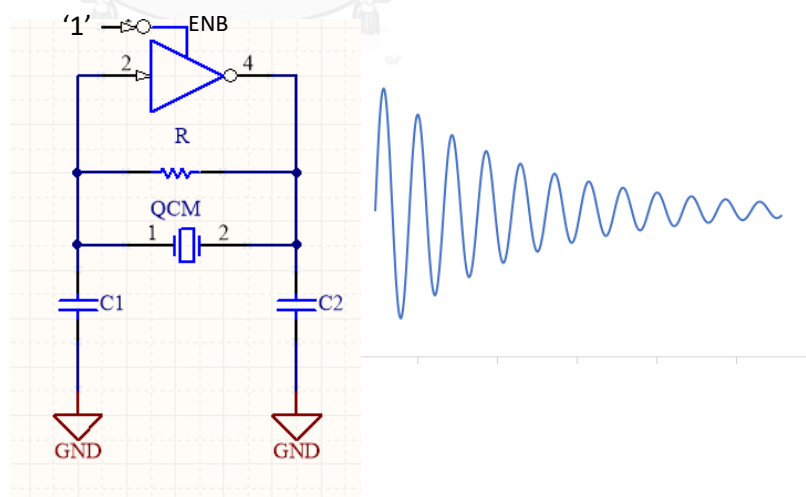
รูปที่ 3.4 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลด์ฟิตต์ที่มี tri - state buffer

ไอซี tri-state buffer ที่เลือกใช้ คือ ไอซี HC 366 ซึ่งมีอินเวอร์เตอร์ที่เป็น tri-state buffer ในตัว สามารถควบคุมการเปิด-ปิดด้วยลอจิกเกต NAND การทำงานของ tri-state buffer ทำได้โดยเมื่อมีลอจิก '0' ป้อนให้กับขา ENB(Enable) วงจรออสซิลเลเตอร์จะครบวงจร ทำให้สัญญาณออสซิลเลตเกิดจากสั่นจนมีค่ายอดคงที่ดังรูปที่ 3.5



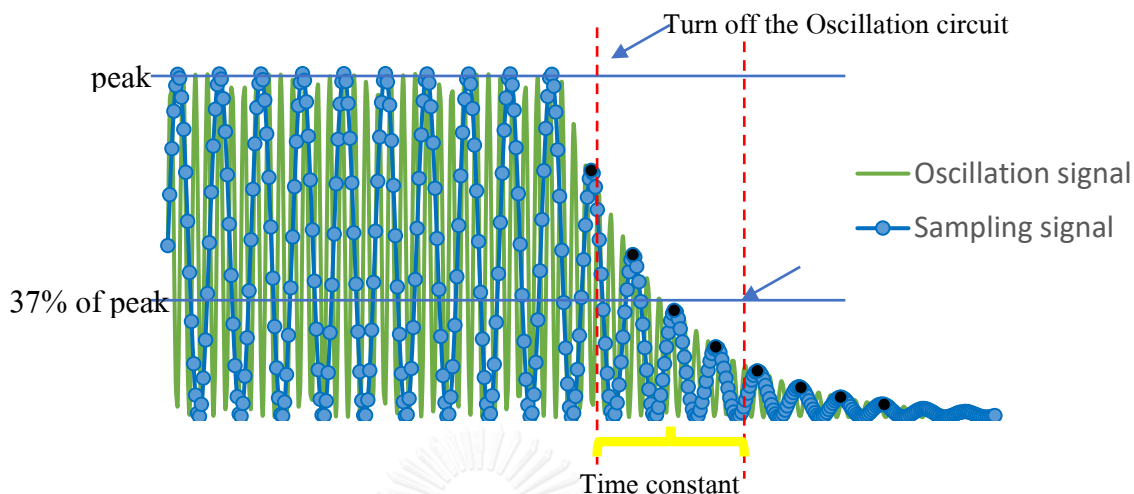
รูปที่ 3.5 สัญญาณของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อป้อนลอจิก '0' ให้กับ tri-state buffer

และเมื่อป้อนสัญญาณลอจิก '1' ให้แก่ขา ENB จะส่งผลให้ความต้านทานภายในของ tri-state buffer มีค่ามากขึ้นจนทำให้ไม่เกิดการออสซิลเลตของสัญญาณหรือวงจรออสซิลเลเตอร์หยุดการทำงาน ค่ายอดของสัญญาณออสซิลเลตที่มีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานไปดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สัญญาณของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อมีลอจิก '1' ให้กับ tri-state buffer

3.2 หลักการในการคำนวณหาค่าคงตัวเวลาจากความถี่ของการซັกดตัวอย่างต่ำกว่าความถี่ QCM



รูปที่ 3.7 สัญญาณออสซิลเลตก่อนและหลังปิดวงจรรอสซิลเลเตอร์และการซັกดตัวอย่างของ ไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นสัญญาณออสซิลเลตและสัญญาณที่เกิดจากการซັกดตัวอย่างที่มีความถี่ต่ำกว่าสัญญาณออสซิลเลตของ QCM ในการหาค่าคงตัวเวลาจะใช้สัญญาณที่ได้จากการซັกดตัวอย่างมาใช้ในการคำนวณ จากรูปที่ 3.7 จะสามารถแบ่งช่วงของสัญญาณออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงวงจรรอสซิลเลเตอร์ทำงาน และช่วงวงจรรอสซิลเลเตอร์หยุดทำงาน

