

การพัฒนาระบบวัดค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวของตัวตรวจวัดชนิด QCM

นายศวิษฐ์ ฦ สงขลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR DETERMINING OF RESONANT FREQUENCY  
AND TIME CONSTANT OF QCM SENSOR

Mister Sawit Na Songkhla

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบวัดค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวของตัว

ตรวจวัดชนิด QCM

โดย

นายศวิษฐ์ ฒ สงขลา

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ทิลาวัณย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ สมบูรณ์)

ศวิษฐ์ ฌ สงขลา : การพัฒนาระบบวัดค่าความถี่กำจรและค่าคงตัวของตัวตรวจวัดชนิด QCM. (Development of System for Determining of Resonant Frequency and Time Constant of QCM Sensor) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์, 55 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการพัฒนาระบบวัดค่าความถี่กำจรและค่าคงตัวของตัวตรวจวัดชนิด QCM โดยที่ค่าความถี่กำจรวัดโดยวิธีการนับความถี่โดยตรง จากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิตท์ ส่วนค่าคงตัวของตัวตรวจวัดจากสัญญาณที่ลดทอนเมื่อหยุดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยระบบที่พัฒนาใช้อุปกรณ์ Tri-state buffer ในการปลดวงจรออสซิลเลเตอร์ และใช้อุปกรณ์แปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอล จากการทดสอบความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยการหาค่าความถี่กำจรและหาค่าคงตัวของตัวตรวจวัดด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคสปริมาตร 0.3 ไมโครลิตรที่มีค่าความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยมวล พบว่าค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงและค่าคงตัวของตัวตรวจวัดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่กำจรที่ดีที่สุดจากวงจรแบบที่ 4 โดยมีค่าความไวที่ -12.2 Hz โดยมวล มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.93 และได้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของตัวตรวจวัดที่ดีที่สุดจากวงจรแบบที่ 3 โดยมีค่าความไวที่ - 8.4  $\mu$ s ต่อร้อยละความเข้มข้นโดยมวล และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.98

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา 2555.....

# # 527 08409 21 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : QCM / FREQUENCY SHIFT / TIME CONSTANTS / FPGA

SAWIT NA SONGKHLA : A DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR

DETERMINING OF RESONANT FREQUENCY AND TIME CONSTANT OF

QCM SENSOR. ADVISOR: ASSOC.PROF.MANA SRIYUDTHSAK, Ph.D., 55 pp.

This thesis presents a development of QCM measuring system. To determine resonant frequency and time constant of QCM sensor, resonant frequency was obtained from direct frequency counting from the colpitts oscillator. The time constants of the decline signal were measured after stopping an oscillator circuit. The systems were developed by using Tri-state buffer to cut off the oscillator circuit, and using analog to digital converter to collect declined signals for determining the time constant. To evaluate the system performance. 0.3 ul glucose solution at concentration of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% weight by weight were drop on QCM surface. It was found that frequency change and time constant have a linear relation with glucose concentration. The best result in frequency measurement was obtain from circuit model 4 with sensitivity and coefficient of determination of -12.2 Hz per %wt/wt of glucose and 0.93, respectively. The best result in time constant measurement was obtain from circuit model 3 with sensitivity and coefficient of determination of -8.4  $\mu$ s per %wt/wt of glucose and 0.98, respectively.

Department: Electrical Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับการดูแลเอาใจใส่ เมตตาให้คำปรึกษาที่มีคุณค่า และกรุณาชี้แนะสิ่งต่างๆ ที่ส่งผลให้งานวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี ทั้งเป็นต้นแบบที่ดียิ่งในด้านการเรียนรู้งานวิชาการ

ขอขอบคุณกรรมการสอบ รศ.ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัมย์ และ ผศ.ดร.ภาควิชา ภูมิ สมบูรณ์ที่ได้ ให้ความรู้และข้อเสนอแนะในงานวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณทุนจากบริษัท โตชิบ้าประเทศไทย จำกัด เพื่อ ไปฝึกงานที่ Toshiba Fuchu complex เมืองโตเกียว ประเทศไทย ในปี 2554

ขอขอบคุณอาจารย์และนิสิตจากห้องปฏิบัติการไบโออิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้งานวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ และเป็นส่วนหนึ่งของประสบการณ์การใช้ชีวิตในการเรียนและทำงานอย่างมีความสุข

สุดท้ายนี้ งานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าจะสำเร็จมิได้หากขาดบิดามารดาที่ให้การสนับสนุน ทั้งทุนทรัพย์ ความเข้าใจ กำลังใจ และเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อเป็นแรงผลักดันตลอดการทำงานของข้าพเจ้า

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน.....	6
2.1 หลักการทำงานของ QCM.....	6
2.2 ความถี่ก้ำจร (Resonant frequency) ค่า Q และ ค่าคงตัวเวลา.....	8
2.3 FPGA (Field Programmable Gate Arrays).....	11
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในวงจรวัดค่าความถี่ก้ำจรและค่าคงตัวเวลา.....	12
3.2 ส่วนประกอบในวงจรวัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการอ่านค่าความถี่ก้ำจรและ ค่าคงตัวเวลา.....	26
3.3 ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในการอ่านค่าความถี่ก้ำจรและค่าคงตัวเวลา.....	28
3.4 วงจรวัดแบบต่างๆที่ประดิษฐ์ขึ้น.....	34
3.5 การทดสอบและวิเคราะห์ความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น.....	38
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล.....	41

บทที่	หน้า
4.1 การทดสอบวงจรวัดความถี่ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator).....	41
4.2 การทดสอบวงจรวัดความถี่ด้วย QCM เปล่า .....	42
4.3 การทดสอบวงจรวัด เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ความต้านทาน อนุกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์.....	43
4.4 การทดสอบค่าความถี่การรบกวน QCM ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อ ทดสอบด้วยน้ำ ปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ปริมาตรต่างๆ.....	46
4.5 การทดสอบค่าความถี่การรบกวนและค่าคงตัวของ QCM ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีปริมาตรและความเข้มข้นค่า ต่างๆ.....	47
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผล.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
รายการอ้างอิง.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	55



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สัญญาณขาออกของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1.....	19
3.2 สัญญาณขาออกของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 2.....	22
3.3 คุณสมบัติไอซีแอนาล็อกเป็นดิจิทัล เบอร์ MCP3208 ของบริษัท Microchip.....	24
3.4 ตารางสรุปส่วนประกอบของวงจรที่ใช้ในแบบต่างๆ.....	38

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของ QCM .....	7
2.2 วงจรสมมูลของ QCM .....	7
2.3 วงจรสมมูลของ QCM เมื่อมีมวลและของเหลวมายึดเกาะที่ผิวอิเล็กโทรด.....	8
3.1 แผนภาพรวมของวงจรที่พัฒนา.....	12
3.2 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิทท์ที่ใช้เป็นพื้นฐาน.....	13
3.3 การต่อ Tri-state buffer ร่วมกับวงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิทท์.....	14
3.4 ขนาดของสัญญาณเมื่อขา ENB ของ Tri-state buffer มีค่าลอจิกเป็น ‘1’.....	15
3.5 ขนาดของสัญญาณเมื่อขา ENB ของ Tri-state buffer มีค่าลอจิกเป็น ‘0’.....	15
3.6 โมดูลวงจรนับความถี่.....	16
3.7 Finite state machine ของโมดูลวงจรนับความถี่.....	17
3.8 โมดูลวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1.....	19
3.9 Finite state machine ของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1.....	19
3.10 โมดูลวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 2.....	21
3.11 Finite state machine ของวงจรควบคุมการทำงานแบบที่ 2.....	22
3.12 ไอซี MCP3208 ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล.....	23
3.13 โมดูลวงจรควบคุมการทำงานของ ADC.....	25
3.14 โมดูลวงจรหารความถี่.....	27
3.15 โมดูลวงจรฐานเวลา.....	27
3.16 โมดูลนับเวลาของระบบ.....	28
3.17 ฟังก์ชันของโปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 1.....	30
3.18 ฟังก์ชันของโปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 2.....	31
3.19 ฟังก์ชันของโปรแกรมอ่านค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล.....	33
3.20 วงจรวัดแบบที่ 1.....	34
3.21 วงจรวัดแบบที่ 2.....	35
3.22 วงจรวัดแบบที่ 3.....	36
3.23 วงจรวัดแบบที่ 4.....	37
4.1 ค่าผลต่างของความถี่ที่วัดได้ในวงจรแต่ละแบบ.....	41

ภาพที่	หน้า
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเมื่อเทียบกับความถี่ของ QCM ..... 43
4.3	ค่าความถี่ของ QCM ที่ค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างๆ..... 44
4.4	ค่าความแปรปรวนของความถี่ที่ค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างๆ..... 44
4.5	ค่าคงตัวของ QCM ที่ค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างๆ..... 45
4.6	ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วงจรแต่ละแบบด้วยน้ำที่มีปริมาตรต่างกัน..... 46
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของของวงจรแต่ละแบบด้วยน้ำที่มีปริมาตรต่างกัน 47
4.8	ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วงจรแบบที่ 4 ด้วยน้ำที่มีปริมาตรต่างกัน..... 48
4.9	ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของวงจรแบบที่ 4 ด้วยน้ำที่มีปริมาตรต่างกัน..... 48
4.10	ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วงจรแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 ด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคส ที่มีค่าความเข้มข้นค่าต่างกัน..... 49
4.11	ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วงจรแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 ด้วยสารละลาย น้ำตาลกลูโคสที่มีค่าความเข้มข้นค่าต่างกัน..... 50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิจัยทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีที่มีมาจากอดีตได้เป็นส่วนสำคัญในพัฒนาสังคมมนุษย์มามาก ทั้งในด้านการค้นหาค้นหาองค์ความรู้หรือการประดิษฐ์สิ่งต่างๆ ขึ้นมา ส่วนสำคัญที่นำในการวิจัยคือตัวตรวจวัด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แตกต่างกันไปของผู้ทำการวิจัย ตัวตรวจวัดเหล่านี้มีหน้าที่ในการวัดข้อมูลจากธรรมชาติที่มีอยู่ ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อให้ได้เป็นความรู้ที่นำไปใช้งานได้ และใช้ในการค้นคว้าเพื่อมาพิสูจน์สมมติฐานที่ตั้งไว้ จึงปฏิเสธไม่ได้ว่าตัวตรวจวัดหรือระบบวัดที่ให้ข้อมูลที่มาก มีความถูกต้อง แม่นยำสูง จึงจะเป็นตัวตรวจวัดที่ดี

ตัวตรวจวัด QCM (Quartz Crystal Microbalance) [1] เป็นตัวตรวจวัดชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจสูง มีสมบัติที่ดีหลายข้อ เช่น มีความไวในการวัดสูงสามารถวัดสารได้ทั้งในรูปของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ วัดได้ในระดับไมโครกรัมหรือต่ำกว่า มีราคาไม่สูง ใช้งานง่าย เป็นตัวตรวจวัดที่ผลิตจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวอิเล็กโทรด โดยประเมินจากการความถี่ในการสั่นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับสารที่ต้องการวัด ในงานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่ค่าของสสาร[2]เนื่องจากใช้วงจรวัดที่ไม่ซับซ้อน และสามารถนำค่าความถี่ที่วัดได้มาประเมินหามวลของของแข็ง[2]หรือความหนืดความเข้มข้นของของเหลว[3] จากสมการที่เคยมีผู้เผยแพร่ไว้ก่อนหน้านี้ได้ตรงไปตรงมา อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดคือสามารถใช้ได้เฉพาะกับของแข็งหรือของเหลวเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับสาร กิ่งแข็งกึ่งเหลวบางชนิด เช่น เซลล์ เลือดที่แข็งตัว เกล็ด[4] กล่าวคือ ข้อมูลที่ได้จาก QCM คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่เป็นหลัก จึงมีความต้องการข้อมูลอื่นนอกจากค่าความถี่ค่ามาใช้ในการวิเคราะห์หรือตรวจวัด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้น

มีรายงานวิจัยหลายฉบับได้กล่าวถึงการนำค่า Q (Quality Factor) [5] มาเป็นข้อมูลหนึ่ง สำหรับช่วยประเมิน โดยค่า Q คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สะสมไว้ในระบบต่อพลังงานที่ระบบสูญเสียออกไป ซึ่งระบบที่มีค่า Q สูงจึงเป็นระบบที่มีการสูญเสียพลังงานน้อย สารที่มาสัมผัสผิวอิเล็กโทรดเปรียบเสมือนโหลดที่เพิ่มขึ้นของ QCM อันมีผลกับการสูญเสียพลังงานของ QCM ไม่มากนักน้อย ดังนั้นความแตกต่างของค่า Q จึงสัมพันธ์กับสารที่มาสัมผัสผิวอิเล็กโทรด หากข้อมูลค่า Q ที่ได้จากสารกิ่งแข็งกึ่งเหลวบางชนิดนั้นแตกต่างกันในขณะที่ค่าความถี่ค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ค่า Q จะเป็นอีกหนึ่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์มาก

ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ข้อมูลอื่นจาก QCM นอกเหนือจากค่าความถี่ก้ำจร แสดงในงานวิจัยของ Fohlerova, Z และคณะ [6] ที่ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการวัดค่าความถี่ก้ำจรและความต้านทานสมมูล พบว่าในเซลล์ต่างชนิดกันค่าความถี่ก้ำจรที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน แต่ค่าความต้านทานสมมูลที่วัดได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งค่า Q นั้นมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับค่าความต้านทานสมมูล ปัจจุบันเซลล์เพาะเลี้ยงมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายและมีความสำคัญมากขึ้นในฐานะที่เป็นตัวแทนของร่างกายมนุษย์ในการวิจัยทางการแพทย์ เช่น การศึกษาผลของสารเคมีต่อเซลล์ การศึกษาการแสดงออกของยีน

สำหรับค่า Q ของ QCM ที่สัมพันธ์กับความถี่ก้ำจรค่าหนึ่งนั้น สามารถคำนวณหาได้หากทราบค่าความถี่ก้ำจร ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล และค่าความต้านทานของวงจรสมมูลนั้น[7] ในขณะที่ค่า Q แสดงค่าเป็นอัตราส่วนของพลังงานสะสมต่อพลังงานสูญเสีย (Loss) ในระบบ ค่าความต้านทานสมมูลแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงาน (Loss) ในระบบโดยตรงและมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาของระบบ ซึ่งสามารถหาค่าได้ง่ายกว่า ในวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งหวังในการพัฒนาระบบเพื่อใช้วัดค่าคงตัวเวลาของ QCM พร้อมกับการวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ QCM ในการวัดสารตัวอย่างที่เป็นสารละลาย

ในปี 1991 T.Nakamoto และ T.Kobayashi [8] ได้เสนอวงจรที่สามารถวัดได้ทั้งค่าความถี่และค่า Q ของ QCM โดยมีหลักการทำงานคือ ใช้ VCO (Voltage-Controlled Oscillator) ทำการกวาดความถี่ตั้งแต่ 9962 ถึง 9993 kHz ที่ป้อนแก่ QCM จากนั้นทำการแปลงค่ากระแสที่ผ่าน QCM เป็นค่าแรงดันด้วยวงจร I-V converter ทำการคูณค่าแรงดันจาก VCO และค่าแรงดันที่แปลงมาจากค่ากระแส สัญญาณที่ได้จะประกอบด้วยพจน์สัญญาณความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ( $2\omega$ ) และ สัญญาณไฟตรง(DC) เมื่อผ่านสัญญาณนี้ไปยังวงจรวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter) เพื่อขจัดพจน์  $2\omega$  ออกไป ค่าแรงดันที่ได้จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าสมมูล (Conductance) ของ QCM ซึ่งหมายความว่าเมื่อความถี่จาก VCO ตรงกับค่าความถี่ก้ำจร ค่าแรงดัน DC ที่วัดได้นี้จะมีค่ามากที่สุดสามารถแปลงกลับเป็นค่า Q ได้ โดยจำเป็นต้องอาศัยวงจร Sample & Hold เพื่อทำการบันทึกค่าเมื่อแรงดัน DC ถึงค่ายอด และทำการบันทึกค่าความถี่ที่ทำให้เกิดค่ายอดของแรงดัน DC นั้น

ปี 1995 M.rodahl และคณะ[7] ได้เสนอวิธีการหาค่า Q ด้วยการวัดค่าคงตัวของเวลาเมื่อทำการปิดแหล่งจ่ายพลังงานแก่วงจร โดยใช้ QCM เป็นเรโซเนเตอร์สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยใช้รีเลย์ทำหน้าที่เปิดปิดแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้แก่วงจรออสซิลเลเตอร์ โดยเมื่อรีเลย์เปิดวงจรเพื่อหยุดจ่ายพลังงานที่ส่งไปยัง QCM สัญญาณการสั่นที่เป็นรูปสัญญาณไซน์จะลดขนาดลง นักวิจัยได้ใช้เครื่องวัดสัญญาณความถี่วัดการสั่นของวงจรออสซิลเลเตอร์และใช้ออสซิลโลสโคปเพื่อทำการ

วัดรูปสัญญาณ และส่งข้อมูลต่อไปยังคอมพิวเตอร์จากนั้นทำการวิเคราะห์ envelope ของสัญญาณ ไซน์เพื่อหาค่าคงตัวเวลา ซึ่งค่าคงตัวเวลานี้แปรตามค่า Q ของ QCM

ปี 2003 Vittorio Ferrari และคณะ [9] ได้เสนอ วงจร ACC (Automatic Capacitance Compensation) เพื่อใช้งานกับ QCM โดยวงจรมีจะทำารชดเชยค่าความจุขนาน (Parallel capacitance) เพื่อให้ QCM สั้นที่ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม (Series resonant frequency) โดยในการชดเชยค่าความจุนี้จะอาศัยการป้อนความถี่เสริม (Auxiliary frequency) ซึ่งจะมีวงจรส่วนป้อนกลับเพื่อทำการปรับค่าความจุสมมูล (CE) ที่ใช้ชดเชยค่าความจุขนานของ QCM ซึ่งเมื่อค่าผลต่างของแรงดันส่วนที่ไม่ผ่าน QCM และผ่าน QCM มีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าค่าความจุขนานถูกชดเชย วงจรอีกส่วนเป็นวงจรเฟสล๊อคคู่ทำหน้าที่ควบคุมให้ QCM สั้นที่ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม เอาท์พุทของวงจรมี 3 ส่วน ส่วนแรกคือความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมของ QCM ได้ค่ามาจากวงจรเฟสล๊อคคู่ ส่วนที่ 2 ได้มาจากการหาค่าแอมพลิจูดของการสั้นของ QCM ที่แสดงถึงค่า Q ของ QCM ส่วนสุดท้าย คือค่าแรงดัน DC ของวงจรที่ใช้ป้อนกลับเพื่อปรับค่าความจุที่ใช้ชดเชยค่าความจุขนาน แรงดันส่วนนี้แสดงถึงค่าความจุสมมูลที่ใช้ชดเชย