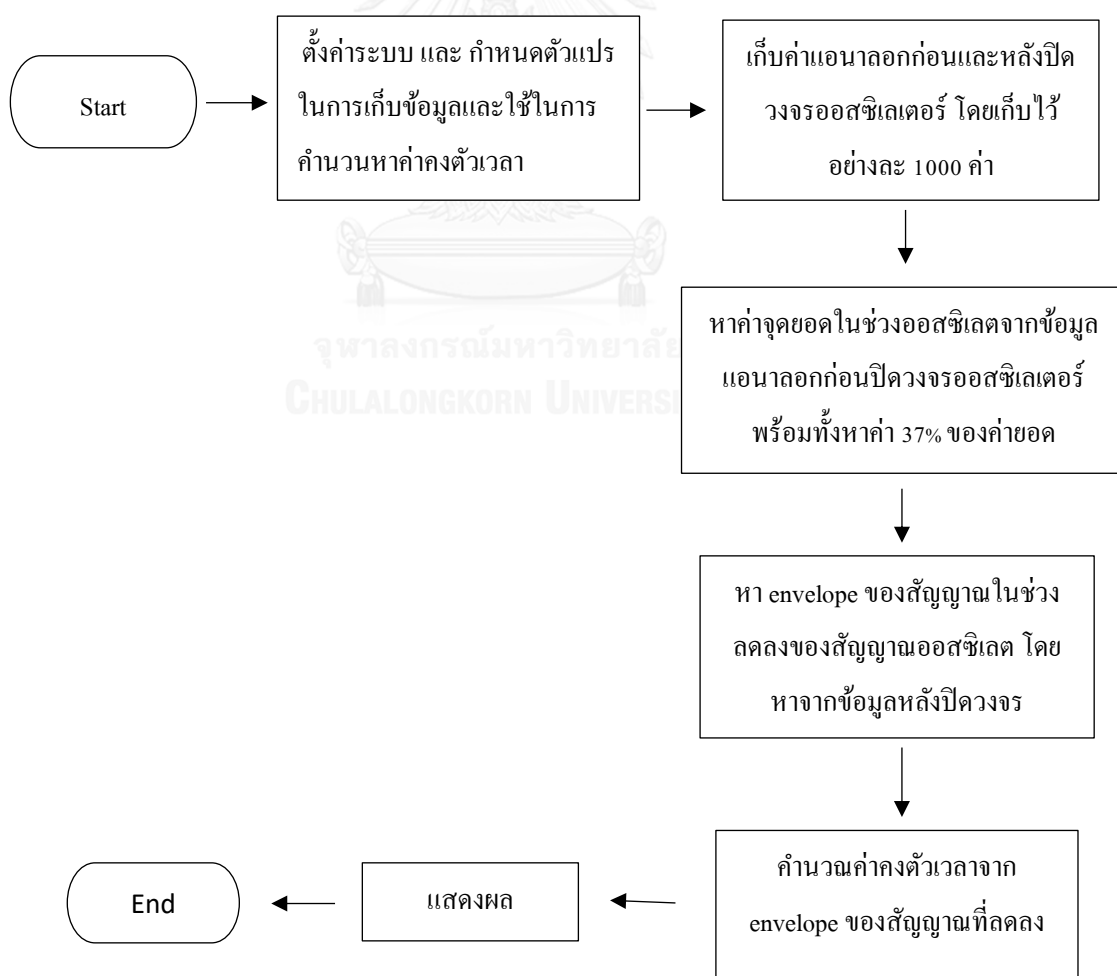
ในช่วงที่วงจรรอสซิลเลเตอร์ทำงานจะเป็นช่วงที่ใช้ในการหาค่ายอดของสัญญาณออสซิลเลตจากสัญญาณซັกดตัวอย่าง กล่าวคือจะได้ค่า 100% ของค่ายอด และช่วงวงจรรอสซิลเลเตอร์หยุดทำงานจะเป็นช่วงที่ใช้หาค่าคงตัวเวลา การทำงานจะเริ่มจากการหาจุดยอดของสัญญาณซັกดตัวอย่างในขณะที่กำลังลดลง (จุดสีดำในรูป 3.7) หลังจากนั้นพิจารณาการลดลงของสัญญาณออสซิลเลตที่มีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล โดยการหาค่าคงตัวเวลาจากช่วงระหว่างจุดยอด 2 จุด สามารถคำนวณค่าคงตัวเวลาได้ด้วยการเปรียบเทียบเชิงเส้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลด้วยอนุกรมออยเลอร์ในช่วงการเปลี่ยนแปลงสั้นๆ จะสามารถประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงดังสมการ $e^{-x} = 1 - x$ และ $e^x = 1 + x$ ทำให้สามารถใช้ในการคำนวณแบบเชิงเส้นเพื่อหาค่า 37% ของค่ายอดระหว่างจุดยอด 2 จุดได้

3.3 ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน

ในการเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ใช้โปรแกรม MPLAB X IDE V3.61 และใช้ภาษาซี (C language) ในการเขียนโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้กำหนดหน้าที่หลัก ๆ ไว้ 3 อย่าง คือ

1. การควบคุมการทำงานของวงจรรอสซิเลเตอร์ผ่านทาง tri-state buffer
2. การเก็บข้อมูลทั้งระหว่างที่วงจรรอสซิเลเตอร์ทำงานและหยุดทำงาน
3. การคำนวณค่าคงตัวเวลาจากข้อมูลดิบที่วัดได้

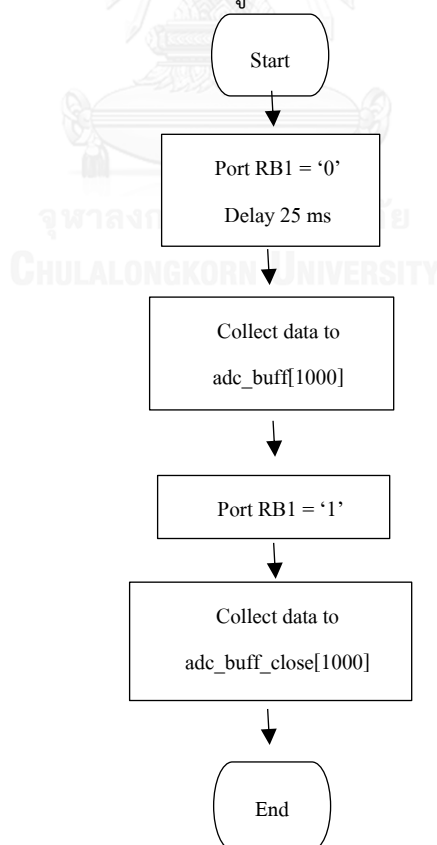
หลังจากนั้นจะนำผลจากการคำนวณค่าคงตัวเวลาส่งให้กับคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาคำนวณค่า D และวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ในการออกแบบขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะนำหลักการที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.2 มาปรับใช้ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ของโปรแกรมเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหาค่าคงตัวเวลาโดยรวม