ปี 2005 Ivan D. Avramov [10] เสนอวงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์สำหรับ QCM เพื่อใช้งานกับ Network Analyzer ที่มีราคาสูง มีการชดเชยค่าความจุขนานด้วยตัวเหนี่ยวนำ เพื่อให้การวัดค่า Q ทำได้ง่ายขึ้นโดยการวัดค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ณ จุดที่มีความต่างเฟสของสัญญาณเป็นศูนย์

ปี 2008 María Dolores Valdés [11] และคณะ พัฒนาระบบวัดความถี่บน FPGA สำหรับ QCM โดยระบบวัดใช้เทคนิคการนับความถี่โดยตรงร่วมกับ Delay line ทำให้การวัดความถี่มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.05 Hz และใช้งานได้ถึงความถี่ 40 MHz วงจรทั้งหมดถูกสร้างลงบน FPGA รุ่น XC3S200 FPGA ของบริษัท Xilinx

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการหาค่าคงตัวเวลา (Time constant) [5,7] ของ QCM โดยการใช้วิธีการลดลงของสัญญาณคายออดในการสั้นของ QCM เมื่อหยุดจ่ายพลังงานให้กับ QCM โดยทำการเปิดวงจรส่วนขยาย ข้อดีของวิธีการนี้คือ ใช้วงจรที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์, วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล และ วงจรวัดความถี่ (Frequency counter) ซึ่งค่าคงตัวของเวลาเป็นผลจากค่าความต้านทานสมมูลภายในของ QCM หากค่าความต้านทานสมมูลมีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานสูง มีผลทำให้ QCM หยุดสั้นเร็วหรือกล่าวคือค่าคงตัวเวลาจะมีค่าต่ำ ในทางกลับกันหากค่าความต้านทานสมมูลมีค่าต่ำ ค่าคงตัวของเวลาจะสูง สำหรับวงจรที่ใช้วัดในวิทยานิพนธ์นี้ทั้งหมด จะถูกพัฒนาอยู่บน FPGA (Field programmable gate arrays) ซึ่งมีข้อดีคือสามารถปรับปรุงรายละเอียดของวงจรได้ตามความต้องการ

และ ไม่จำเป็นต้องต่อวงจรส่วนขยายต่างๆ ออกมาภายนอก ทำให้ระบบมีขนาดเล็ก เหมาะสำหรับการพัฒนาเครื่องวัดแบบพกพา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและประดิษฐ์ระบบค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวของตัวตรวจวัดชนิด QCM
2. ศึกษาประเมินความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. จำลองวงจรออสซิลเลเตอร์โดยใช้วงจรสมมูลของ QCM ที่ความถี่ 10 MHz
2. สังเคราะห์วงจรบน FPGA เพื่อวัดค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวของ QCM โดยมีขอบเขตของงานดังนี้คือ
  - QCM ที่ใช้มีค่าความถี่ประมาณ 10 MHz
  - วงจรต้องวัดค่าความถี่ได้ผิดพลาดไม่เกิน 100 Hz ความแปรปรวนไม่เกิน 1 Hz
  - วงจรต้องวัดค่าคงตัวของเวลาได้โดยมีค่าความผิดพลาดในช่วง 40  $\mu$ s
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารที่มีผลต่อค่าความต้านทานสมมูล และค่าความถี่กำลัง โดยทดสอบ QCM กับน้ำ และน้ำตาล

## 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ประดิษฐ์วงจรตรวจวัดความถี่และค่าคงตัวของ QCM
2. ทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่กัมมาและค่าคงตัวเวลาจาก QCM ด้วยน้ำ และของเหลวชนิดต่างๆ
3. วิเคราะห์ข้อมูลค่าความถี่กัมมาและค่าคงตัวเวลาจาก QCM เพื่อศึกษาความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ได้วงจรที่ใช้วัดค่าคงตัวเวลา และความถี่กัมมาของ QCM เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ใน งานตรวจวัดสารชีวภาพได้ ระบบที่ได้จะมีอุปกรณ์น้อยชิ้นกว่าที่มีรายงานมาก่อนหน้า มีความสะดวกในการใช้งานนอกสถานที่ และง่ายต่อการพัฒนาวงจรเพราะใช้การโปรแกรม ด้วยภาษา VHDL



## บทที่ 2

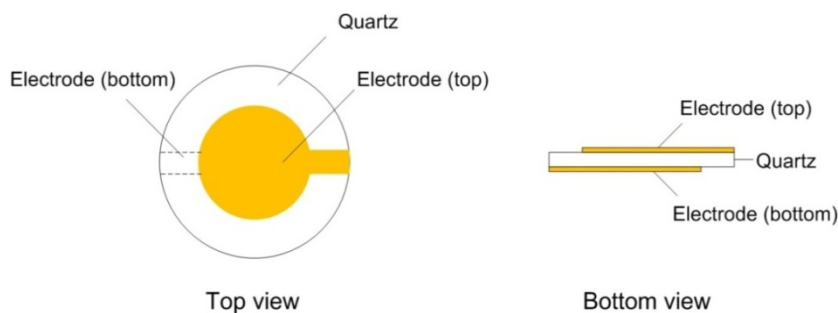
### หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งในส่วนของตัวตรวจวัด QCM และข้อมูลบางส่วนที่ใช้ในการการประดิษฐ์ระบบวัดเพื่อใช้กับ QCM รวมถึงตัวอย่างการนำ QCM ไปประยุกต์ใช้ในการงานวิจัยต่างๆ และ FPGA

#### 2.1 หลักการทำงานของ QCM

QCM เป็นเซนเซอร์ชนิดหนึ่งซึ่งทำจากวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งคือ ผลึกควอตซ์ (Quartz) ใช้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุในการทำงาน กล่าวคือเมื่อผลึกของวัสดุกลุ่มนี้ได้รับแรงเค้น จะมีผลให้โครงผลึกมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นในทางกลับกันถ้าเราป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่วัสดุก็จะทำให้โครงผลึกเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งถ้าหากป้อนกระแสไฟฟ้าสลับให้แก่ QCM จะทำให้ผลึกเกิดการสั่นและมีคลื่นกลเคลื่อนที่บนผิวผลึก QCM โดยจะมีความถี่บางค่าเท่านั้นที่ทำให้เกิดการแทรกสอดที่เป็นบวก เมื่อค่าความหนาของผลึกเท่ากับ  $\frac{n\lambda_0}{2}$  โดย  $n$  คือ จำนวนจริง 1,2,3,... และ  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นของคลื่นกล ซึ่งการแทรกสอดนี้จะทำให้ขนาดของการสั่นมากที่สุด ณ ความถี่  $f_0 = \frac{1}{\lambda_0}$  ซึ่งคือค่าความถี่กำรของคลื่นกล และมีผลย้อนกลับไปทางไฟฟ้าทำให้มีการกำรทางไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

โครงสร้างของ QCM จะประกอบด้วยอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน แสดงดังในภาพที่ 2.1 ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลและความหนืดของสาร โดยมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก ใช้ซ้ำได้ [12] มีความละเอียดในการวัดสูง และสามารถวัดแบบต่อเนื่องในเวลาจริง (Real time) ได้

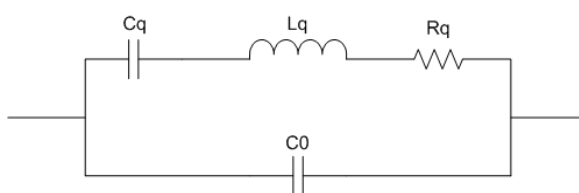


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของ QCM

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแสดงได้ในภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าใช้งานได้ค่าใกล้เคียงกับความจริงเมื่อ QCM ทำงานในช่วงที่ใกล้ค่าความถี่กำหนด โดยวงจรสมมูลประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- ค่า  $C_0$  คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ประกบอยู่กับผลึกควอตซ์ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก

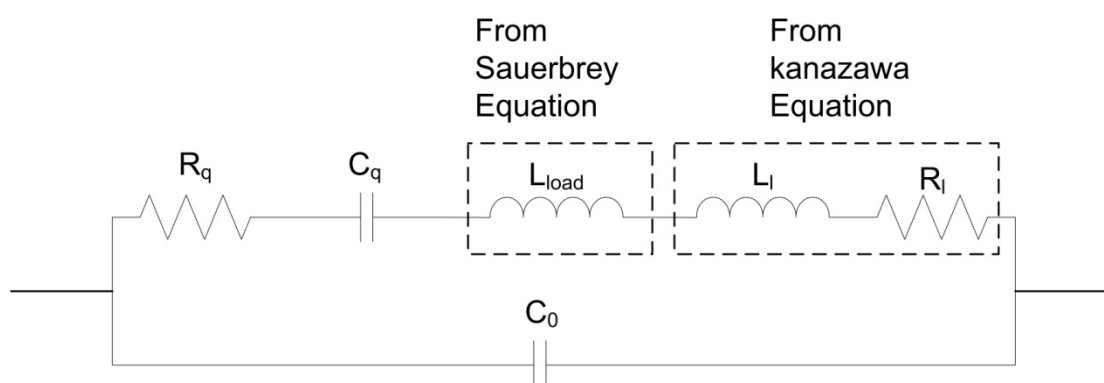
- ค่า  $R_q$ ,  $C_q$  และ  $L_q$  นั้นแปลงมาจากปรากฏการณ์ของคลื่นกลเมื่อผลึกเกิดการสั่น โดยขึ้นอยู่กับค่าคงตัวของความยืดหยุ่น (Elastic constant), ค่าคงตัวด้านเพียโซอิเล็กตริก (Piezoelectric constant), ลักษณะการตัดแวนผลึก (Crystal cut), ชนิดของคลื่นกลที่เกิดขึ้นในแวนผลึก, สัมประสิทธิ์การสะท้อนพลังงานจากผิวของแวนผลึก และ รูปร่างของแผ่นผลึก



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลของ QCM

## 2.2 ความถี่ก้ำจร (Resonant frequency) ค่า Q และ ค่าคงตัวเวลา

สำหรับการใช้งานเซนเซอร์ชนิด QCM ในการวัดมวลและความหนืดของสาร สิ่งที่น่าสนใจคือค่าความถี่ก้ำจร (Resonant frequency) และค่าความต้านทานสมมูลของ QCM โดยการเปลี่ยนแปลงค่าทั้งสองจะเกิดจากมวลที่มาเกาะบนผิวอิเล็กโทรดของ QCM และการเปลี่ยนแปลงความหนืดหรือความเข้มข้นของของเหลวที่สัมผัสอยู่บริเวณผิวของอิเล็กโทรด สำหรับการเปลี่ยนแปลงนั้น โดยทั่วไปสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลของ QCM ได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 วงจรสมมูลของ QCM เมื่อมีมวลและของเหลวมายึดเกาะที่ผิวอิเล็กโทรด

### 2.2.1 ความถี่ก้ำจร

วิธีการหาค่าความถี่ก้ำจร ของ QCM สามารถหาได้ทั้งโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยตรงด้วยเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network analyzer) [13] หรือจากการต่อ QCM เป็นรีโซเนเตอร์ในวงจรออสซิลเลเตอร์ จากนั้นป้อนสัญญาณให้กับ QCM แล้วทำการวัดความถี่ในการสั่นซึ่งมีค่าใกล้เคียงค่าความถี่ก้ำจร [8]

จากวงจรสมมูลภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนความถี่อันเกิดจากมวลที่มาเกาะผิวอิเล็กโทรดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของซอร์เบรย์ (Sauerbrey's equation) [2] ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีมวลมาเกาะที่ผิวอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น ความถี่ก้ำจรที่วัดได้จะมีค่าต่ำลงเนื่องจากมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้การสั่นลดลง

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2 \Delta m}{A\sqrt{\mu_q \rho_q}} \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ	$\Delta f$	คือ ความถี่ก้ำกัรที่เปลี่ยนไปเนื่องจากมวล (Hz)
	$f_0$	คือ ความถี่ก้ำกัรตั้งต้นของ QCM (Hz)
	$\Delta m$	คือ มวลที่มาเกาะผิวของ QCM (g)
	$\rho_q$	คือ ความหนาแน่นของ QCM ( $2.648 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
	$\mu_q$	คือ ค่าความเหนือนของ QCM ( $2.947 \times 10^{11} \text{ dyn cm}^{-2}$ )

สำหรับค่าความถี่ก้ำกัรตั้งต้นของ QCM สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 2.2 ซึ่งมาจากวงจรสมมูลภาพที่ 2.2 ดังนี้

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}} \dots\dots\dots (2.2)$$

สำหรับค่าความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวที่บริเวณผิวอิเล็กโทรดมีผลทำให้ค่าความถี่ในการสั่นของวงจรลดลงตามสมการของคานาซาวา (Kanazawa's equation) [3] ดังสมการที่ (2.3)

$$\Delta f_{liquid} = -f_0^{3/2} \left( \frac{\rho_L \eta_L}{\pi \rho_q \mu_q} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ	$\Delta f$	คือ ความถี่ก้ำกัรที่เปลี่ยนไป (Hz)
	$f_0$	คือ ความถี่ก้ำกัรของ QCM (Hz)
	$\rho_L$	คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลวที่ผิวอิเล็กโทรด ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	$\eta_L$	คือ ค่าความหนืดของของเหลวที่ผิวอิเล็กโทรด ( $\text{g}\cdot\text{s}/\text{cm}$ )
	$\rho_q$	คือ ความหนาแน่นของฟลิกควอตซ์ ( $2.648 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
	$\mu_q$	คือ ค่าความเหนือนของฟลิกควอตซ์ ( $2.947 \times 10^{11} \text{ dyn cm}^{-2}$ )

เนื่องจากความสะดวกในการวัดและวิเคราะห์ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจากมวลหรือของเหลว การใช้ค่าความถี่ก้ำกัรในการวิเคราะห์สารต่างๆด้วยตัวตรวจวัด QCM มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน ทั้งการตรวจวัดในงานเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม การตรวจวัดในกลุ่มงานเกษตรกรรม และมีงานวิจัยมากมายในด้านการแพทย์ [15] ซึ่งส่วนมากเป็นการประยุกต์ใช้งาน QCM เป็นไบโอเซนเซอร์ โดยการนำไปใช้ติดฉลากด้วยสารชีวโมเลกุล เช่น แอนติบอดี ดีเอ็นเอ

## 2.2.2 ค่า Q และ ค่าคงตัวของเวลาของ QCM

ค่า Q เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่สะสมอยู่ในระบบเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไปในกรณีของ QCM พลังงานที่สะสมใน QCM มาจากพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ และพลังงานที่สูญเสียมาจากค่าความต้านทาน เนื่องจาก QCM ทำงานที่ความถี่กำลัง ค่า Q จึงเป็นไปตามสมการที่ (2.4) และค่าคงตัวของเวลาของวงจรสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.5)

$$Q = \frac{\omega L_q}{R_q} = \frac{1}{\omega C_q R_q} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\tau = R_q C_q = R_q / L_q \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ	$Q$	คือ พลังงานที่สะสม/พลังงานที่สูญเสีย
	$\omega$	คือ ค่าความถี่กำลัง (Hz)
	$L_q$	คือ ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (H)
	$R_q$	คือ ค่าความต้านทานสมมูล ( $\Omega$ )
	$C_q$	คือ ค่าความจุสมมูล (F)

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าค่า Q เป็นผลรวมของตัวแปรถึง 3 ตัวคือ ความถี่กำลัง ค่าความเหนี่ยวนำ และ ค่าความต้านทาน ซึ่งเป็นการยากในการประเมินหาค่าตัวแปรให้ได้ทั้งสามตัว ในขณะที่ค่าคงตัวของเวลาเป็นผลของตัวแปร 2 ตัวโดยไม่ขึ้นกับความถี่กำลัง นอกจากนี้การวัดค่าคงตัวของเวลาของระบบสามารถให้ข้อมูลในแง่มุมของการตอบสนองของระบบได้ การวัดค่าคงตัวของเวลาสามารถพิจารณาได้จากการติดตามการสั่นของ QCM หลังสิ้นสุดการกระตุ้น ระบบที่สั่นได้นานกว่าหลังจากหยุดจ่ายพลังงานคือระบบที่มีค่าคงตัวของเวลาสูง หรือเป็นระบบที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า อันอาจจะเนื่องมาจากความหนืดหรือความเข้มข้นต่ำกว่า [16]

## 2.3 FPGA (Field Programmable Gate Arrays)

FPGA จัดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่โปรแกรมได้ โดยโครงสร้างหลักของ FPGA คือ Logic gate ชนิดโปรแกรมได้ และมีส่วนของ Flip flop ชนิดโปรแกรมได้ให้ใช้งาน FPGA จึงใช้งานได้หลากหลาย ตั้งแต่วงจร Finite state machine ไปจนถึง ไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ส่วนประกอบลอจิกพื้นฐานดังที่กล่าวมาแล้ว ผู้ผลิตได้มีการบรรจุอุปกรณ์อื่นๆ ลงบน FPGA เพื่อให้ใช้งาน FPGA ได้สะดวกขึ้น เช่น หน่วยความจำ ตัวคูณ (Multiplier) VGA controller, และ USB controller เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ขึ้นอยู่กับรุ่นของ FPGA ที่ใช้งาน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้บอร์ดรุ่น WARRIOR CYCLONE3 EB01/02 เป็นบอร์ดทดลอง ซึ่งใช้ชิป FPGA รุ่น CYCLONE3 รหัส EP3C10E144C8 ของบริษัท Altera co. มีความจุทางลอจิก 10,320 LEs (หรือ ประมาณ 575,800 เกท), RAM 414 Kbits, Build-in Phase Locked Loop 2 ชุด, Embedded Multipliers ขนาด 18 บิตx18บิต จำนวน 23 ชุด และ 9 บิตx9 บิต จำนวน 46 ชุดในตัวชุดบอร์ดทดลองเองก็มีส่วนโมดูลเพิ่มเติมให้ใช้งานดังนี้

1. โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด พร้อมไฟส่องหลัง (Backlight)
2. LED ขนาด 8 บิต
3. รีเลย์ 1 หน้าสัมผัส
4. บัสเซอร์
5. หน่วยความจำแบบ I2C ขนาด 32 Kbit และ Expansion I2C Port ขนาด 3.3V
6. พอร์ตอนุกรม
7. พอร์ต VGA สำหรับทดลองการเชื่อมต่อกับจอมอนิเตอร์
8. พอร์ต PS/2 สำหรับทดลองการเชื่อมต่อกับคีย์บอร์ด และเมาส์
9. ออสซิลเลเตอร์ขนาด 50 MHz (การสร้างควมถี่ภายในอื่นๆ สามารถใช้วงจรเฟสล็อกกูปซึ่งสร้างจาก MegaCore Wizard ของ QuartusII ได้)
10. สวิตช์เลื่อน 8 บิต
11. สวิตช์กดติด-ปล่อยดับ 4 บิต
12. สวิตช์รีเซ็ต (สำหรับ NIOS II Soft-Core Processor)
13. Expansion Port A ขนาด 14 บิต แบบอิสระ สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั่วไป
14. Expansion Port B ขนาด 38 บิต แบบอิสระ สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั่วไป หรือโมดูล SRAM และ SDRAM เพื่อการใช้งาน NIOS II Soft-Core Processor