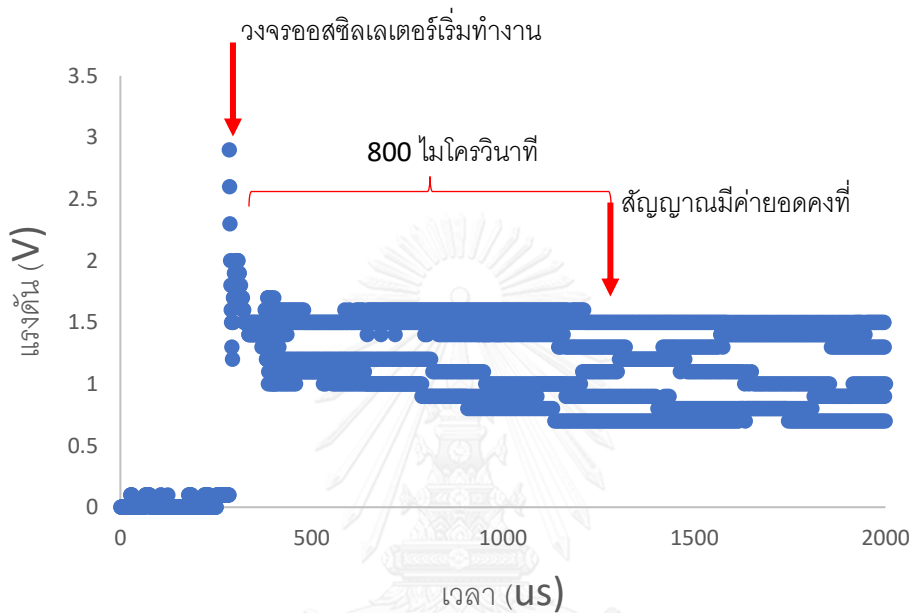
จากรูปที่ 3.8 ที่แสดงแผนภาพการทำงานของโปรแกรมโดยรวมจะมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการตั้งค่าระบบ จะเป็นขั้นตอนในการเรียกใช้โมดูลต่าง ๆ ในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะทำการเปิดการใช้งานโมดูลยูอาร์ที (UART) สำหรับส่งผลให้กับคอมพิวเตอร์ และโมดูลเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to digital convertor) ในส่วนของการตั้งค่าความถี่ซีกตัวอย่างได้ตั้งค่าให้มีความถี่ที่ 1 MHz และมีความละเอียดขนาด 10 บิต
2. ขั้นตอนการเก็บข้อมูลแอนะล็อก ได้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงในการเก็บข้อมูล ได้แก่ ช่วงวงจรออสซิลเลเตอร์ทำงาน และช่วงวงจรออสซิลเลเตอร์หยุดทำงาน โดยก่อนเก็บข้อมูลจะทำการสั่งให้ขาเอาต์พุต RB1 ส่งลอจิก '0' ไปที่ tri-state buffer เพื่อสั่งการให้วงจรออสซิลเลเตอร์ทำงาน จากนั้นจะรอไป 25 มิลลิวินาทีเพื่อเป็นการยืนยันว่า วงจรออสซิลเลเตอร์ได้ให้สัญญาณที่มีค่ายอดคงที่แล้วถึงจะทำการซีกตัวอย่างข้อมูลเก็บไว้จำนวน 1000 ข้อมูล หลังจากเก็บข้อมูลเสร็จสิ้นจะสั่งขาเอาต์พุต RB1 ให้ส่งลอจิก '1' ออกไปเพื่อหยุดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ จากนั้นจะทำการซีกตัวอย่างข้อมูลเก็บไว้อีก 1000 ค่า ดังรูปที่ 3.9



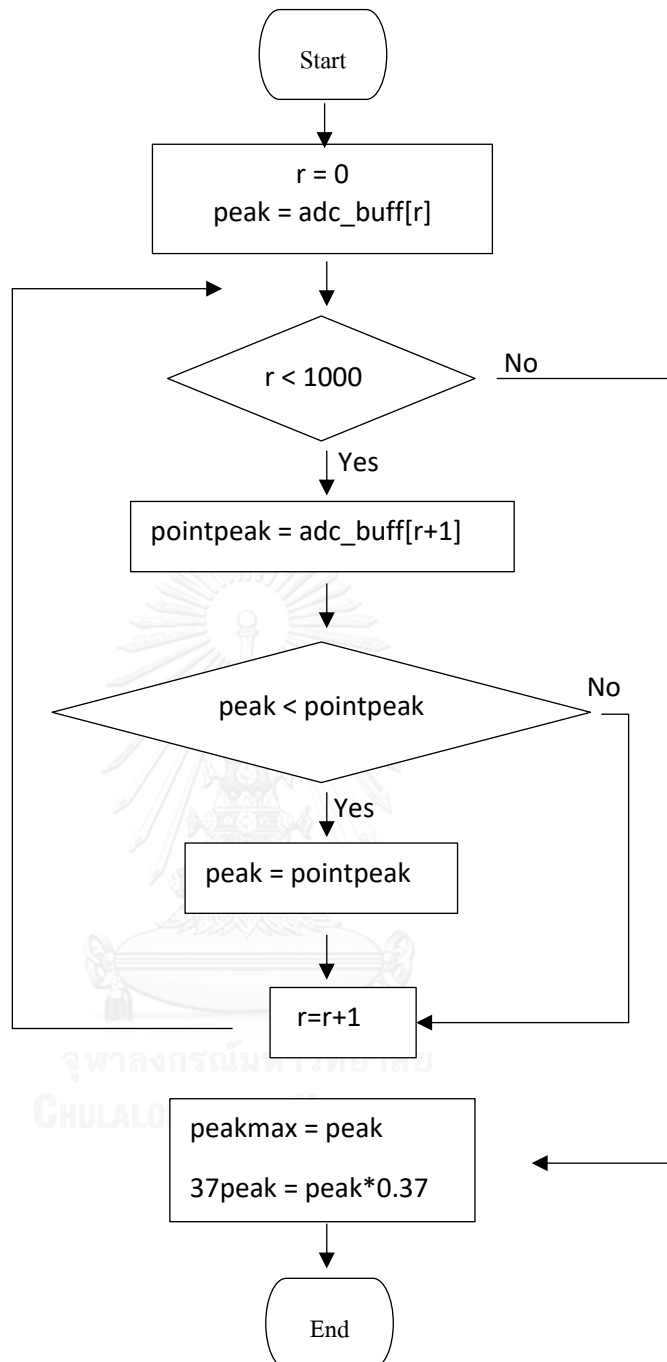
รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงตัวเวลา

เมื่อพิจารณาข้อมูลดิบในช่วงวงจรออสซิลเลเตอร์เริ่มทำงาน พบว่าเวลาที่ทำให้ค่ายอดของสัญญาณออสซิลเลตนั้นตั้งแต่เปิดการทำงานจนค่ายอดสัญญาณออสซิลเลตมีค่าคงที่ได้ใช้เวลาประมาณ 800 ไมโครวินาที ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าหลัง 25 มิลลิวินาที สัญญาณออสซิลเลตจะมีค่ายอดที่คงที่แล้ว



รูปที่ 3.10 ช่วงเวลาที่ทำให้สัญญาณออสซิลเลตมีค่ายอดคงที่

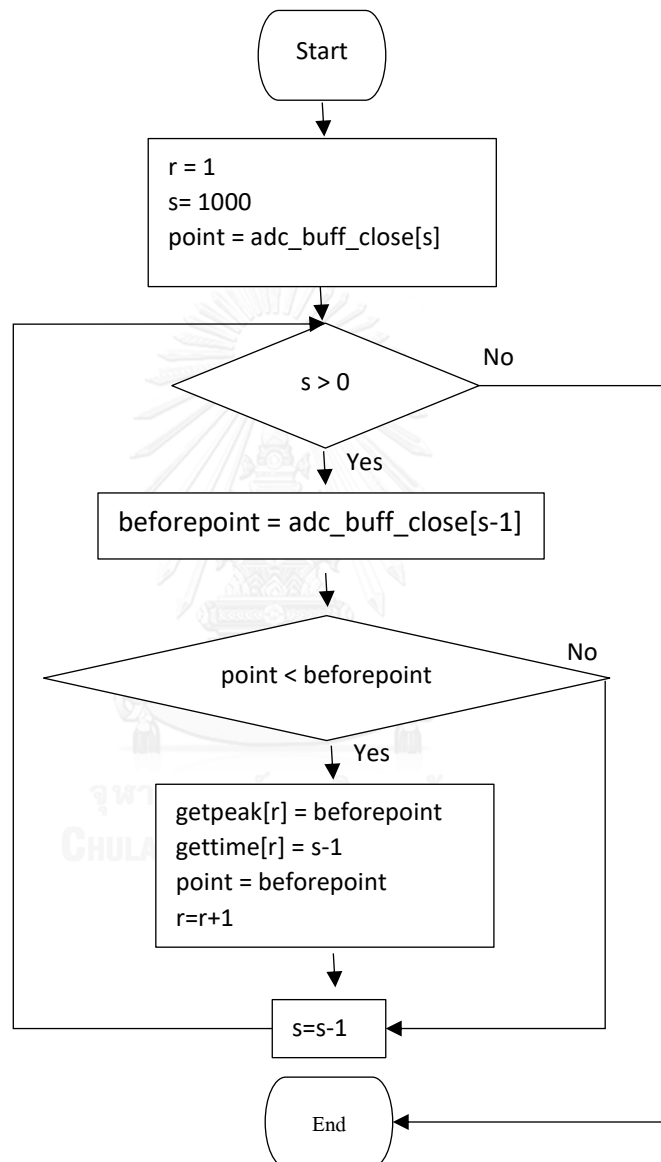
- ขั้นตอนการหาค่ายอดของสัญญาณในช่วงวงจรออสซิลเลเตอร์ทำงาน เป็นขั้นตอนหาค่าสูงสุดจากข้อมูลที่ซึ่กตัวอย่างมาในช่วงที่วงจรออสซิลเลเตอร์ทำงาน(ตัวแปร `adc_buff`) ทั้ง 1000 ข้อมูล เพื่อใช้เป็นค่ายอดสูงสุด จากนั้นคำนวณหาค่า 37%ของค่ายอด โดยมีขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่ายอดสูงสุดในช่วงก่อนปิดวงจรรอสซิลเลเตอร์

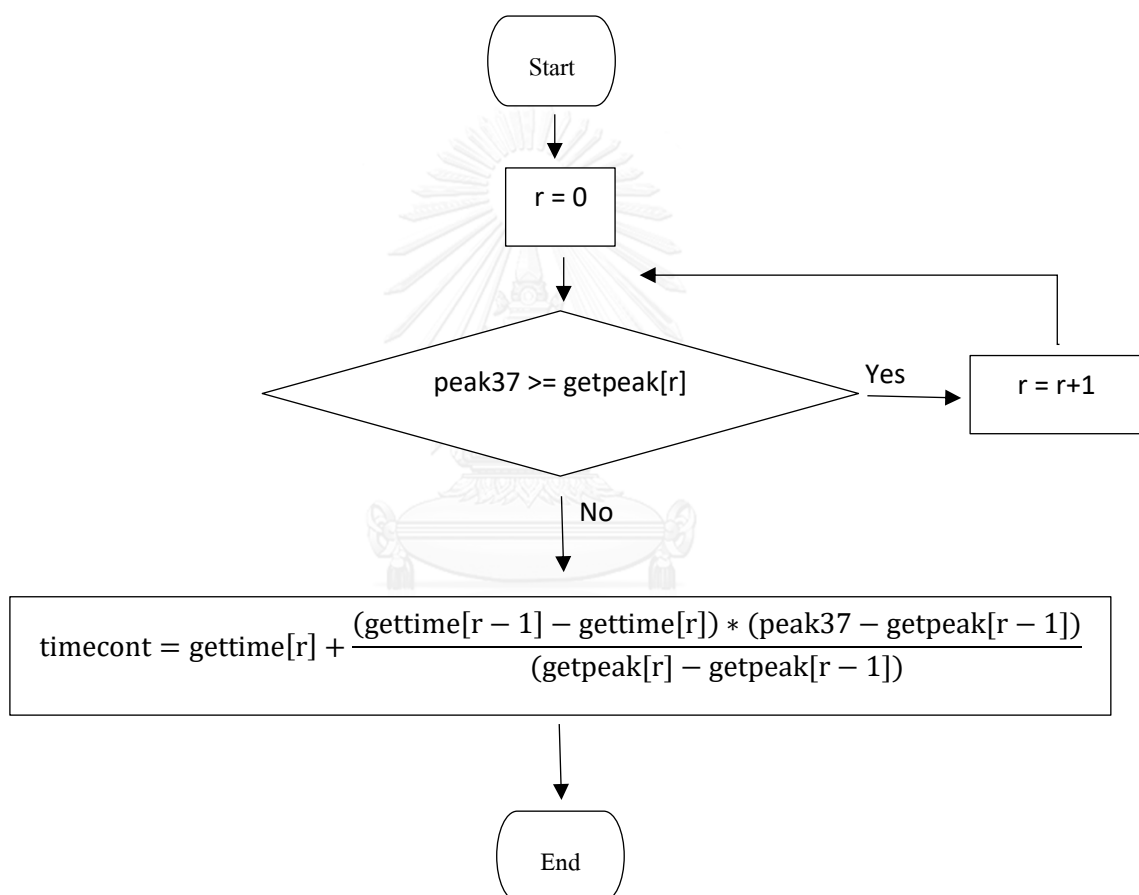
4. ขั้นตอนหาค่า envelope ของสัญญาณในช่วงวงจรรอสซิลเลเตอร์หยุดทำงาน โดยโปรแกรมในส่วนนี้จะหาจุดสูงสุดของสัญญาณซีกตัวอย่างและทำการเก็บข้อมูลที่เป็น envelope ของสัญญาณที่ลดลง ไว้ในตัวแปรอะเรย์ getpeak และลำดับของข้อมูลที่ใช้ถูกเก็บไว้ที่ตัวแปรอะเรย์ gettime โดยข้อมูลแรงดันที่เก็บในตัวแปร getpeak จะเรียงจากค่าแรงดันต่ำสุดไป

ถึงค่าสูงสุดโดยไม่มีค่าที่ซ้ำกัน และลำดับของข้อมูลจะเรียงจากลำดับมาไปลำดับที่น้อยลงตามลำดับของข้อมูลจริงในตัวแปรอะเรย์ `adc_buff_close` เพื่อทำการคำนวณหาคงตัวเวลาในส่วนถัดไป โดยแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาและเก็บข้อมูลที่เป็น *envelope* ของสัญญาณซีกตัวอย่างในช่วงสัญญาณลดลง

5. ขั้นตอนการคำนวณหาค่าคงตัวเวลา เป็นขั้นตอนที่ใช้ตัวแปร `getpeak` จากการหา `envelope` และตัวแปร `gettime` จากการเก็บลำดับของข้อมูลมาคำนวณหาค่าคงตัวเวลา โดยการใช้วิธีการเทียบแบบเชิงเส้น เพื่อให้ได้ค่าคงตัวเวลาที่ใกล้กับค่าจริงมากที่สุด โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีหน่วยเวลาเป็นไมโครวินาที เนื่องจากความถี่ในการซิกต์ตัวอย่างคือ 1 MHz ทำให้ประมาณค่าได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอ่านค่าแอนาลอกแต่ละค่าจะเวลาห่างกันประมาณ 1 ไมโครวินาที โดยขั้นตอนดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณค่าคงตัวเวลา

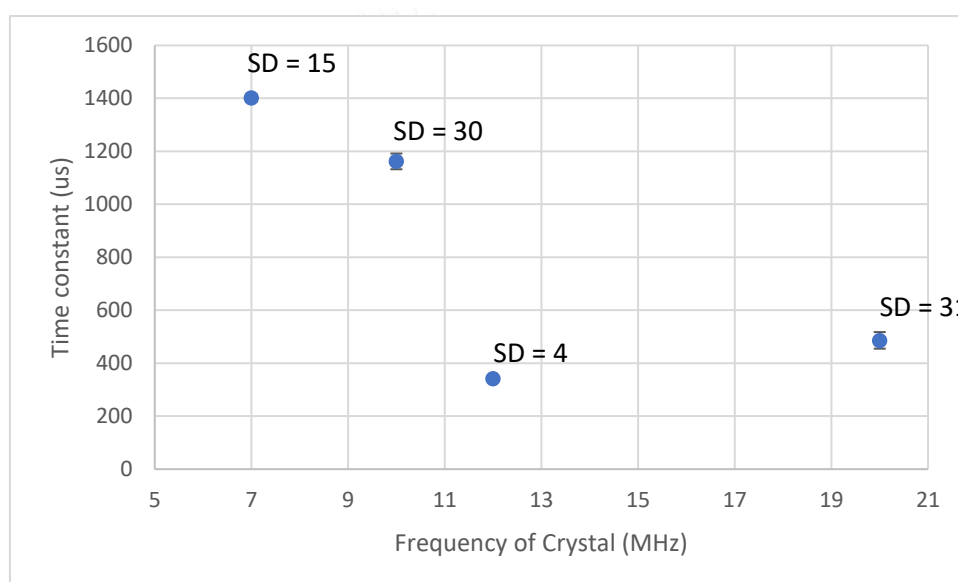
6. ขั้นตอนการแสดงผล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลค่าคงตัวเวลา ที่คำนวณได้ไปที่คอมพิวเตอร์ผ่านทางโมดูลยูอาร์ที (UART) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงตัวเวลาและค่า D ในคอมพิวเตอร์ต่อไป

บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะอธิบายผลการทดสอบวงจร และวิเคราะห์ผลในแต่ละการทดลอง

4.1 การทดสอบวงจรด้วยผลึกควอตซ์ที่มีความถี่แตกต่างกัน

ในการทดสอบการหาค่าคงตัวเวลาของผลึกควอตซ์ที่มีความถี่ 7, 10, 12, และ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อหาความแตกต่างของค่าคงตัวเวลาเมื่อผลึกควอตซ์มีความถี่เปลี่ยนไป โดยทำการเก็บค่าคงตัวเวลามาวิเคราะห์ด้วยการหาค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง ได้ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าคงตัวเวลาของผลึกควอตซ์ที่มีความถี่แตกต่างกัน ($n = 5$)