### บทที่ 3

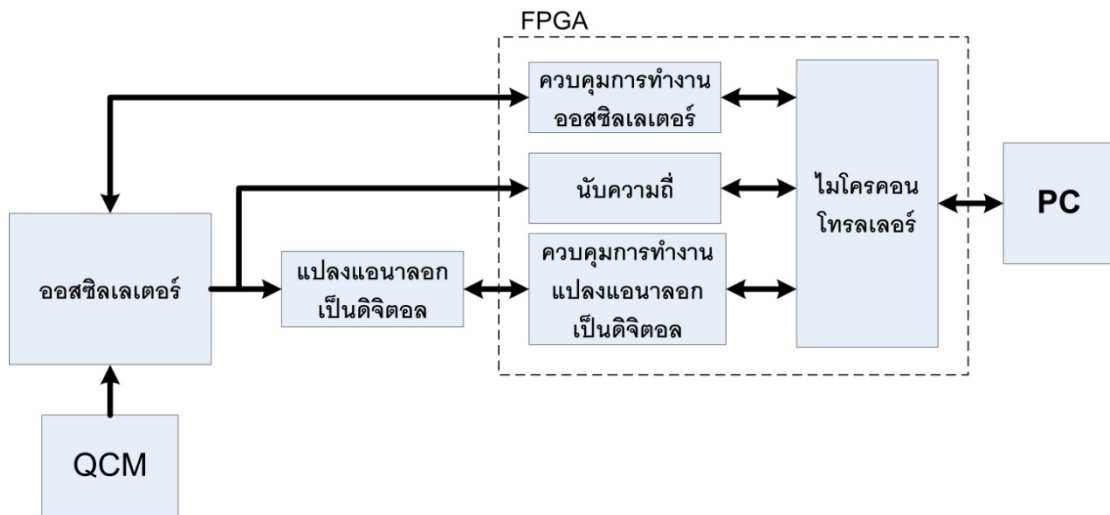
#### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประดิษฐ์และพัฒนาวงจรแบบต่างๆ โดยจะอธิบายรายละเอียดของส่วนประกอบของวงจร รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้งานร่วมกับวงจรมันๆ โดยส่วนประกอบของวงจรส่วนใหญ่พัฒนาบน FPGA ยกเว้นออสซิลเลเตอร์และไอซีแปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอล ส่วนท้ายของเนื้อหาอธิบายการประเมินความสามารถของวงจรแบบต่างๆที่ประดิษฐ์ขึ้น

#### 3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานในวงจรวัดค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวเวลา

วงจรที่จะทำหน้าที่วงจรวัดค่าความถี่กำลังและความต้านทานสมมูลต้องประกอบไปด้วยส่วนประกอบของวงจร 6 ส่วนคือ วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรนับความถี่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรควบคุมการทำงานของออสซิลเลเตอร์หรือ QCM และ วงจรแปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอล วงจรควบคุมการทำงานการแปลงแอนะลอกเป็นดิจิตอล โดยแสดงได้ดังภาพที่

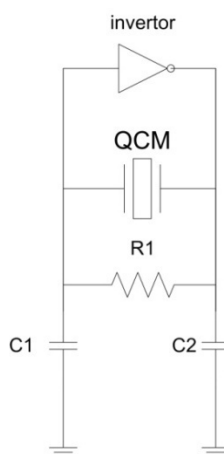
3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพรวมของวงจรที่พัฒนา

### 3.1.1 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit)

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในวิทยานิพนธ์นี้เป็นออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิตต์ (Colpitts oscillator) ชนิดใช้ ไอซีอินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส  $180^\circ$  และส่วนป้อนกลับใช้ QCM ตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุสองตัว ต่ออยู่ในรูปวงจรพาย (Pi) ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิตต์ที่ใช้เป็นพื้นฐาน

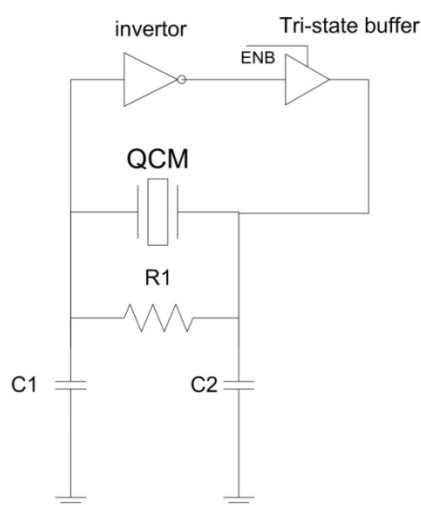
โดยค่าความถี่ในการสั่นของวงจรมีค่ากำหนดโดยค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุสมมูลของ QCM ซึ่งค่าความถี่ในการสั่นเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะใช้หาค่าคงตัวเวลาหรือความต้านทานสมมูล ที่เป็นตัวแปรที่แสดงถึงความสูญเสียได้

การหาค่าความต้านทานสมมูล โดยทั่วไปใช้การวัดค่า Q (Quality factor) ซึ่งวัดได้โดยการใช้ Network analyzer [10]หรือใช้วงจรจำเพาะในการหาค่า Q [8] ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรวัดค่าคงตัวเวลา แทนการหาค่าความต้านทานสมมูล

จากนิยามค่าคงตัวเวลา (Time constant) คือ เวลาที่ระบบตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step) โดยวัดเป็นระยะเวลาที่ระบบตอบสนองจนมีค่าเพิ่มถึง 63.2% ของค่ายอดของสถานะกระตุ้น หรือในทางกลับกันคือหากระบบได้รับการกระตุ้นและได้อยู่ในสถานะอยู่ตัวค่าหนึ่ง จากนั้นเมื่อหยุดการกระตุ้นนั้นๆ ค่าคงตัวเวลา คือระยะเวลาที่ระบบเปลี่ยนสถานะจากสถานะกระตุ้น กลับสู่สถานะไร้การกระตุ้น โดยลดระดับลงมาเหลือ 36.8% ของสถานะถูกกระตุ้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีปลดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ Tri-state buffer เพื่อหยุดการทำงานของ QCM จากนั้นจึงหาค่าคงตัวเวลา

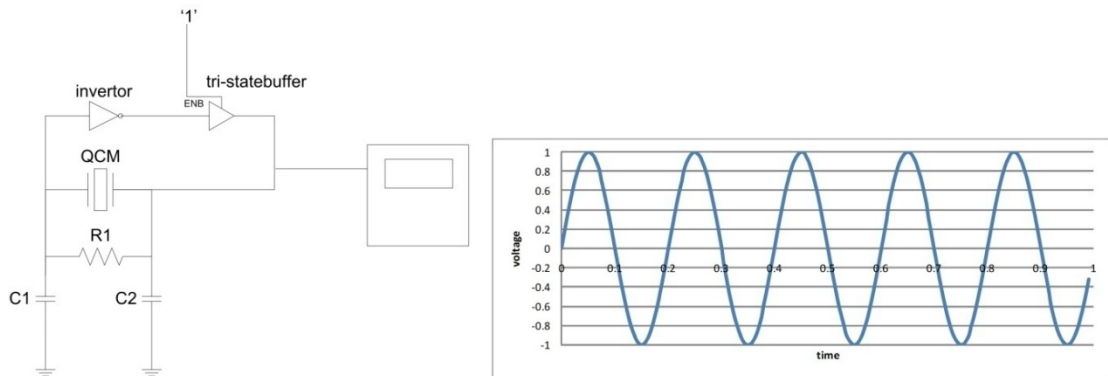


Tri-state buffer เป็นลอจิกเกตชนิดหนึ่งทำหน้าที่เหมือน Buffer ทั่วไปแต่มีขาควบคุม 1 ขา ควบคุมได้ว่าจะให้อยู่ในสถานะเป็น Buffer หรืออยู่ในสถานะความต้านทานสูง (Hi-impedance) ซึ่ง สถานะความต้านทานสูงคือการเปิดวงจร จึงใช้สมบัติของ Tri-state buffer ในการปลดหรือหยุดการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยการต่อ Tri-state buffer อนุกรมเข้าไปยัง เอาต์พุตของ อินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 3.3



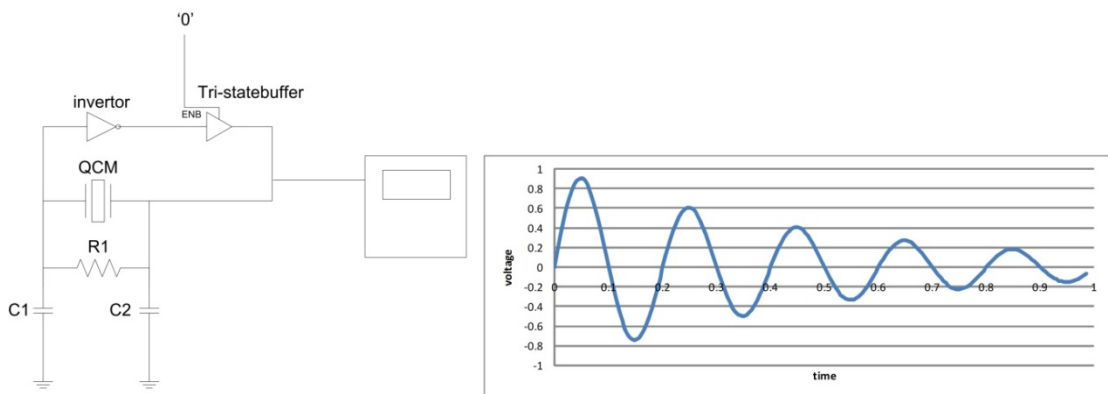
ภาพที่ 3.3 การต่อ Tri-state buffer ร่วมกับวงจรออสซิลเลเตอร์แบบคอลพิทท์

เมื่อขา ENB (Enable) ของ Tri-state buffer มีค่าลอจิกเป็น '1' วงจรออสซิลเลเตอร์นี้จะครบวงจรเกิดการสั่น โดยมีค่าของสัญญาณคงที่แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ขนาดของสัญญาณเมื่อขา ENB ของ Tri-state buffer มีค่าลอจิกเป็น '1'

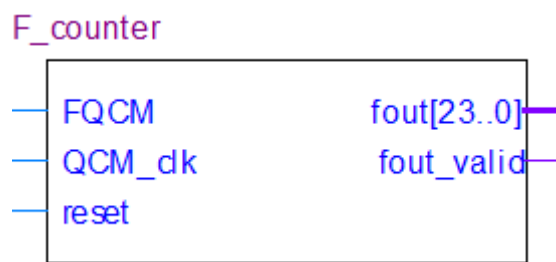
เมื่อขา ENB ของ Tri-state buffer มีค่าลอจิกเป็น '0' วงจรออสซิลเลเตอร์นี้จะถูกเปิดวงจร สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถส่งผ่าน Tri-state buffer ไปได้ ผลคือค่ายอดของ การสั่นจะค่อยๆ มีขนาดลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงาน (ภาพที่ 3.5) จากวงจรนี้สามารถประเมินค่าคง ตัวเวลาได้จากค่ายอดของการสั่นที่มีขนาดลดลง



ภาพที่ 3.5 ขนาดของสัญญาณเมื่อขา ENB ของ Tri-state buffer มีค่าลอจิกเป็น '0'

### 3.1.2 วงจรนับความถี่ (frequency counter)

เป็นวงจรส่วนที่มีหน้าที่นับความถี่ของ QCM โดยวงจรส่วนนี้สังเคราะห์อยู่บน FPGA ใช้วิธีนับจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณที่ต้องการนับในช่วงเวลา 1 วินาที โดยจำนวนลูกคลื่นที่นับได้คือค่าความถี่ของสัญญาณนั้น แสดงดังภาพที่ 3.6



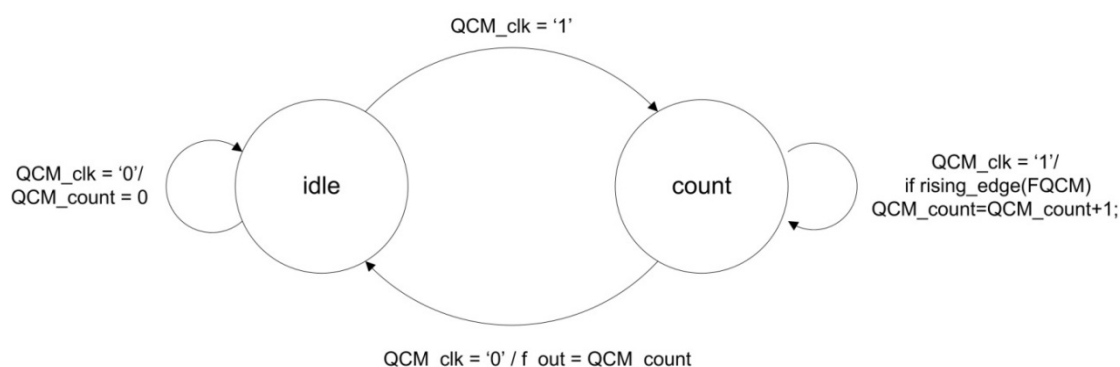
ภาพที่ 3.6 โมดูลวงจรถับความถี่

โมดูลวงจรถับความถี่ ประกอบด้วยอินพุต 3 ขา และขา เอาท์พุต 2 ขา

- (1) FQCM ขารับสัญญาณที่ต้องการนับความถี่
- (2) QCM\_clk วงจรถับความถี่จะเริ่มนับจำนวนลูกคลื่นเมื่อสัญญาณที่ขา ini มีค่าลอจิกเป็น '1' และจะทำการแสดงค่าลูกคลื่นที่นับได้เมื่อสัญญาณที่ขา ini มีค่าลอจิกเป็น '0' โดยปกติถ้าต้องการนับความถี่จะต้องป้อนสัญญาณที่มีความถี่ 0.5Hz แก่ขา ini เพื่อให้สัญญาณมีลอจิก '1' เป็นระยะเวลา 1 วินาที จำนวนลูกคลื่นที่นับได้จะเป็นค่าความถี่ของสัญญาณนั้น ค่า resolution ของวงจรถับความถี่จึงอยู่ที่ 1 Hz
- (3) reset ถ้าสัญญาณที่ขา ini มีค่าลอจิกเป็น '0' จะทำการรีเซ็ตค่าความถี่และหยุดนับความถี่ ถ้าสัญญาณที่ขา ini มีค่าลอจิกเป็น '1' วงจรถับความถี่จะทำการนับความถี่ตามสัญญาณ QCM\_clk ที่เข้ามา
- (4)  $f_{out}$  ขาแสดงสัญญาณความถี่ที่นับได้จำนวน 24 บิต แสดงค่าความถี่ได้สูงสุด  $2^{24} - 1 = 16,777,215$  Hz
- (5) fout\_valid ขาแสดงสัญญาณว่าความถี่ที่นับเรียบร้อยแล้วสามารถอ่านค่าได้

ภายใน โมดูลเป็น Finite state machine (ภาพที่ 3.7) ที่ประกอบด้วยสถานะสองสถานะ คือ สถานะ count และ สถานะ idle

- (1) สถานะ count ระบบจะทำการนับจำนวนขาขึ้นของสัญญาณที่เข้ามายังขา FQCM เมื่อขา QCM\_clk มีค่าลอจิกเป็น '1' และแสดงค่า fout\_valid เป็น '0' จนกระทั่งขา QCM\_clk มีค่าลอจิกเป็น '0' วงจรจะเปลี่ยนสถานะไปยัง idle และแสดงค่าความถี่ออกไปยังขา f\_out
- (2) สถานะ idle ระบบจะแสดงค่า fout\_valid เป็น '1' เมื่อ QCM\_clk มีค่าลอจิกเป็น '0' จนกระทั่งขา QCM\_clk มีค่าลอจิกเป็น '1' วงจรจะเปลี่ยนสถานะไปยัง count



ภาพที่ 3.7 Finite state machine ของโมดูลวงจรมับความถี่

### 3.1.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดฝังตัว (Embedded) บน FPGA รุ่น Nios 2 ของบริษัท Altera ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดฝังตัวคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานอยู่บน FPGA โดยอาศัยทรัพยากรลอจิกเกตบน FPGA ในการสร้าง (Synthesize) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขึ้นมา โดยทาง Altera มีส่วนต่อขยายชื่อ Qsys ช่วยเหลือในการออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มี อุปกรณ์ข้างเคียง (Peripheral) เช่น ไทม์เมอร์ (Timer) , SPI (Serial Peripheral Interface), พอร์ต (Port) และอินเทอร์รัพต์ (Interrupt) ได้ตามที่เราร้องการ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่รับค่าจากโมดูลและแสดงค่าออกทางหน้าจอเท่านั้น จำนวน พอร์ตที่ใช้ในวงจรแต่ละแบบจะตั้งให้เหมาะสมกับโมดูลที่นำมาใช้ในวงจรแต่ละแบบ ในที่นี้จะไม่ลงรายละเอียดความต่างของไมโครคอนโทรลเลอร์ในวงจรแต่ละแบบ

### 3.1.4 วงจรควบคุมการทำงานของ QCM

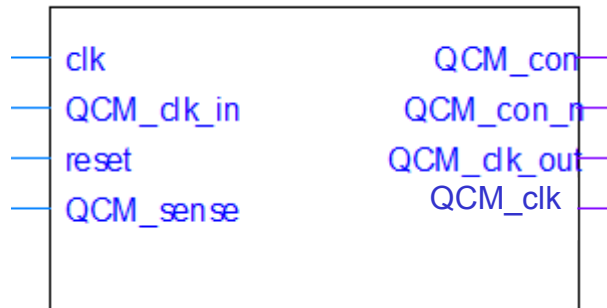
เป็นวงจรที่ออกแบบเพื่อควบคุมจังหวะการเปิดปิดของ QCM โดยการส่งสัญญาณควบคุมไปยัง Tri-state buffer ให้เปิดวงจรและต่อวงจรตามจังหวะสัญญาณนาฬิกา โดยจังหวะที่ต่อวงจรจะเป็นจังหวะที่วงจรนับความถี่ทำการนับความถี่สัญญาณของ QCM จังหวะเปิดวงจรเป็นจังหวะที่อ่านสัญญาณการลดลงของค่ายอดโดยใช้ วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to digital converter) หรือ โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคป ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของ QCM ไว้ 2 แบบ

#### วงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1

วงจรแบบที่ 1 นี้ประกอบด้วยขาอินพุต 4 ขาคือ clk, QCM\_clk\_in, reset และ QCM\_sense และเอาต์พุต 4 ขาคือ QCM\_con, QCM\_con\_n, QCM\_clk\_out และ FQCM ดังภาพที่ 3.8

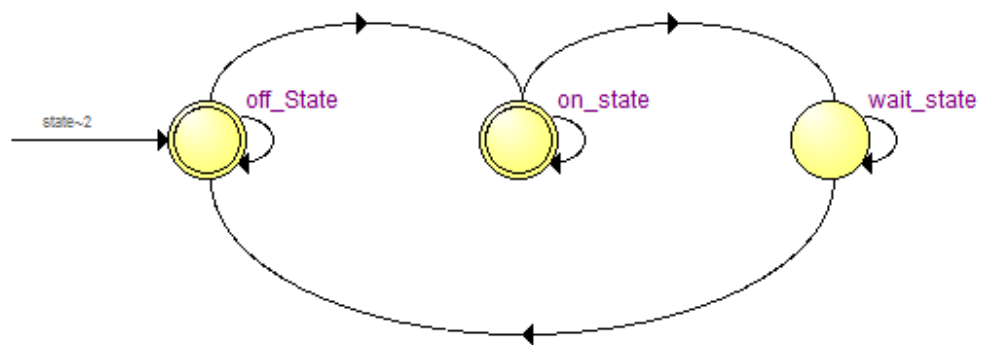
- (1) clk เป็นขาสัญญาณนาฬิกาหลักใช้ที่ความถี่ 50 MHz
- (2) QCM\_clk\_in เป็นขาสัญญาณนาฬิกาความถี่ 0.5 Hz ใช้เพื่อให้วงจรควบคุมทำการเปิดปิด QCM ให้มีจังหวะการเปิดและปิดที่เวลา 1 วินาที
- (3) reset เป็นขารีเซ็ตของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM ถ้าค่าลอจิกเป็น '0' วงจรจะหยุดทำงาน ถ้าค่าเป็น '1' วงจรจะทำงาน
- (4) QCM\_sense ทำหน้าที่อ่านค่าสัญญาณ ที่ขาเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ของวงจรออสซิลเลเตอร์ เพื่อตรวจสอบว่าสัญญาณการสั่นของ QCM อยู่ในช่วงขาขึ้น (Rising edge) หรือไม่
- (5) QCM\_con และ QCM\_con\_n เป็นเอาต์พุตทำหน้าที่ควบคุมการเปิดปิด Tri-state buffer ของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยมีเอาต์พุตแบบ active high และแบบ active low ให้เลือกใช้
- (6) QCM\_clk เป็นเอาต์พุตที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมวงจรนับความถี่โดยจะส่งสัญญาณลอจิก '1' แก่วงจรนับความถี่ เป็นระยะเวลา 1 วินาทีเพื่อให้วงจรนับความถี่ในระยะเวลา 1 วินาที
- (7) FQCM เป็นเอาต์พุตทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณการสั่นจาก QCM ไปยังโมดูลนับความถี่แบบที่ 1

QCM\_control1



ภาพที่ 3.8 โมดูลวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1

ภายในโมดูลเป็น Finite state machine (ภาพที่ 3.9) ประกอบด้วยสถานะ 3 สถานะ ดังนี้



ภาพที่ 3.9 Finite state machine ของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1 โดยส่งสัญญาณลอจิกไปยังขาออกแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัญญาณขาออกของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 1

	on_state	Wait_state	off_state
QCM_con	1	1	0
QCM_con_n	0	0	1
QCM_clk	1	0	0
FQCM	QCM_sense	0	0

(1) on\_state

สถานะนี้วงจรจะส่งสัญญาณลอจิก '1' และ '0' ผ่านขา QCM\_con และ QCM\_con\_n ตามลำดับ เพื่อควบคุมให้ Tri-state buffer ทำงาน วงจรออสซิลเลเตอร์ที่กล่าว

ไปแล้วจะมีการสั้น ส่งสัญญาณลอจิก '1' ผ่านขา QCM\_clk ของวงจรควบคุมไปยังขา QCM\_clk ของโมดูลวงจรมับความถี่เพื่อให้วงจรมับความถี่ สัญญาณ FQCM เป็นการส่งผ่านสัญญาณ QCM\_sense ซึ่งเป็นสัญญาณที่รับมาจากการสั้นของ QCM โดยตรง ส่งไปยังขา FQCM ของวงจรมับความถี่ วงจรจะอยู่ในสถานะนี้จนกระทั่งสัญญาณที่เข้ามายังขา QCM\_clk\_in มีค่าลอจิกเป็น '0'

### (2) Wait\_state

ในสถานะนี้วงจรจะส่งสัญญาณลอจิก '0' ผ่านขา QCM\_clk ของวงจรควบคุมไปยังขา QCM\_clk เพื่อให้หยุดการนับความถี่ และส่งสัญญาณลอจิก '0' ผ่านขา FQCM ของโมดูลนี้ไปยังขา FQCM ของโมดูลนับความถี่ และวงจรจะรอจนกระทั่งอ่านได้ค่าขอขอบขาขึ้นของสัญญาณการสั้นจาก QCM จึงจะทำการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ off\_state

เนื่องจากการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้ทำการจำลองการเปิดปิดวงจรของ QCM เพื่อหาความเป็นไปได้ในการประเมินค่าคงตัวเวลา พบว่า เงื่อนไขเวลาในการปิดวงจร ออสซิลเลเตอร์มีความสำคัญ เงื่อนไขที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าเริ่มต้น (Initial condition) เปลี่ยนไป ผลคือค่าคงตัวเวลาเปลี่ยนแปลงตามค่าเริ่มต้นที่เปลี่ยนไป เพื่อควบคุมให้วงจรรออสซิลเลเตอร์มีค่าเริ่มต้นเดียวกันจึงเพิ่มสถานะ wait\_state เข้ามาในวงจรนี้

### (3) off\_state

สถานะนี้วงจรจะส่งสัญญาณลอจิก '1' และ '0' ผ่านขา QCM\_con และ QCM\_con\_n ตามลำดับ เพื่อควบคุมให้ Tri-state buffer ทำงาน วงจรออสซิลเลเตอร์ที่กล่าวไปแล้ว ให้เปิดวงจร ส่งผลให้สัญญาณการสั้นค่อยๆ ลดขนาดลง และหาค่าคงตัวเวลาได้ เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาทีวงจรจะเปลี่ยนสถานะกลับไปยัง on\_state อีกครั้ง

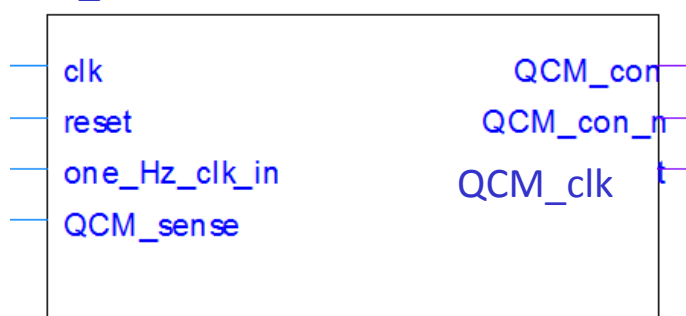
## วงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 2

วงจรแบบที่ 2 ต่างจากวงจรแบบที่ 1 ในส่วนของ Finite state machine ได้มีการเพิ่มสถานะ F\_count ขึ้นมา โดยให้สถานะ on\_state เป็นสถานะที่ Tri-state buffer ต่อวงจรออสซิลเลเตอร์ แต่ไม่มีการนับค่าความถี่ด้วยโมดูลนับความถี่ แต่สถานะ F\_count จะมีการนับความถี่ของวงจรรออสซิลเลเตอร์ เหตุผลที่เพิ่มวงจรมับความถี่นี้เนื่องจากการสั้นของ QCM ต้องมีเวลา start-up time ค่าหนึ่งก่อนที่ QCM จะสั้นถึงสถานะอยู่ตัว การนับความถี่ในช่วง start-up อาจมีความผิดพลาดได้ จึงทำการเพิ่มสถานะ F\_count เข้ามาโดยให้ใน สถานะ on\_state ยังไม่มีการนับความถี่ของ QCM โดยเริ่มมีการนับความถี่ในสถานะ F\_count

วงจรแบบที่ 2 นี้ประกอบด้วยขาอินพุต 4 ขาคือ clk, QCM\_clk\_in, reset และ QCM\_sense และเอาต์พุต 3 ขาคือ QCM\_con, QCM\_con\_n, QCM\_clk และ FQCM ดังภาพที่ 3.10

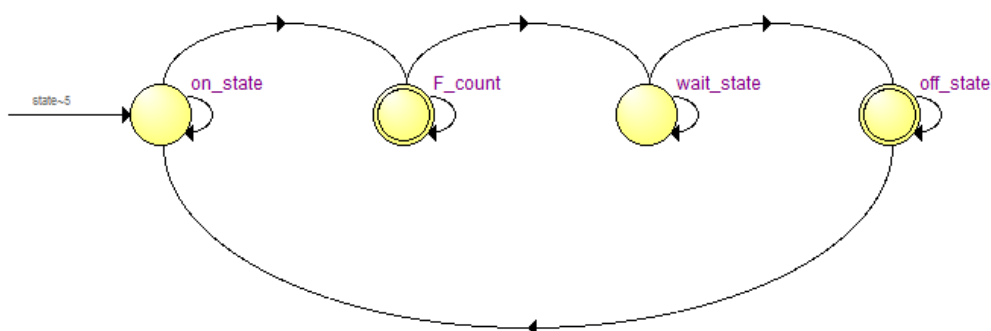
- (1) clk เป็นขาสัญญาณนาฬิกาหลักใช้ที่ความถี่ 50 MHz
- (2) QCM\_clk\_in เป็นขาสัญญาณนาฬิกาความถี่ 0,5 Hz ใช้เพื่อให้วงจรควบคุมทำการเปิดปิด QCM ให้มีจังหวะการเปิดและปิดที่เวลา 1 วินาที ในวงจรแบบที่ 2 นี้ใช้ความถี่ QCM\_clk\_in ที่ 0.5 Hz โดยใช้งานร่วมกับวงจรหารความถี่แบบหลายค่า
- (3) reset เป็นขารีเซ็ตของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM ถ้าค่าลอจิกเป็น '0' วงจรจะหยุดทำงาน ถ้าค่าเป็น '1' วงจรจะทำงาน
- (4) QCM\_sense ทำหน้าที่อ่านค่าสัญญาณ ที่ขาเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ของวงจรออสซิลเลเตอร์ เพื่อตรวจสอบว่าสัญญาณการสั่นของ QCM อยู่ในช่วงขาขึ้นหรือไม่
- (5) QCM\_con และ QCM\_con\_n เป็นเอาต์พุตทำหน้าที่ควบคุมการเปิดปิด Tri-state buffer ของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยมีเอาต์พุตแบบ active high และแบบ active low ให้เลือกใช้ งาน
- (6) QCM\_clk เป็นเอาต์พุตที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมวงจรนับความถี่โดยจะส่งสัญญาณลอจิก '1' แก่วงจรนับความถี่ เป็นระยะเวลา 1 วินาทีเพื่อให้วงจรนับความถี่ในระยะเวลา 1 วินาที

### QCM\_control2



ภาพที่ 3.10 โมดูลวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 2  
 ภายโมดูลเป็น Finite state machine ประกอบด้วยสถานะ ดังนี้





ภาพที่ 3.11 Finite state machine ของวงจรควบคุมการทำงานแบบที่ 2

โดยส่งสัญญาณลอจิกไปยังขาออกแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัญญาณขาออกของวงจรควบคุมการทำงานของ QCM แบบที่ 2

	on_state	F_count	wait_state	off_state
QCM_con	1	1	1	0
QCM_con_n	0	0	0	1
QCM_clk_out	0	1	0	0

(1) on\_state

ในสถานะนี้วงจรจะส่งสัญญาณลอจิก '1' และลอจิก '0' ผ่านขา QCM\_con และ QCM\_con\_n ตามลำดับ ไปยัง Tri-state buffer ให้ทำการต่อวงจร เพื่อให้วงจรออสซิลเลเตอร์ทำงาน และ ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดเงื่อนไขให้วงจรอยู่ในสถานะนี้เป็นเวลา 1 วินาที วงจรจึงเปลี่ยนสถานะไปยัง F\_count

(2) F\_count

ในสถานะนี้วงจรจะส่งสัญญาณลอจิก '1' ผ่านไปยังขา QCM\_clk เพื่อให้วงจรนับความถี่ F\_counter ทำการนับความถี่ วงจรจะอยู่ในสถานะนี้เป็นเวลา 1 วินาทีวงจรจะเปลี่ยนสถานะไปยัง wait\_state

(3) Wait\_state

ในสถานะนี้วงจรจะส่งสัญญาณลอจิก '0' ไปยัง QCM\_clk ทันทีเพื่อให้หยุดการนับความถี่ และวงจรจะรอจนกระทั่งอ่านค่าสัญญาณขาขึ้นของสัญญาณการสั้นจาก QCM จึงจะทำการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ off\_state

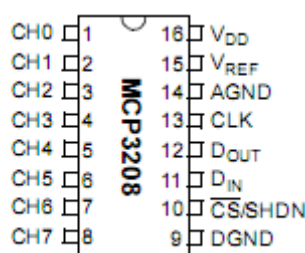
#### (4) off\_state

ในสถานะนี้วงจรส่งสัญญาณลอจิก '0' ไปยัง Tri-state buffer ให้เปิดวงจร ส่งผลให้สัญญาณการสั้นค่อยๆ ลดขนาดลง และหาค่า Time constant ได้ เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาทีวงจรจะเปลี่ยนสถานะกลับไปยัง on\_state อีกครั้ง

### 3.1.5 วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล และ วงจรควบคุมการทำงานของไอซีแอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC control)

#### 3.1.5.1 วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลของวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้ไอซีเบอร์ MCP3208 ของบริษัท Microchip ตามภาพที่ 3.12 มีความละเอียด (Resolution) 12 บิต จำนวน 8 อินพุต สื่อสารด้วยมาตรฐาน SPI มีความถี่การซัดตัวอย่างสูงสุด 100 ksps แรงดันไฟเลี้ยงที่ระดับ 2.7 V ถึง 5.5 V มีคุณสมบัติตามเอกสารการใช้งานดังตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.12 ไอซี MCP3208 ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

### ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติแปลงไอซีแอนาล็อกเป็นดิจิทัล เบอร์ MCP3208 ของบริษัท

Microchip

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ความละเอียด	12 bits
วิธีการแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิทัล	Susccessive approximation
เวลาในการแปลง (conversion time)	12 clk
เวลาในการซักรหัสสัญญาณแอนาล็อก	1.5 clk
ความถี่การซักรหัสสูงสุด	100 ksp/s
การสื่อสาร	SPI

จากเอกสารแนะนำการใช้งานของไอซี MCP3208 ค่าความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงสุดที่ใช้งานได้เป็น 2 MHz จะได้ค่าความถี่การซักรหัสที่ 100 kHz จากสมการ  $f_{clk} = 20 * f_{sample}$  (อ้างอิงจาก Datasheet ของ MCP3208) การติดต่อกับ MCP3208 ใช้มาตรฐาน SPI (Serial Peripheral Interface) โดยในการติดต่อกับไอซี MCP3208 อาศัยการเชื่อมต่อ 4 ขา

(1)  $\overline{CS}$  ขานี้ทำหน้าที่เลือกใช้งานหรือไม่ใช้งานไอซี (Chip select) นี้ ขานี้ทำงานแบบ active low คือถ้าป้อนลอจิก '0' ไอซีนี้พร้อมทำการแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิทัล ถ้าป้อนลอจิก '1' ไอซีนี้ไม่พร้อมทำการแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิทัล

(2) CLK ขานี้เป็นสัญญาณนาฬิกาทำหน้าที่กำหนดความถี่ในการซักรหัส และกำหนดจังหวะเวลาในการส่งและรับข้อมูลระหว่างวงจรควบคุมการทำงานของไอซีแอนาล็อกเป็นดิจิทัล และ ไอซีแอนาล็อกเป็นดิจิทัล

(3) Din ขารับการสั่งการจากวงจรควบคุม โดยส่งคำสั่งมาเป็นลำดับตามจังหวะสัญญาณนาฬิกา เมื่อขา  $\overline{CS}$  ได้รับสัญญาณลอจิกเป็น 1 ระบบจะทำการเว้นไป 1 ช่วงสัญญาณนาฬิกา (CLK) ก่อนทำการส่งคำสั่งจำนวน 4 บิต โดยมีรายละเอียดของข้อมูล ดังนี้

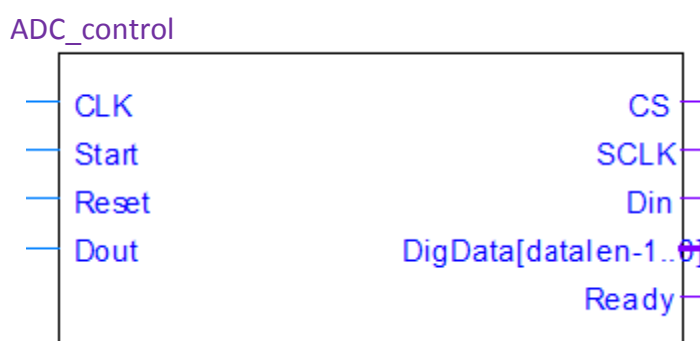
บิตที่ 1 เลือก แปลงแอนาล็อกเป็นดิจิทัล แบบ Single-ended หรือ แบบ Differential การแปลงข้อมูลแอนาล็อกเป็นดิจิทัลแบบ Single-ended คือการแปลงข้อมูลสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลช่องที่ต้องการวัดโดยตรง แบบ Differential คือการแปลงข้อมูลโดยเปรียบเทียบแรงดันระหว่างช่องสัญญาณ

บิตที่ 2 - 4 ทำการเลือกว่าต้องการอ่านค่าการแปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอลจากช่องสัญญาณไหน รายละเอียดการส่งคำสั่ง คูได้ในตารางที่ (3.2)

(4) Dout ขาส่งข้อมูลออก หลักจากไอซี MCP3208 ได้รับคำสั่งจากขา Din แล้ว เว้นไปสองช่วงสัญญาณนาฬิกา จากนั้นจึงแสดงข้อมูล ไต่จากบิตที่ 12 (B11) ไปยังบิตที่ 1 (B0) ตามจังหวะสัญญาณนาฬิกา จากนั้นจะสิ้นสุดการทำงาน

### 3.1.5.2 วงจรควบคุมการทำงานของไอซีแอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC control)

วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสาร FPGA กับไอซีแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล MCP3208 โดยทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ 1.สั่งการให้ไอซีทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลและรับค่ากลับมา 2.แปลงข้อมูลแบบอนุกรม (Serial) ให้เป็นแบบขนาน (Parallel) เพื่อส่งต่อไปใช้งานต่อไป



ภาพที่ 3.13 โมดูลวงจรควบคุมการทำงานของ ADC

จากภาพที่ 3.13 โมดูลประกอบด้วยขาอินพุต 4 ขาคือ clk, Start, Reset และ Dout และเอาต์พุต 5 ขาคือ CS, SCLK, Din, DigData [datalen-1..0] และ Ready

(1) clk เป็นขาสัญญาณนาฬิกาทำหน้าที่กำหนดความถี่ในการ sampling ข้อมูลตามสมการ  $f_{clk} = 20 * f_{sample}$  (อ้างอิงจาก datasheet ของ MCP3208) แต่โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้เว้นช่วงระหว่างรอยต่อของข้อมูลเพิ่มอีก 1 ลูกสัญญาณ clk เพื่อทำการล้างข้อมูลที่เก็บไว้บนหน่วยความจำของส่วนวงจรควบคุม ทำให้การแปลงข้อมูลต่อ 1 ครั้งใช้เวลา 21 ลูกคลื่น สมการจึงเปลี่ยนเป็น  $f_{clk} = 21 * f_{sample}$  โดยความถี่นี้จะถูกหารลงเหลือครึ่งหนึ่งเพื่อส่งต่อการเตรียมชุดคำสั่งแก่ SPI เนื่องจากการรับส่งข้อมูลแบบ SPI ข้อมูลจะถูกดำเนินการ ณ ขอบขาขึ้นของสัญญาณ clk การหารความถี่ลงเพื่อให้มีเวลาในการเตรียม

ข้อมูลระหว่างช่วงสัญญาณ ดังนั้นสมการจึงถูกปรับเป็น  $\frac{f_{clk}}{2} = 21 * f_{sample}$  ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

(2) Start เป็นสัญญาณเพื่อสั่งเริ่มการทำงานของวงจรควบคุมไอซีแปลงสัญญาณจากแอนาโลกเป็นดิจิทัล

(3) Reset ขานี้ทำหน้าที่รีเซ็ตค่าที่ขา DigData ให้ค่าลอจิกเป็น '0'

(4) Dout รับข้อมูลมาแปลงสัญญาณจากแอนาโลกเป็นดิจิทัลโดยไอซี MCP3208 โดยรับค่ามาทีละ 1 บิตไล่จากบิตที่ 12 (B11) ไปยังบิตที่ 1 (B0) ตามจังหวะสัญญาณนาฬิกา

(5) CS ขานี้ทำหน้าที่เลือกใช้งานหรือไม่ใช้งานไอซี (Chip select) นี้ ขานี้ทำงานแบบ active low คือถ้าป้อนลอจิก '0' ไอซีนี้พร้อมทำการแปลงสัญญาณจากแอนาโลกเป็นดิจิทัล ถ้าป้อนลอจิก '1' ไอซีนี้ไม่พร้อมทำการแปลงสัญญาณจากแอนาโลกเป็นดิจิทัล

(6) SCLK ขานี้เป็นสัญญาณนาฬิกาทำหน้าที่กำหนดความถี่ในการซัดตัวอย่าง และกำหนดจังหวะเวลาในการส่งและรับข้อมูลระหว่างวงจรควบคุมการทำงานของไอซีแปลงสัญญาณแอนาโลกเป็นดิจิทัล

(7) Din ส่งคำสั่งควบคุมไปยังไอซีแปลงสัญญาณแอนาโลกเป็นดิจิทัล รายละเอียดดูได้จากหัวข้อ ไอซีแปลงสัญญาณแอนาโลกเป็นดิจิทัล และตารางที่ 3.3 และภาพที่ 3.12

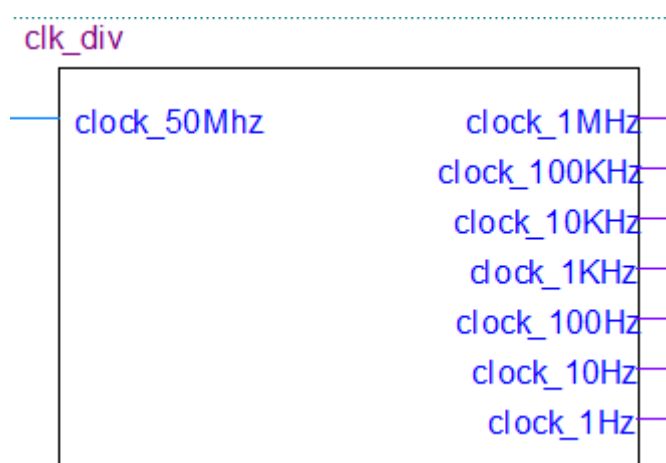
(8) DigData[datalen-1..0] เมื่อ โมดูลนี้ได้รับข้อมูลการแปลงสัญญาณแอนาโลกเป็นดิจิทัลจากขา Dout วงจรจะแปลงข้อมูลจากอนุกรม (Serial) เป็นแบบขนาน (Parallel) แสดงออกทางขา DigData นี้ โดย ค่า datalen ใช้กำหนดจำนวนบิตของข้อมูลที่ได้จากการแปลงแอนาโลกเป็นดิจิทัล ซึ่ง MCP3208 มีค่าความละเอียดอยู่ที่ 12 บิต ค่า datalen จึงกำหนดที่ 12 บิต ตามความละเอียด

(9) Ready ขาสัญญาณเพื่อบอกว่า การแปลงสัญญาณจากแอนาโลกเป็นดิจิทัลทำสำเร็จ

## 3.2 ส่วนประกอบในวงจรวัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการอ่านค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวเวลา

### 3.2.1 วงจรหารความถี่

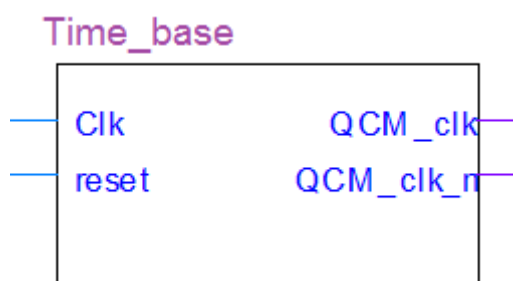
เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาความถี่ต่างๆ กัน โดยทำการหารความถี่ของออสซิลเลเตอร์หลักลงออกเป็นค่าความถี่ต่างๆ ที่มีค่าลดลง โดยหารความถี่ของออสซิลเลเตอร์หลักของบอร์ดทดลอง จาก 50 MHz ลงเป็น 1 MHz, 100 kHz, 10 kHz, 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz และ 1 Hz แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 โมดูลวงจรถหารความถี่

### 3.2.2 วงจรฐานเวลา (time base)

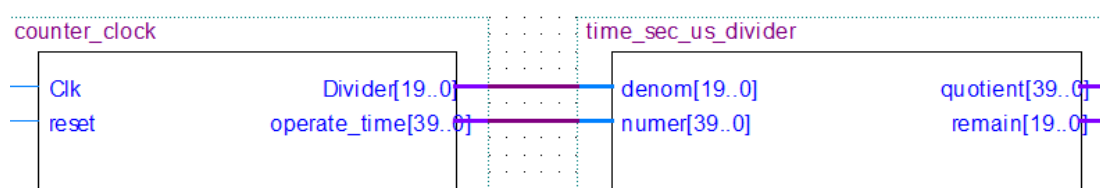
เป็นวงจรถหารความถี่จาก 50 MHz ให้เหลือ 0.5 MHz มีใช้ในวงจรแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ทำหน้าที่หารความถี่หลักของออสซิลเลเตอร์รับบอร์คทดลอง เพื่อใช้ควบคุม Tri-state buffer โดยตรงสำหรับวงจรแบบที่ 1 และใช้ในโมดูลวงจรถควบคุมการทำงานแบบที่ 1 สำหรับวงจรแบบที่ 2 แสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 โมดูลวงจรถฐานเวลา

### 3.2.2 วงจรนับเวลาระบบ (Counter clk)

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่นับเวลารวมของระบบว่าผ่านไปนานเท่าใด โดยการนับลูกคลื่นของสัญญาณนาฬิกาความถี่ 1 MHz ที่เข้ามา จากนั้นนำไปผ่านวงจรถหาร (Divider) ด้วยตัวหาร (Denominator) ค่า 1,000,000 เนื่องจากค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามามีความถี่ 1 MHz เมื่อทำการหารค่าความถี่นี้ด้วย 1,000,000 ค่าเศษที่ได้จะเป็นค่าเวลาในหน่วยไมโครวินาที และค่าส่วนจะเป็นค่าเวลาในหน่วยวินาที ดังแสดงในภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 โมดูลนับเวลาของระบบ

โมดูลวงจรมับความถี่ ประกอบด้วยอินพุต 2 ขาคือ clk และ reset และเอาต์พุต 2 ขาคือ quotient และ remain

- (1) clk สัญญาณนาฬิกาเข้าที่ขา ini โดยวงจรมับความถี่ใช้สัญญาณนาฬิกาที่ 1 MHz เพื่อบับลูกคลื่นสัญญาณ
- (2) reset ทำหน้าที่รีเซ็ตค่าลูกคลื่นที่นับไปแล้วของวงจรมับความถี่
- (3) quotient ขาแสดงเวลาที่นับในหน่วยวินาที
- (4) remain ขาแสดงเวลาที่นับในหน่วยไมโครวินาที

### 3.3 ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในการอ่านค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวเวลา

ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องอาศัยโปรแกรมควบคุมการอ่านและแสดงผลค่าความถี่และค่าการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โค้ดโปรแกรมที่ใช้พัฒนาด้วยภาษา JAVA โดยคอมไพเลอร์ที่ใช้คือ Nios2Software built tool for eclipse เป็นคอมไพเลอร์ของบริษัท Altera ที่ออกแบบมาเพื่อใช้เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ Nios2 การพัฒนาซอฟต์แวร์แบ่งเป็นสองส่วนคือ ซอฟต์แวร์แสดงความถี่และซอฟต์แวร์แสดงค่าแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

#### 3.3.1 ซอฟต์แวร์แสดงความถี่

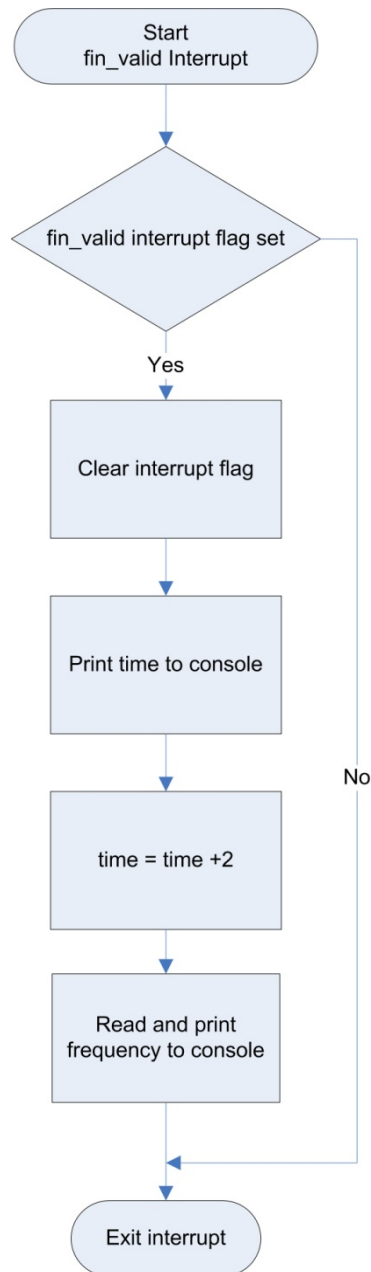
ซอฟต์แวร์แสดงความถี่ทำหน้าที่อ่านค่าความถี่จากโมดูลนับความถี่และนำมาแสดงผลออกทางหน้าจอ โดยส่งค่าผ่านสาย JTAG UART ผ่านทาง port ขนานและแสดงบนหน้าต่าง console ของโปรแกรม NIOS2 ในงานวิจัยชิ้นนี้ออกแบบโปรแกรมนับความถี่ไว้สองแบบ

### โปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 1

เป็นโปรแกรมอ่านค่าความถี่ที่ใช้ในวงจรวัดแบบที่ 1 ถึงแบบที่ 3 โดยรับค่าความถี่ที่ได้มาและแสดงออกทางหน้าจอทันที มีขั้นตอนการทำงานตามภาพที่ 3.17 ดังนี้

- (1) เกิดอินเตอร์รัพต์ชื่อ fin\_valid โดยอินเตอร์รัพต์ นี้บ่งบอกว่าโมดูลวงจรมับความถี่นับค่าความถี่เสร็จเรียบร้อยแล้ว
- (2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ข้ามไปทำงานในฟังก์ชันอินเตอร์รัพต์ชื่อ fin\_valid แสดงค่าตัวแปรชื่อ time ออกทางหน้าต่างแสดงผล ซึ่งทำหน้าที่เก็บค่าเวลาของระบบ เพิ่มค่าของตัวแปร time ไป 2 วินาที (เนื่องจากการทำงาน 1 รอบการอ่านค่าความถี่ใช้เวลา 2 วินาที) ทำการอ่านค่าความถี่จากโมดูลนับความถี่ และแสดงค่าทันทีออกทางหน้าต่างแสดงผล
- (3) กลับไปยังฟังก์ชัน main





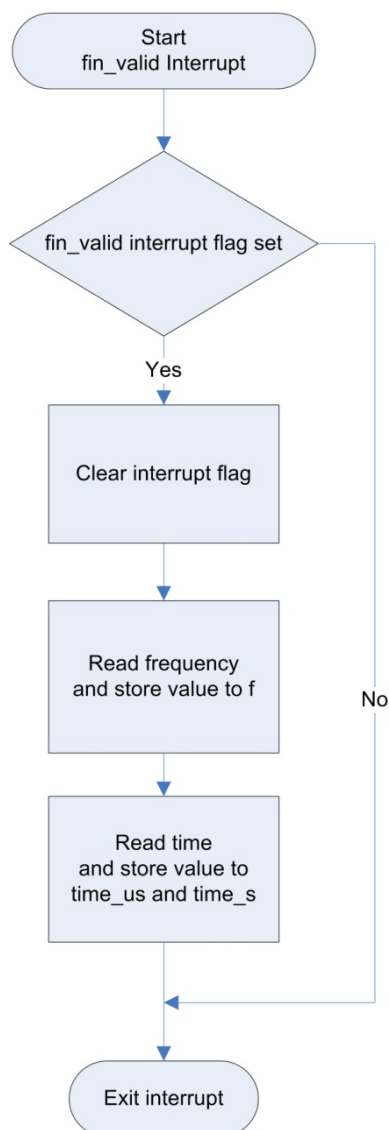
ภาพที่ 3.17 ฝั่งงานของโปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 1

## โปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 2

เป็นวงจรนับความถี่ที่ต้องใช้งานร่วมกับโปรแกรมอ่านค่าการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล เนื่องจากในการแสดงค่าความถี่ออกทางหน้าจอ โปรแกรมต้องอาศัยอินเทอร์รัพต์ AtoD\_ready ในการแสดงค่าโดยแสดงค่าการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่เรียบร้อยแล้วจึงตามด้วยค่าความถี่ มีขั้นตอนการทำงานตามภาพที่ 3.18 ดังนี้

(1) เกิดอินเทอร์รัพต์ชื่อ fin\_valid

- (2) ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าไปทำงานในฟังก์ชันอินเตอร์รัพต์ชื่อ `fin_valid` อ่านค่าความถี่จากโมดูลนับความถี่ และค่าเวลาจากโมดูล `system clock` (เก็บเฉพาะเวลาในหน่วยวินาที) และเก็บค่าไว้ในตัวแปร `time_s` ที่สิ้นสุดอินเตอร์รัพต์
- (3) กลับไปยังฟังก์ชัน `main`



ภาพที่ 3.18 ฟังก์ชันของโปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 2

### 3.3.2 โปรแกรมอ่านค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล

โปรแกรมแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล ทำหน้าที่อ่านค่าจากโมดูลควบคุมการทำงานของไอซีแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล โปรแกรมอ่านค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอก

เป็นดิจิทัลนี้ต้องใช้ร่วมกับวงจอ่านค่าความถี่แบบที่สอง เพราะคำสั่งที่ใช้แสดงค่าความถี่ของ QCM อยู่ในฟังก์ชัน interrupt AtoD\_ready

โปรแกรมอ่านค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลนี้ ประกอบด้วยฟังก์ชันอินเทอร์รัพต์ สองฟังก์ชันคือ

trig\_before เกิดเมื่อถึงจังหวะเวลาที่เหมาะสมในการเริ่มเก็บค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล ฟังก์ชันนี้จะทำหน้าที่เริ่มการทำงานของวงจแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล

AtoD\_ready เกิดเมื่อมีการแปลงข้อมูลแอนาลอกเป็นดิจิทัลเรียบร้อยแล้ว ทำหน้าที่เก็บค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลไปจนกระทั่งครบ 500 ข้อมูล จึงทำการแสดงผลออกทางหน้าจอ มีขั้นตอนการทำงานแสดงดังภาพที่ 3.19 ดังนี้

(1) เกิดอินเทอร์รัพต์ trig\_before ซึ่งทำการตั้งให้เกิดก่อนทำการเปิดวงจของ tristate buffer เป็นเวลา 1.65 มิลลิวินาที เพื่อให้วงจทำการเก็บข้อมูลการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลครบถ้วนตั้งแต่ก่อนเปิดวงจ tri-state buffer ไปจนหลังจากเปิดวงจ tri-state buffer แล้ว เพื่อง่ายต่อการนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าคงตัวเวลา

(2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ข้ามไปทำงานในฟังก์ชัน trig\_before ในฟังก์ชันตั้งค่าให้อินเทอร์รัพต์ AtoD\_ready พร้อมทำงาน และตั้งค่าตัวแปร  $i = 0$