จากรูปที่ 4.1 ที่แสดงค่าคงตัวเวลาของผลึกควอตซ์ที่มีความถี่ต่างกัน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

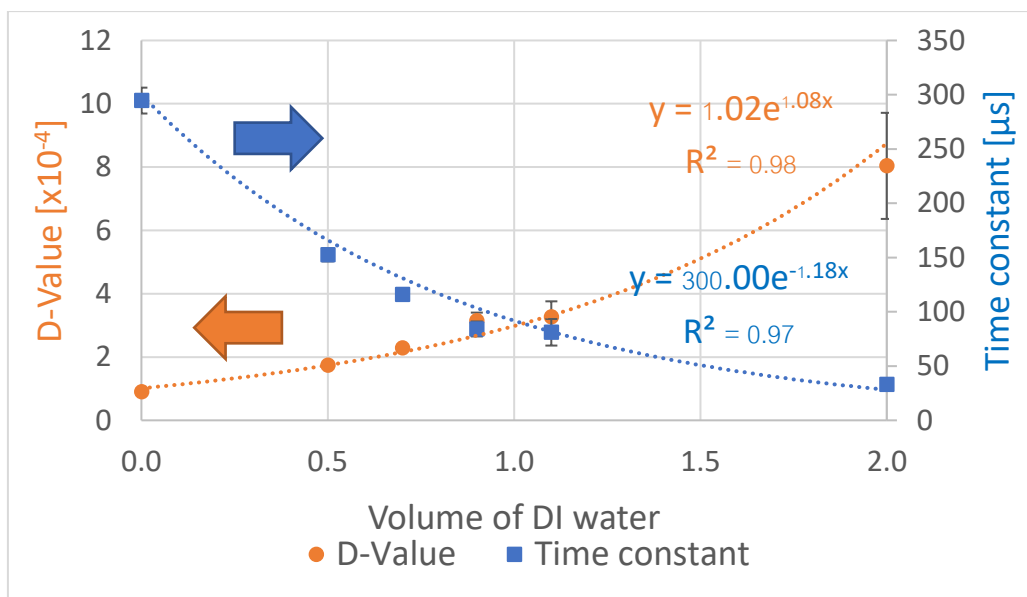
1. ค่าคงตัวเวลามีค่าลดลงเมื่อความถี่ของผลึกควอตซ์มากขึ้น เนื่องจากความหนาของผลึกควอตซ์โดยผลึกควอตซ์ที่มีความถี่สูงจะมีความหนาของผลึกมากกว่าผลึกควอตซ์ที่มีความถี่ต่ำ ซึ่งส่งผลให้การสั่นภายในผลึกหยุดสั่นได้เร็วกว่าผลึกที่มีความหนาน้อยกว่า
2. ผลึกควอตซ์ 12 เมกะเฮิร์ตซ์มีค่าคงตัวเวลาน้อยกว่าผลึกควอตซ์ความถี่อื่น เนื่องจากผลึกควอตซ์ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์เป็นผลึกที่สั่งทำเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทดลองซึ่งมีขั้วเป็นทอง

เมื่อเทียบกับผลึกที่ความถี่อื่นที่เป็นผลึกควอตซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ซึ่งใช้เงินในการทำซ้ำของผลึก พบว่าจากความหนาแน่นของทอง (19.3 g/cm^3) ที่มีค่ามากกว่าเงิน (10.49 g/cm^3) หรือจะกล่าวได้ว่า มวลของทองมีมากกว่าเงินในปริมาตรเดียวกัน และจากสมการหาค่าคงตัวเวลาเมื่อมีมวลอยู่บนผิวของผลึกควอตซ์ $\tau = \frac{R+\Delta R}{L_q+\Delta L}$ โดยที่ ΔL แทนค่ามวลที่อยู่บนผิวของผลึกควอตซ์ สามารถสรุปได้ว่าค่าคงตัวของผลึกควอตซ์ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์จะมีมวลบนผิวของผลึกมีค่ามากกว่าผลึกที่ความถี่อื่น ทำให้ค่าคงตัวเวลาที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าผลึกความถี่อื่นอย่างเห็นได้ชัด

- เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคงตัวเวลาจากผลึกควอตซ์ที่ความถี่ 7 10 และ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีค่ามากกว่าผลึกควอตซ์ที่ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำให้เลือกใช้ผลึกควอตซ์ที่ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์ในการทดสอบ

4.2 การทดสอบวงจรด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water, Deionized water)

หัวข้อนี้เป็นการทดสอบการวัดปริมาณน้ำเพื่อหาขอบเขตการวัดของระบบที่ออกแบบไว้ โดยหยดน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, และ 2 ไมโครลิตรลงบนผลึกของ QCM ด้านหนึ่ง โดยใช้ปิเปตที่มีช่วงการใช้งาน 0.5 ถึง 10 ไมโครลิตร เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหยดน้ำ จากนั้นทำการเก็บค่าคงตัวเวลามาวิเคราะห์ด้วยการหาค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง พร้อมทั้งนำค่าคงตัวเวลาที่ได้อมาคำนวณหาค่า D ในการวัดมีทำที่อุณหภูมิ 25.5 - 25.6 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 50 - 54 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลดังรูปที่ 4.2