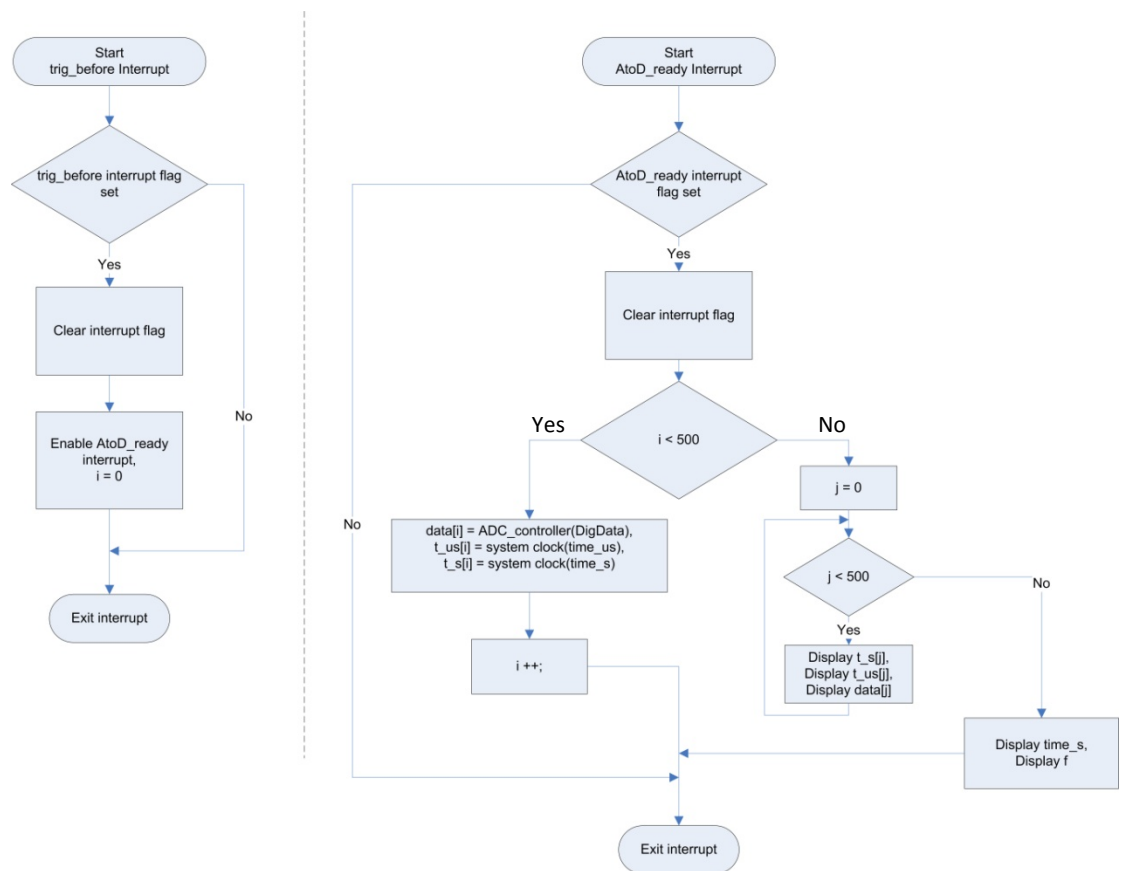
(3) กลับไปยังฟังก์ชัน main

(4) เกิด interrupt AtoD\_ready

(5) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะข้ามไปทำงานในฟังก์ชัน AtoD\_ready ตรวจสอบการนับค่าน้อยกว่า 500 หรือไม่ ถ้าน้อยกว่าให้เก็บค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล และเวลาในหน่วยไมโครวินาทีจากและวินาทีจากวงจนับเวลาระบบ (Counter clk) ไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ data, t\_us และ t\_s ตามลำดับ จากนั้นเพิ่มค่าการนับไปหนึ่งหน่วย แล้วจึงจบการทำงานอินเทอร์รัพต์

ถ้าการนับ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 ให้ทำการแสดงค่าเวลาผ่านตัวแปร t\_s , t\_us และค่าการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลออกผ่านตัวแปร data ออกทางหน้าจอเรียงกันทีละค่า ถัดมาแสดงค่าเวลาและความถี่ที่เก็บไว้ในตัวแปร time\_s และ f จากโปรแกรมอ่านค่าความถี่แบบที่ 2 ออกทางหน้าจอเช่นกัน จึงจบการทำงานอินเทอร์รัพต์

(6) กลับไปยังฟังก์ชัน main



ภาพที่ 3.19 ฟังก์ชันของโปรแกรมโปรแกรมแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล

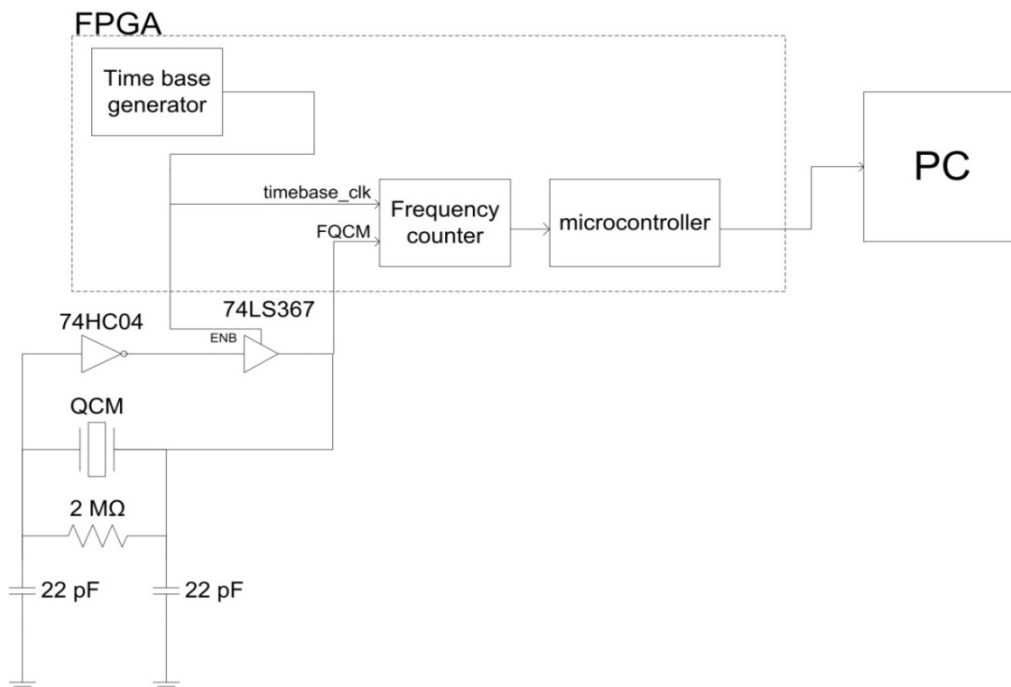
### 3.4 วงจรวัดแบบต่างๆที่ประดิษฐ์ขึ้น

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ปรับปรุงและพัฒนาวงจรวัดขึ้น 4 แบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.1 วงจรวัดแบบที่ 1

เป็นวงจรแบบที่ง่ายที่สุด ประกอบด้วยส่วนประกอบ 4 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3.20 คือ 1. วงจรออสซิลเลเตอร์ 2. วงจรนับความถี่ 3. วงจรฐานเวลา 4. ไมโครคอนโทรลเลอร์

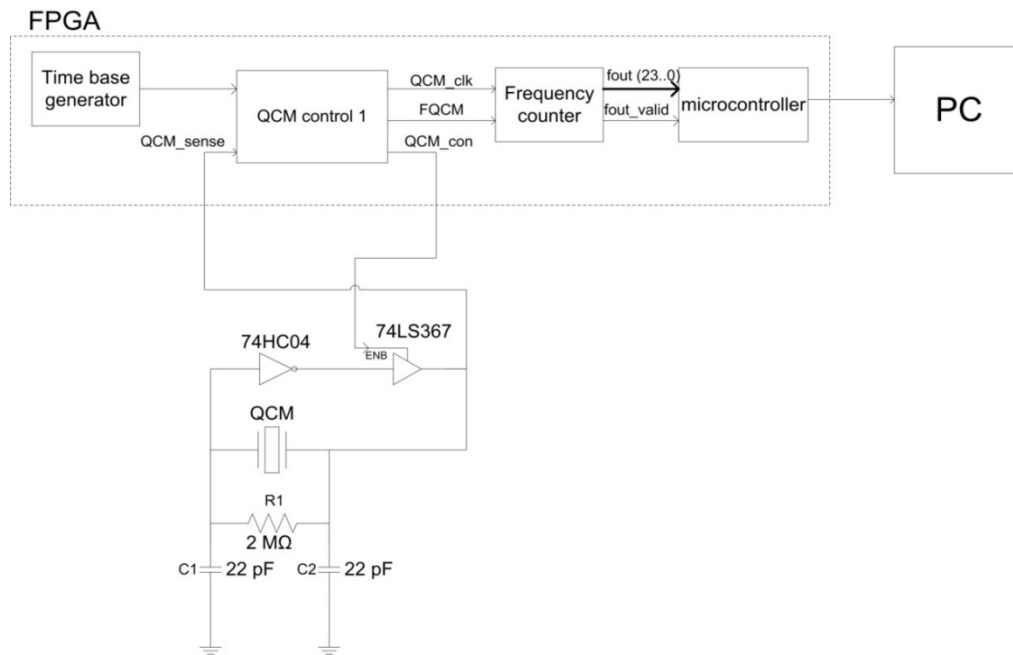
วงจรออสซิลเลเตอร์ หลักการทำงานเป็นดังที่ได้กล่าวไปแล้วโดยในส่วนของอินเวอร์เตอร์ ใช้ ไอซี เบอร์ 74HC04 ส่วนของ Tri-state buffer ใช้ไอซีเบอร์ 74LS367



ภาพที่ 3.20 วงจรวัดแบบที่ 1

#### 3.4.2 วงจรวัดแบบที่ 2

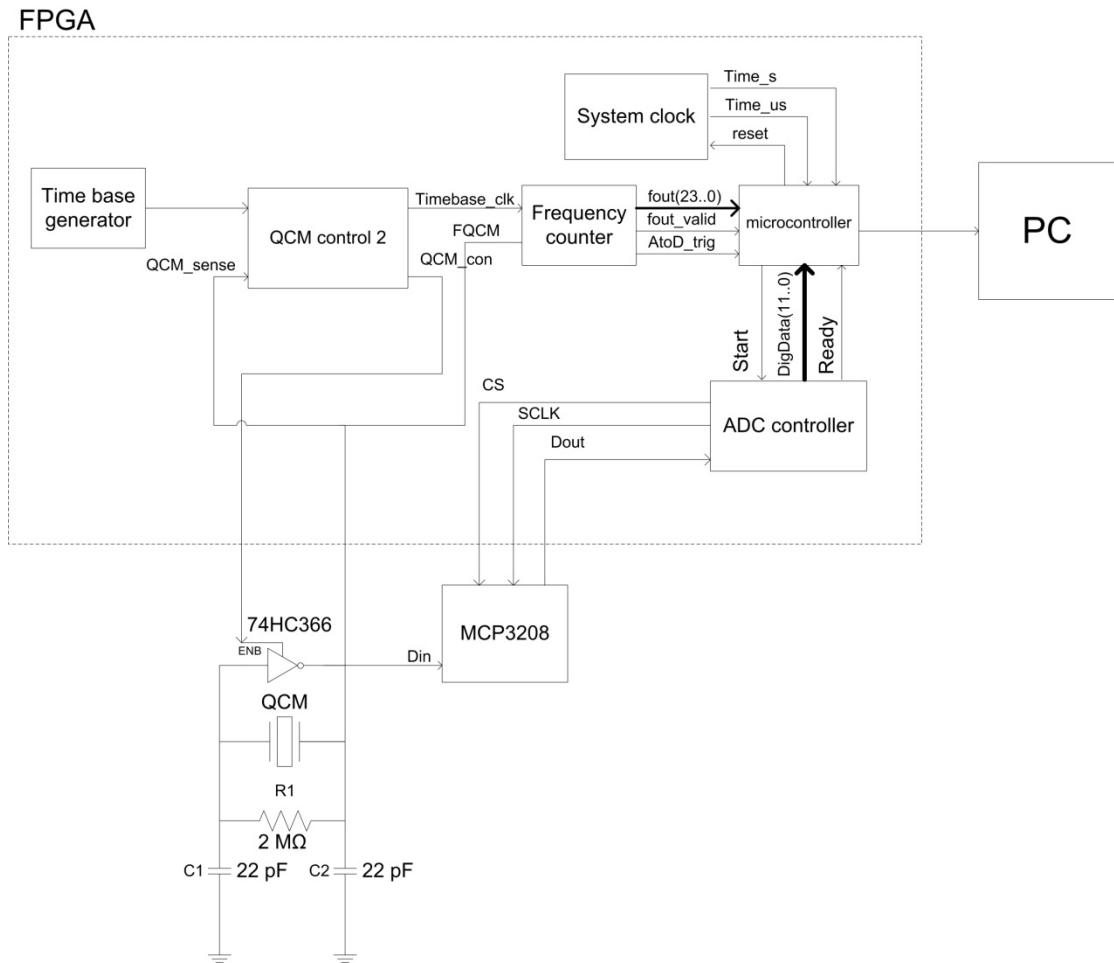
วงจรวัดแบบที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงจากวงจรวัดแบบที่ 1 โดยเพิ่มในส่วนของวงจรควบคุม QCM แบบที่ 1 เข้าไป ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 วงจรวัดแบบที่ 2

### 3.4.3 วงจรวัดแบบที่ 3

วงจรวัดแบบที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงจากวงจรวัดแบบที่ 2 โดยเปลี่ยนมาใช้วงจรรควบคุม QCM แบบที่ 2 และมีการปรับปรุงจุดเชื่อมต่อภายใน FPGA ต่อให้สัญญาณขาออกของวงจรรออสซิลเลเตอร์เข้าไปยังวงจรร F\_count โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านวงจรรควบคุมออสซิลเลเตอร์ดังที่ใช้ในวงจรวัดแบบที่ 2 ซึ่งน่าจะช่วยลดการประวิงเวลา (Time delay) ที่เกิดจากการที่สัญญาณต้องผ่านวงจรรควบคุม QCM ก่อน และมีการปรับเปลี่ยนในส่วนขยายสัญญาณของวงจรรออสซิลเลเตอร์โดยเปลี่ยนมาใช้ Tri-state buffer แบบ Inverted output เป็นการลดจำนวนอุปกรณ์ลงจากเดิมที่ต้องต่อไอซีอินเวอร์เตอร์อนุกรมกับ Tri-state buffer การเปลี่ยนแปลงนี้มีผลดีในแง่ลด time delay ของสัญญาณด้วยซึ่งน่าจะส่งผลที่ดีต่อเสถียรภาพในการสั้นของวงจรรออสซิลเลเตอร์ ดังภาพที่ 3.22

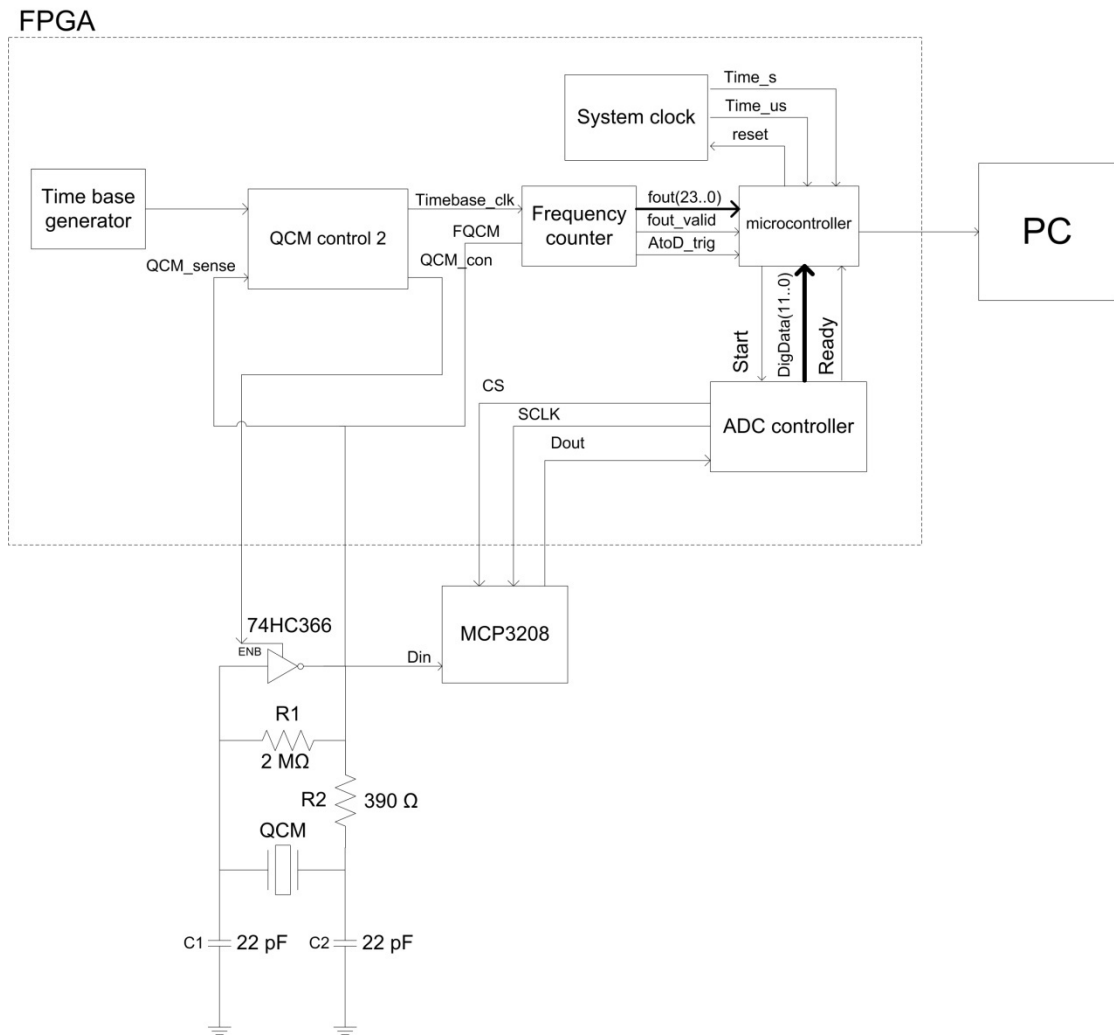


ภาพที่ 3.22 วงจรวัดแบบที่ 3

### 3.4.4 วงจรวัดแบบที่ 4

วงจรวัดแบบที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงจากวงจรวัดแบบที่ 3 ในส่วนของวงจรออสซิลเลเตอร์ เพิ่มในส่วนของความต้านทานอนุกรม  $R_2$  อนุกรมเข้าไปยังขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.23 เพื่อทำหน้าที่ ดังต่อไปนี้

- (1) แยกส่วนของเอาต์พุต ออกจากค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรพายและ QCM
- (2) ทำหน้าที่แบ่งแรงดันระหว่าง  $R_2$  และ  $C_2$  เพื่อลดระดับแรงดันที่ใช้ขับ QCM ลง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดแก่ QCM
- (3) วงจร  $R_2$  และ  $C_2$  ยังทำหน้าที่ให้เกิดความต่างเฟสเพิ่มเติม ลด jitter เพื่อให้เสถียรภาพทางความถี่ดีขึ้น