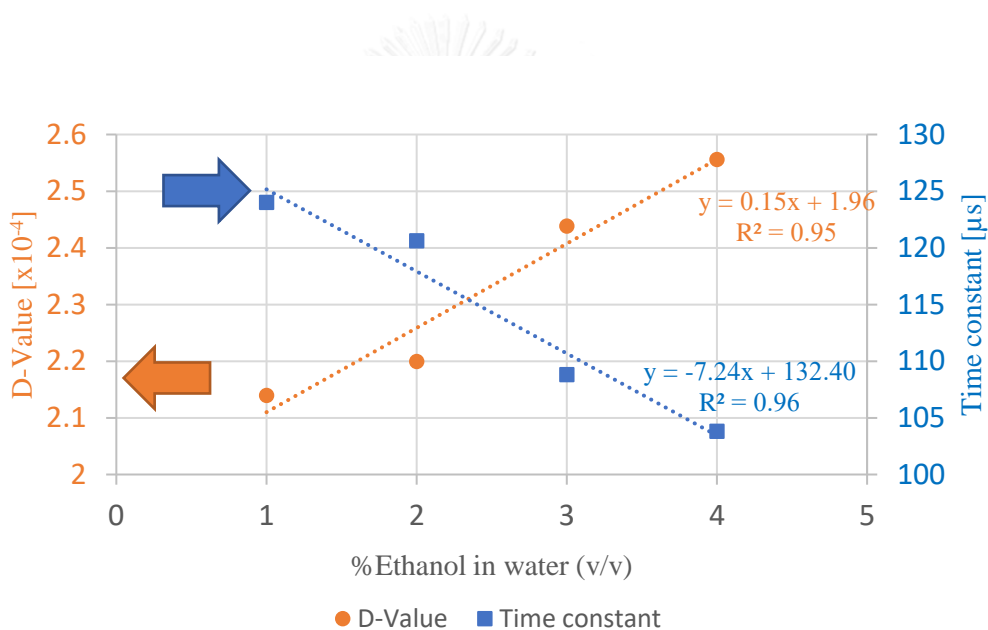
รูปที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าคงตัวเวลากับค่า D เทียบกับปริมาณน้ำปราศจากอไอออน ($n = 3$)

จากรูปที่ 4.2 ที่แสดงถึงค่าคงตัวเวลาและค่า D เมื่อหยดน้ำปริมาตรต่าง ๆ บน QCM สามารถวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ค่า D มีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อมีปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้น มวลบนผิวของ QCM จะมีมากขึ้นตามไปด้วย จากสมการในบทที่ 2 เรื่องการหาค่า D พบว่าค่า D เป็นค่าที่แปรผกผันกับค่าคงตัวเวลา เมื่อพิจารณาว่าเมื่อมีมวลอยู่บนผิวของ QCM จะส่งผลให้ Lq ในระบบเปลี่ยนแปลงไปในค่าที่มากขึ้น ทำให้ค่าคงตัวเวลามีค่าน้อยลงและค่า D ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี
2. เมื่อพิจารณาการตกลงมากของกราฟเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่ 0 ถึง 0.5 ไมโครลิตรสามารถบ่งบอกได้ว่าการวัดค่า D มีความไวในการวัดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของ QCM มาก
3. เมื่อพิจารณาการตกลงของค่าคงตัวเวลา ณ ปริมาตร 2 ไมโครลิตร พบว่ามีการลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าคงตัวเวลาที่เกิดจากการวัด QCM ที่ไม่มีหยดน้ำ โดยลดลงไปจาก 286 ไมโครวินาที เหลือ 33 ไมโครวินาที ทำให้ทราบถึงขอบเขตการวัดของ QCM นี้ว่าสามารถวัดน้ำได้ถึง 2 ไมโครลิตร

4.3 การทดสอบบวจรด้วยการตรวจความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งพบว่าช่วงการทำงานของ QCM ที่ใช้อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 2 ไมโครลิตร ในการทดลองต่อไปจึงกำหนดให้ใช้ปริมาตรของสารตัวอย่างเป็น 0.9 ไมโครลิตร เนื่องจากเป็นช่วงที่เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวเวลาได้อย่างชัดเจน จึงทำการทดสอบความสามารถในการตรวจจับการปนเปื้อนของแอลกอฮอล์ในน้ำ โดยการทดสอบจะใช้แอลกอฮอล์ความเข้มข้น 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ในน้ำปราศจากไอออน โดยกำหนดปริมาตรสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 0.9 ไมโครลิตร ในการทดลองได้ทำการวัด 5 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าคงตัวเวลา รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองที่ได้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวเวลาและค่า D กับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล ($n=5$)

จากรูปที่ 4.3 ที่แสดงค่า D และค่าคงตัวเวลาเมื่อหยดสารละลายตัวอย่างของน้ำที่มีเอทานอลผสมลงบนผิวของ QCM โดยสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- เมื่อพิจารณาจากสมการ $\tau = \frac{R + \Delta R}{L_q + \Delta L}$ และเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นของน้ำ (1 g/cm^3) กับเอทานอล (0.789 g/cm^3) พบว่าในปริมาตรเดียวกัน มวลของน้ำจะมากกว่ามวลของเอทานอล ซึ่งส่งผลให้ผลรวมของค่าเหนี่ยวนำ ($L_q + \Delta L$) จากสมการค่าคงตัวเวลาของน้ำมีค่ามากกว่าเอทานอลและส่งผลให้ค่าคงตัวเวลาของน้ำจะน้อยกว่าเอทานอล ในทำนองเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลมากขึ้นจะส่งผลให้มวลของสารละลายมีค่าน้อยลง

และค่าคงตัวเวลามีค่ามากขึ้น แต่จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นมากขึ้นค่าคงตัวเวลากลับมีค่าลดลง ซึ่งไม่เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาที่เปลี่ยนไปตามมวลของสาร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากสมการของคานาซาวพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนผิวของ QCM จะสามารถเปลี่ยนไปตามความหนืดของสารได้ด้วย ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลของความหนืดของสารละลาย

2. การเพิ่มขึ้นของค่า D และการลดลงของค่าคงตัวเวลาเมื่อมีความเข้มข้นของแอกอฮอลล์เพิ่มมากขึ้น เกิดเนื่องจากค่าความหนืดของน้ำมีค่าน้อยกว่าเอทานอล กล่าวคือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความหนืดของน้ำและเอทานอลมีค่า 0.797 และ 0.983 mPa*s ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความหนืดได้ว่า การเพิ่มขึ้นของเอทานอล 1% จะทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไป 0.002 mPa*s
3. ในการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า D และความเข้มข้นของเอทานอลสามารถหาได้ในช่วง 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าระบบวัดที่พัฒนาขึ้นนี้มีความไวในการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ในระดับ 0.002 mPa*s หรือ 2 μ Pa*s ได้

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัยและผลการทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบวัดค่าคงตัวเวลาของ QCM โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น dsPIC33FJ128GP708 ในการควบคุมการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบคอลพิตต์ ที่มี QCM ความถี่ 12 MHz เป็นรีโซเนเตอร์ เพื่อหาค่าคงตัวเวลาและคำนวณหาค่า D โดยใช้การชั่งตัวอย่างที่มีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ของ QCM โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดลองการวัดค่าคงตัวเวลาจากผลึกควอตซ์ที่มีความถี่แตกต่างกัน พบว่า ระบบสามารถคำนวณหาค่าคงตัวเวลาจากผลึกควอตซ์ที่มีความถี่ต่างกันมาได้
2. จากการทดลองวัดค่าคงตัวเวลาด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน เมื่อใช้ QCM ที่มีความถี่ก่าจร 12 MHz พบว่าระบบวัดที่ได้ออกแบบขึ้นมีการตอบสนองในการวัดที่ดีในช่วงปริมาตร 0 ถึง 2 ไมโครลิตร
3. จากการทดลองวัดค่าคงตัวเวลาด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำปราศจากอ็อกซิเจน พบว่า สามารถหาความแตกต่างของความเข้มข้นของเอทานอลได้ในช่วง 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หรือวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดได้ในระดับ $2 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$

จากการทดสอบระบบวัดค่าคงตัวเวลาสามารถสรุปข้อดีได้ดังนี้

1. การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประดิษฐ์ ทำให้สามารถลดการใช้อุปกรณ์ได้ เช่น ลดการใช้ไอซีแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลได้ ส่งผลให้วงจรมีความซับซ้อนน้อยลง
2. ระบบที่ออกแบบขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดของเหลวปริมาตรน้อยได้ดี เนื่องจากมีความไวในการตอบการวัดที่ดีในช่วงปริมาตร 0 ถึง 2 ไมโครลิตร
3. สามารถนำค่าคงตัวเวลาจากระบบมาใช้ในการวัดเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสารตัวอย่างได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบการหาค่าคงตัวเวลาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น dsPIC 33FJ ซึ่งมีการประมวลผลที่เร็ว แต่ยังมีข้อควรระวังในการใช้อยู่หลายประการ จึงนำข้อควรระวังที่พบในการออกแบบและการทดลองมาสรุปเป็นข้อเพื่อให้สามารถพัฒนาการพัฒนาระบบต่อ ได้หัวข้อดังนี้

1. เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการวัดมีความถี่ที่สูง เมื่อทำการเชื่อมต่อกับขาแอนาล็อก มีสิ่งที่ต้องระวัง คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของขาไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าต่ำกว่าวงจรรอสัญญาณที่นำมาต่อ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลดทอนแรงดันของสัญญาณแอนาล็อกเกิดขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ควรใช้วงจร buffer มาต่อก่อนที่จะป้อนสัญญาณให้กับขาของไมโครคอนโทรลเลอร์
2. เพิ่มช่องสัญญาณในการวัด QCM ให้ได้หลายตัวพร้อมกัน
3. แม้ว่าจะระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีประสิทธิภาพที่ดีและเพียงพอต่อการใช้งานทั่วไป อย่างไรก็ตามระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับปรุงและพัฒนาให้ดีขึ้นได้อีก เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ทำการซักรั่วอย่างที่มีความถี่ 1 MHz ทำให้ความละเอียดของค่าคงตัวเวลาที่วัดได้เป็น $1 \mu\text{s}$ ดังนั้นหากใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความถี่ในการซักรั่วอย่างที่สูงกว่านี้ ก็จะสามารถได้ระบบที่มีความละเอียดในการวัดที่มากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. Kananizadeh, N., et al., *Combined quartz crystal microbalance with dissipation (QCM-D) and generalized ellipsometry (GE) to characterize the deposition of titanium dioxide nanoparticles on model rough surfaces.* Journal of Hazardous Materials, 2017. 322, **Part A**: p. 118-128.
2. Aung, K.M.M., X. Ho, and X. Su, *DNA assembly on streptavidin modified surface: A study using quartz crystal microbalance with dissipation or resistance measurements.* Sensors and Actuators B: Chemical, 2008. 131(2): p. 371-378.
3. Sauerbrey, G., *Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung.* Zeitschrift für Physik, 1959. 155(2): p. 206-222.
4. Janshoff, A., H.-J. Galla, and C. Steinem, *Piezoelectric Mass-Sensing Devices as Biosensors—An Alternative to Optical Biosensors?* Angewandte Chemie International Edition, 2000. 39(22): p. 4004-4032.
5. Kanazawa, K.K. and J.G. Gordon, *The Oscillation Frequency of a Quartz Resonator in Contact with a Liquid.* 1984: IBM Corporation.
6. D. Johannsmann, I.R., E. Rojas, M. Gallego, *Effect of Sample Heterogeneity on the Interpretation of QCM(-D) Data: Comparison of Combined Quartz Crystal Microbalance/Atomic Force Microscopy Measurements with Finite Element Method Modeling.* Analytical Chemistry, 2008. **vol** 80(no.23): p. pp.8891-8899.
7. Nakamoto, T. and T. Kobayashi, *Development of circuit for measuring both Q variation and resonant frequency shift of quartz crystal microbalance.* Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on, 1994. 41(6): p. 806-811.
8. Hook, F., et al. *The dissipative QCM-D technique: interfacial phenomena and sensor applications for proteins, biomembranes, living cells and polymers.* in *Frequency and Time Forum*, 1999 and the *IEEE International Frequency*

Control Symposium, 1999., Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European. 1999.

9. สงขลา, ศ.ณ., การพัฒนาระบบวัดค่าความถี่กัมมาและค่าคงตัวของตัวตรวจวัดชนิด QCM. 2555.
10. Stengel, G., *Real-time monitoring of DNA hybridization and replication using optical and acoustic biosensors*. Max-Planck Institute for Polymer Research, 2004.
11. Kanazawa, K.K.a.G., Joseph G., *Frequency of a quartz microbalance in contact with liquid*. *Analytical Chemistry*, 1985. 57: p. 1770-1771.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษณ์ สันติวิภารัตน์ เกิดวันที่ 5 ธันวาคม 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