ภาพที่ 3.23 วงจรวัดแบบที่ 4

ส่วนประกอบของวงจรวัดแบบต่างๆ สรุปดังตารางที่ 3.4



ตารางที่ 3.4 ตารางสรุปส่วนประกอบของวงจรที่ใช้ในแบบต่างๆ

วงจรแบบที่	Hardware			Software	
	Oscillator	QCM control	ADC control	F read	ADC read
1	Not gate + tristate buffer	-	-	F count1	-
2	Not gate + tristate buffer	QCMcon1	-	F count1	-
3	Tri-state buffer inverted output	QCMcon2	ACD control	F count2	ADC
4	Tri-state buffer inverted output + R2	QCMcon2	ADC control	F count2	ADC

### 3.5 การทดสอบและวิเคราะห์ความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น

การทดสอบและวิเคราะห์ความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นการทดสอบความสามารถของวงจรในการอ่านค่าความถี่กำลังและหาค่าคงตัวเวลาจาก QCM ที่ไม่มีโหลด และทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวเวลา เมื่อ โหลดด้วยน้ำ และน้ำตาลกลูโคส ตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

#### 3.5.1 การทดสอบวงจรวัดความถี่ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator)

เพื่อเปรียบเทียบวงจรวัดแต่ละแบบ ได้ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Agilent 33220A) เข้าสู่วงจรวัดค่าความถี่แต่ละแบบ โดยยังไม่ได้ต่อกับวงจรออสซิลเลเตอร์ ทำการป้อน ค่าความถี่ที่ 100, 1k, 10k, 100k, 1M และ 10MHz เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาที ทำซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าความถี่ที่วัดได้ในช่วง 5 นาทีทั้ง 3 ครั้ง มาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด

### 3.5.2 การทดสอบวงจรวัดความถี่ด้วย QCM เปล่า

เพื่อเปรียบเทียบวงจรวัดทั้ง 4 แบบที่มีวงจรรอสซิลเลเตอร์แต่ละแบบเมื่อนำมาใช้ร่วมกับ QCM ตัวเดียวกัน ในการวัดค่าความถี่ได้อ่านค่าความถี่ของ QCM เปล่าเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาที ทำซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าความถี่ที่วัดได้ในช่วง 5 นาทีทั้ง 3 ครั้งมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด

### 3.5.3 การทดสอบวงจรวัด เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ความต้านทานอนุกรมของ วงจรรอสซิลเลเตอร์

เพื่อศึกษาผลของค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมในวงจรรอสซิลเลเตอร์ ต่อการวัดค่าความถี่ กำจรและค่าคงตัวของ QCM ได้ใช้ค่าความต้านทานค่าต่างๆ ต่ออนุกรมทางฝั่งขาออกของวงจรรอสซิลเลเตอร์ โดยใช้ค่าความต้านทานดังนี้ 12, 33, 100, 300, 1,000, 3,000 และ 10,000 โอห์ม อ่านค่าความถี่เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาที และค่าคงตัวเวลาประเมินจากข้อมูล ณ เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วินาที ตามลำดับ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อความถี่ และความต้านทานต่อค่าคงตัวเวลา และประเมินหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

### 3.5.4 การทดสอบค่าความถี่กำจร QCM ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อ

#### ทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ปริมาตรต่างๆ

เพื่อเปรียบเทียบวงจรวัดแต่ละแบบ ได้ศึกษาการตอบสนองของ QCM เมื่อโหลดด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ผิวอิเล็กโทรด โดยใช้หยดน้ำที่มีปริมาตรต่างๆ ดังนี้ 3, 10, 30, 100 ไมโครลิตร เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 นาที ค่าที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน และความชันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้กับปริมาตรน้ำที่หยดลงบนผิวอิเล็กโทรด โดยจะเลือกข้อมูลที่อ่านค่าได้ในช่วงเวลา 2 นาที นำมาวิเคราะห์ ข้อมูลจากวงจรแบบที่ 1 และ 2 ได้จากการอ่านค่ากราฟเมื่อวัดด้วยออสซิลโลสโคป ข้อมูลจากวงจรแบบที่ 3 และ 4 ได้จากวงจร ADC เมื่อได้วงจรแบบที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่สุด จึงนำไปทำการทดสอบในขั้นตอนต่อไป

### 3.5.5 การทดสอบค่าความถี่กำจรและค่าคงตัวของ QCM ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีปริมาตรและความเข้มข้นค่าต่างๆ

เพื่อทดสอบความสามารถของระบบในการตรวจวัดสารตัวอย่างที่มีความหนืดเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลง สารละลายกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ ได้ถูกนำมาทดสอบในขั้นตอนนี้ โดยทำการทดสอบหาปริมาตรของของเหลวที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่กำลังและค่าคงตัวเวลาที่เหมาะสมก่อน ในการวัดได้เลือกใช้วงจรวัดแบบที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่สุดที่ได้จากการทดสอบที่ 3.4.1 เริ่มจากการทดสอบวัดกับน้ำปราศจากไอออนปริมาณต่างๆ ดังนี้ ชุดแรก 0, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2 ไมโครลิตร เมื่อได้ค่าปริมาตรที่เหมาะสมแล้ว จึงทดสอบวงจรวัดด้วยสารละลายน้ำตาลโดยใช้ปริมาตรที่เหมาะสมที่หาได้จากการวัดน้ำปราศจากไอออน ใช้สารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 โดยมีมวล เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 นาที โดยจะเลือกข้อมูลที่อ่านค่าได้ในช่วงเวลา 2 นาที นำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อประเมินความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น

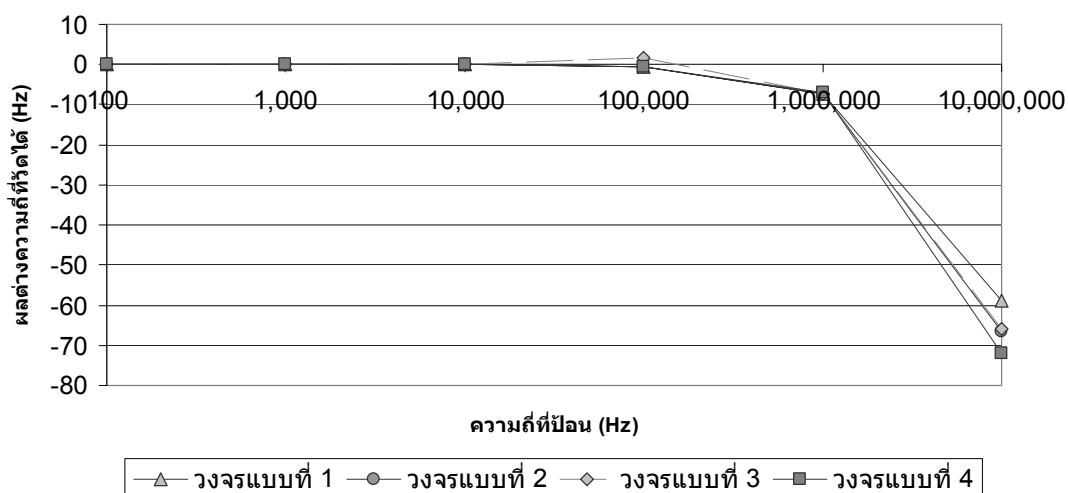
## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลตามขั้นตอนการทดลองและรายละเอียดการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

#### 4.1 การทดสอบวงจรวัดความถี่ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator)

จากการทดสอบวงจรวัดความถี่แบบต่างๆ โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมส่วจรวัดความถี่โดยยังไม่ได้ต่อกับวงจรรอสซิลเลเตอร์ เมื่อป้อนค่าความถี่ที่ต่ำกว่า 1 MHz ให้แก่วงจรทั้ง 4 แบบ พบว่าค่าความถี่ที่วัดได้มีความต่างจากความถี่ที่ป้อนไม่เกิน 2 Hz และเมื่อป้อนค่าความถี่ที่ 1 MHz ให้แก่วงจรทั้ง 4 แบบ พบว่าค่าความต่างของความถี่ที่วัดได้เท่ากับ -7 Hz และเมื่อป้อนค่าความถี่ที่ 10 MHz ซึ่งมีค่าความถี่ใกล้เคียงกับ QCM ที่ใช้งานจริง (ความถี่ QCM ที่ใช้งานมีค่าประมาณ 12 MHz) พบว่าค่าความต่างของความถี่ที่วัดได้มีค่าประมาณ -65 Hz (แสดงในภาพที่ 4.1)



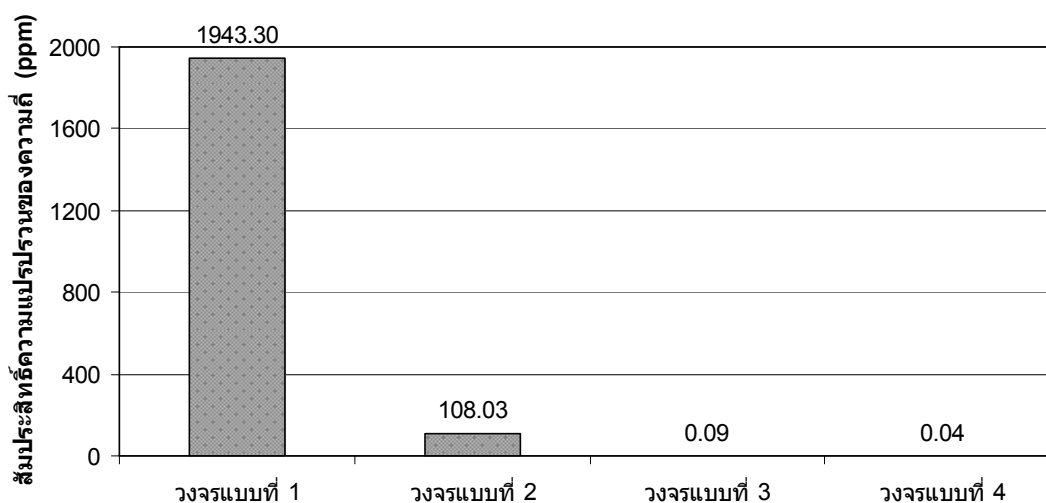
ภาพที่ 4.1 ค่าผลต่างของความถี่ที่วัดได้ในวงจรแต่ละแบบ

เนื่องจากการวัดค่าความถี่ของวงจรที่พัฒนาขึ้นมานี้ ใช้การนับขอบขาขึ้นของสัญญาณที่เข้ามายังวงจรวัดความถี่ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด ถ้าขอบขาขึ้นของสัญญาณที่ต้องการวัดเกิดขึ้นก่อนขอบขาขึ้นของสัญญาณเกท จะมีผลทำให้การนับความถี่จะขาดไป 1 จำนวนลูกสัญญาณ ในการวัดค่าความถี่จึงมีความผิดพลาดที่ 1 จำนวนลูกสัญญาณสัญญาณ เช่นถ้ากำหนดระยะเวลาในการวัดความถี่ 1 s ค่าความผิดพลาดของความถี่มีค่า 1 Hz

จากผลการทดสอบในภาพที่ 4.1 เมื่อค่าความถี่ที่วัดมีค่าตั้งแต่ 1,000,000 Hz ขึ้นไป พบว่าการวัดค่าความถี่มีค่าแตกต่างจากสัญญาณที่ป้อนมากกว่า 1 Hz โดยมีค่าที่อ่านได้น้อยกว่าค่าความถี่ที่ป้อนจริง ความผิดพลาดนี้คาดว่าเป็นผลมาจากระยะเวลาที่ใช้นับความถี่ไม่เป็น 1 วินาทีพอดี เนื่องมาจากความถี่หลักจากออสซิลเลเตอร์ที่ป้อนแก่ FPGA ไม่ได้มีค่าตรงตามที่ระบุไว้ เมื่อทำการหารความถี่ลงมาเพื่อใช้ในการกำหนดระยะเวลา นับความถี่ของวงจรวัดความถี่ ระยะเวลาเปิดเกทจึงมีความผิดพลาด จากผลการทดลองพบว่าค่าความถี่ที่วัดได้เมื่อป้อนความถี่ 1 MHz มีค่าประมาณ -7 Hz หรือ 7 ลูกสัญญาณ ซึ่งคิดเป็นเวลาได้ประมาณ 7  $\mu$ s ในขณะที่ค่าความถี่ที่วัดได้เมื่อป้อนความถี่ 10 MHz มีค่าประมาณ -65 Hz หรือ 65 ลูกสัญญาณ ซึ่งคิดเป็นเวลาได้ประมาณ 6.5  $\mu$ s จากตัวเลขทั้งสองจึงประมาณได้ว่าเวลาในการเปิดเกทนั้นน้อยกว่าเวลาที่ต้องการจริงประมาณ 6-7  $\mu$ s หรือกล่าวคือสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการเปิดเกทไม่ใช่ 1 s แต่เป็นประมาณ 999,993  $\mu$ s เวลาการเปิดเกทที่น้อยกว่าค่าจริงประมาณ 7  $\mu$ s นี้ น้อยกว่า 10  $\mu$ s จึงไม่ส่งผลต่อการวัดสัญญาณที่ต่ำกว่า 1 MHz ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ แนวทางแก้ อาจทำได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการนับความถี่ให้นานขึ้นอีกประมาณ 7  $\mu$ s ค่าความแตกต่างก็จะน้อยลง

## 4.2 การทดสอบวงจรวัดความถี่ด้วย QCM เปล่า

จากการทดสอบวงจรแบบต่างๆ ในการวัดความถี่ของ QCM ที่มีค่าความถี่กำหนด 12 MHz พบว่าวงจรแบบที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนสูงที่สุด คือ 1943 ppm โดยวงจรแบบที่ 3 และวงจรแบบที่ 4 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่ต่ำมาก โดยมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.09 และ 0.04 ppm ตามลำดับ (แสดงในภาพที่ 4.2)



ภาพที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเมื่อเทียบกับความถี่ของ QCM

จากผลการทดสอบพบว่า สองวงจรแรกให้ค่าความแปรปรวนของการวัดที่สูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ามีสาเหตุมาจากการที่ไม่ปล่อยให้ QCM เข้าสู่การสั่นที่คงตัว (Steady state) ก่อนที่จะเริ่มวัด กล่าวคือทั้งสองวงจรนี้นับความถี่ทันทีเมื่อจ่ายไฟเลี้ยงแก่ QCM ไม่ได้รอให้ QCM สั่นจนถึงจุดเสถียรก่อนจึงทำให้มีความแปรปรวนของความถี่ที่วัดได้มีค่าสูง

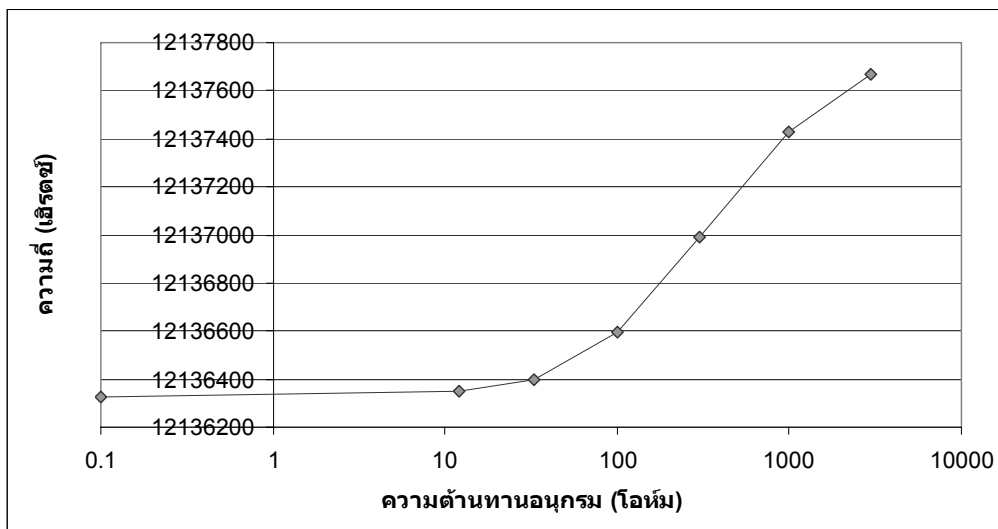
ในขณะที่ วงจรที่ 3 และ 4 ถูกออกแบบให้ QCM สั่นก่อนเป็นระยะเวลา 1 วินาที จากนั้นจึงเริ่มนับความถี่ ผลที่ได้พบว่ามีค่าความแปรปรวนต่ำลงมาก โดยในวงจรแบบที่ 3 มีค่าแตกต่างกันที่ 1 Hz และวงจรแบบที่ 4 มีค่าแตกต่างกันที่ 0.5 Hz ค่าที่วัดได้จากทั้งสองวงจรนี้มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกันในเชิงหลักการเนื่องจากวงจรนับความถี่ของวงจรที่ 3 และ 4 ใช้วงจรวัดเดียวกัน แตกต่างเพียงส่วนของวงจรออสซิลเลเตอร์

โดยสรุปสามารถกล่าวได้ว่าวงจรแบบที่ 3 และ 4 มีความแม่นยำในการอ่านความถี่ของ QCM ที่มากกว่า วงจรแบบที่ 1 และ 2 โดยไม่มีความแตกต่างกันในการอ่านค่าความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ

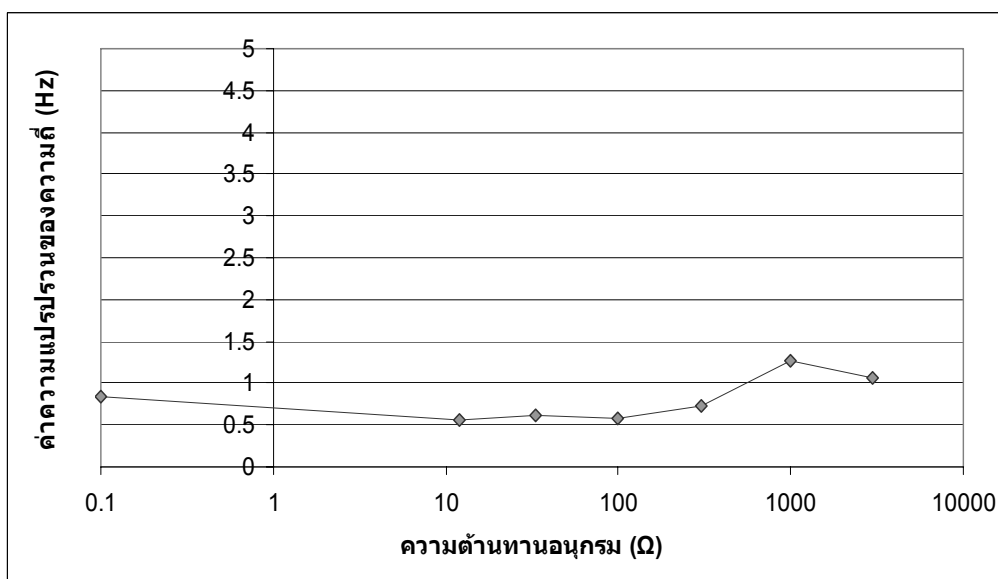
#### 4.3 การทดสอบวงจรวัด เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ความต้านทานอนุกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์

จากการทดสอบวงจรวัดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยวัดค่าความถี่ที่จรและค่าคงตัวของ QCM ตัวเดียวกันกับการทดสอบที่ 4.2 ได้ผลดังภาพที่ 4.3 และ 4.5 ตามลำดับ พบว่าค่าความแปรปรวนของความถี่มีค่าไม่เกิน 1.5 Hz (แสดงในภาพที่ 4.4) เพื่อให้การแสดงค่าบนมาตราส่วนลอการิทึมเป็นไปได้ ที่ค่าความต้านทาน  $0 \Omega$  จะแสดงเป็นค่า

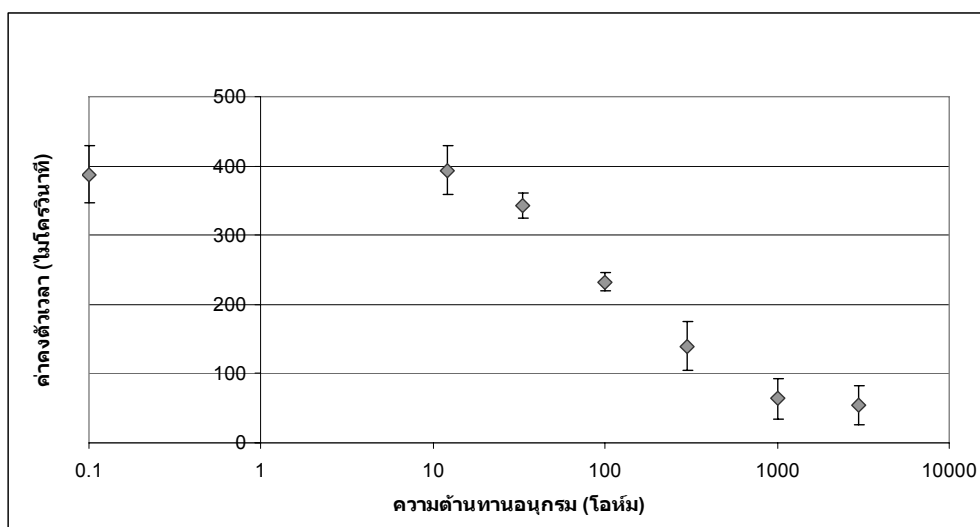
ความต้านทานที่  $0.1 \Omega$  นอกจากนี้เมื่อต่อตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทาน  $10 \text{ k}\Omega$  เข้าไปในวงจร ออสซิลเลเตอร์พบว่าวงจรไม่เกิดการสั่น จึงไม่มีค่านำมาแสดงในภาพที่ 4.3 ถึง 4.5



ภาพที่ 4.3 ค่าความถี่ของ QCM ที่ค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างๆ



ภาพที่ 4.4 ค่าความแปรปรวนของความถี่ที่ค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างๆ



ภาพที่ 4.5 ค่าคงตัวเวลาของ QCM ที่ค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างๆ

จากภาพที่ 4.3 พบว่าในการวัดความถี่ เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมในวงจร ออสซิลเลเตอร์ขึ้นเรื่อยๆ ค่าความถี่ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น จากการสังเกตพบว่ารูป สัญญาณของการสั่นเปลี่ยนแปลงไป โดยมีความเพี้ยน (distortion) เพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลให้การนับ ผิดพลาดมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานที่สูงกว่า 10 k $\Omega$  ก็ไม่สามารถวัดความถี่ได้เนื่องจาก แอมพลิจูดของการสั่นต่ำเกินไป ซึ่งเปรียบเสมือนว่าวงจรหยุดสั่น

ในการวัดค่าคงตัวเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความต้านทานสูงขึ้น ค่าคงตัวเวลาของระบบจะ ลดลงเรื่อยๆ และเริ่มคงที่ที่ค่าประมาณ 50  $\mu\text{s}$  จากขีดจำกัดของความถี่การซัดตัวอย่างของวงจร ADC ที่มีค่าประมาณ 10  $\mu\text{s}$  การวัดค่าคงตัวเวลาที่ต่ำในระดับ 20-50  $\mu\text{s}$  จึงทำได้ยาก

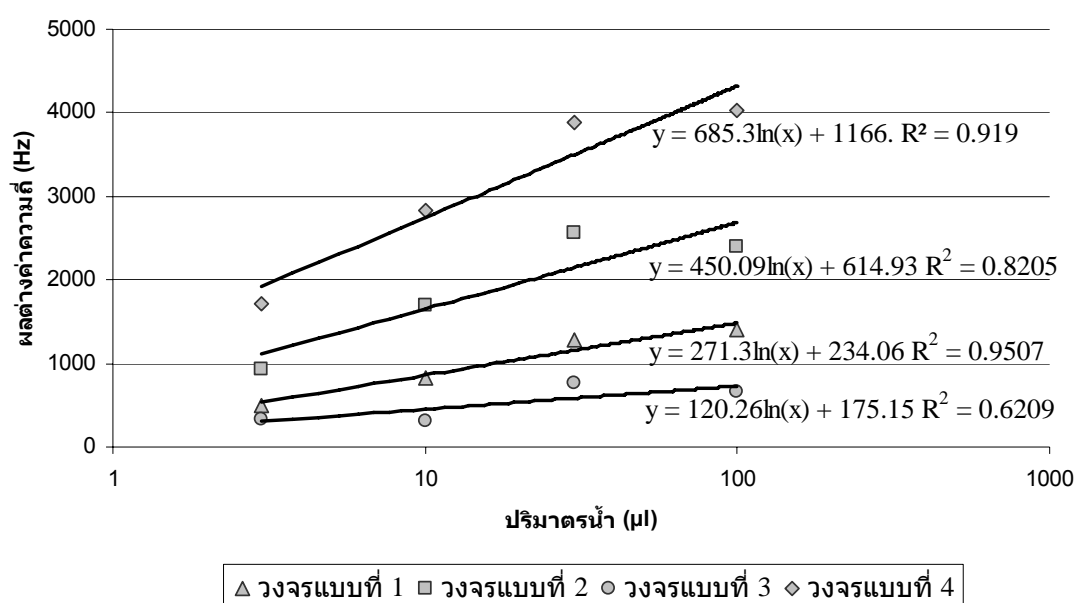
การที่ต่อค่าความต้านทานสูงขึ้น ทำให้ค่าคงตัวเวลามีค่าลดลง นั้นสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องมาจากพลังงานสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น ตามค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่เพิ่มเข้าไป

เนื่องจากที่ค่าความต้านทานต่ำๆ ค่าคงตัวเวลาที่วัดได้มีค่ามาก จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ งานเพราะทำให้มีช่วงค่าคงตัวเวลาที่อ่านได้มาก จากการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความ แปรปรวน (CV) มีค่าต่ำสุดที่ 5% เมื่อใช้ค่าความต้านทานที่ 33 โอห์ม

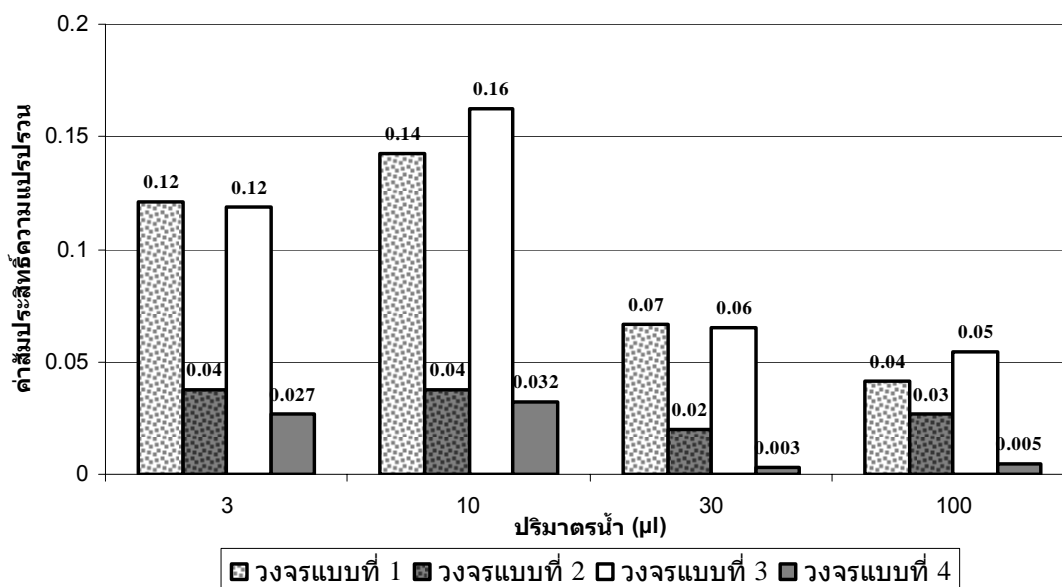


#### 4.4 การทดสอบค่าความถี่กัมมา QCM ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อ ทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่ปริมาตรต่างๆ

จากการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อยืนยันผลของการนำเครื่องไปใช้ตรวจวัดของเหลว จึงทำการสอบระบบวัดนี้ด้วยน้ำที่มีปริมาตร 3, 10, 30 และ 100  $\mu\text{L}$  เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจรวัดทั้ง 4 แบบ ได้ผลดังภาพที่ 4.6 เมื่อทำการเทียบด้วยฟังก์ชันลอการิทึม วงจรวัดแบบที่ 4 มีค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อมวลมากที่สุด กล่าวคือมีความไวมากที่สุด โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันลอการิทึม จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าระบบวัดแบบที่ 4 มีความเหมาะสมในการวัดความถี่มากที่สุด โดยวงจรวัดแบบที่ 3 มีความเหมาะสมในการวัดความถี่น้อยที่สุด นอกจากนี้เมื่อนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยของความถี่มาทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน พบว่า วงจรวัดแบบที่ 4 มีความเหมาะสมในการใช้งานวัดความถี่มากที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงที่ปริมาตรน้ำ 3 และ 100  $\mu\text{L}$  อยู่ที่ 0.027 และ 0.005 ตามลำดับ ในการใช้งานจริงวงจรวัดแบบที่ 3 และแบบที่ 4 มีความสะดวกในการใช้งานกว่าวงจรวัดแบบที่ 1 และ 2 มาก เนื่องจากมีส่วนวงจรวัดสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อใช้ในการรับค่าสัญญาณที่ลดลงของ QCM และส่งข้อมูลไปแสดงผลโดยตรงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องออสซิลโลสโคป ในการทดสอบถัดไปได้เลือกวงจรวัดแบบที่ 3 และ 4 ในการทดสอบกับสารละลายน้ำตาลกลูโคส



ภาพที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วงจรวัดแต่ละแบบด้วยน้ำที่มีปริมาตรต่างกัน



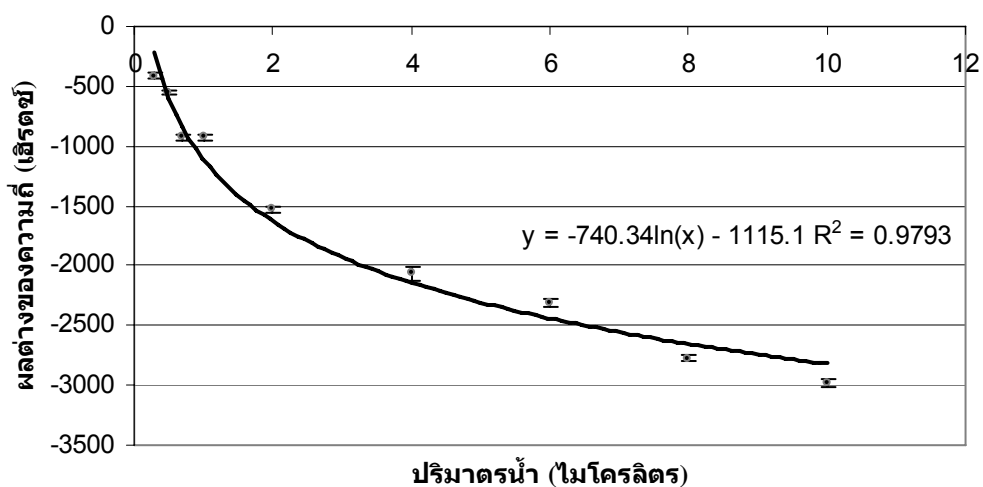
ภาพที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของความถี่ของวงจรแต่ละแบบด้วยน้ำที่มีปริมาตรต่างกัน

#### 4.5 การทดสอบค่าความถี่ค่าธรรมชาติและค่าคงตัวของ QCM ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีปริมาตรและความเข้มข้นค่าต่างๆ

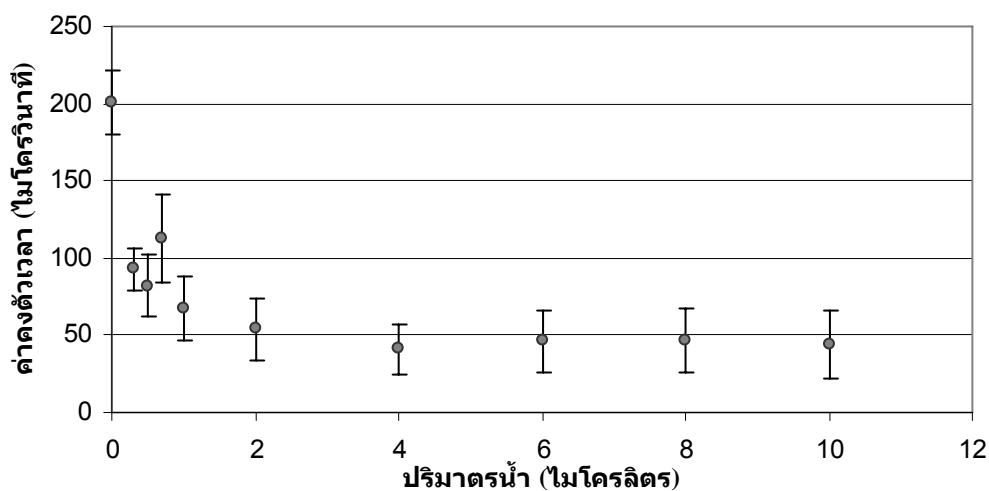
ผลการทดสอบวงจรแบบที่ 4 ด้วยน้ำที่มีปริมาตร 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2, 4, 6, 8 และ 10  $\mu\text{L}$  เพื่อหาค่าปริมาตรที่เหมาะสมสำหรับนำไปทดสอบการหดยสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้นค่าต่างๆ จากการทดสอบที่ 4.2 ภาพที่ 4.4 พบว่าวงจรวัดแบบที่ 4 มีค่าความแปรปรวนของความถี่ที่น้อยที่สุด จึงเลือกนำมาทดสอบหาค่าคงตัวเวลา ได้ผลค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงและคงตัวเวลาที่วัดได้ดังภาพที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงของความถี่มีค่าเปลี่ยนแปลงมากในช่วง 0 ถึง 2  $\mu\text{L}$  เมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อยลง เมื่อนำมาเทียบเส้นโค้งมาตรฐานลอการิทึม ได้ค่าสมการดังที่ปรากฏในกราฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficient of determination) ที่ 0.979

นอกจากนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0 ถึง 2  $\mu\text{L}$  โดยค่าคงตัวเวลาของ QCM ตัวเปล่า อยู่ที่ 200  $\mu\text{s}$  และลดลงเหลือ 93  $\mu\text{s}$  เมื่อหยดน้ำปริมาตร 0.3  $\mu\text{L}$  คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงลดลง  $(93-200)/200 \times 100\% = -107\%$  โดยปริมาตรน้ำที่มากกว่า 2  $\mu\text{L}$  ขึ้นไป ค่าคงตัวเวลาเริ่มอิมิตัวที่ประมาณ 45  $\mu\text{s}$  เพื่อให้ได้ค่าความไวในการวัดที่สูงที่สุดจึงเลือกปริมาตรที่จะใช้ทดสอบสารละลายน้ำตาลต่อไปที่ 0.3  $\mu\text{L}$



ภาพที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อใช้วงจรวัดแบบที่ 4 ด้วยน้ำที่มีปริมาณต่างกัน



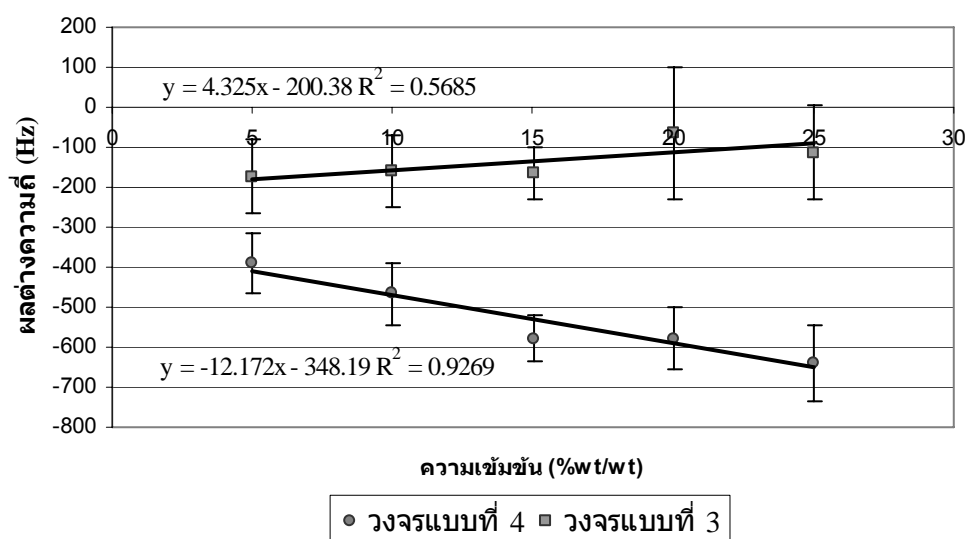
ภาพที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาวงจรวัดแบบที่ 4 ด้วยน้ำที่มีปริมาณต่างกัน

เมื่อทดสอบวงจรวัดแบบที่ 3 และแบบที่ 4 โดยเลือกใช้ค่าปริมาตรของสารละลายน้ำตาลที่ 0.3  $\mu\text{L}$  ทำการทดสอบด้วยสารละลายน้ำตาลค่าความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 โดยมวล ได้ผลค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงและคงตัวเวลาที่วัดได้ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

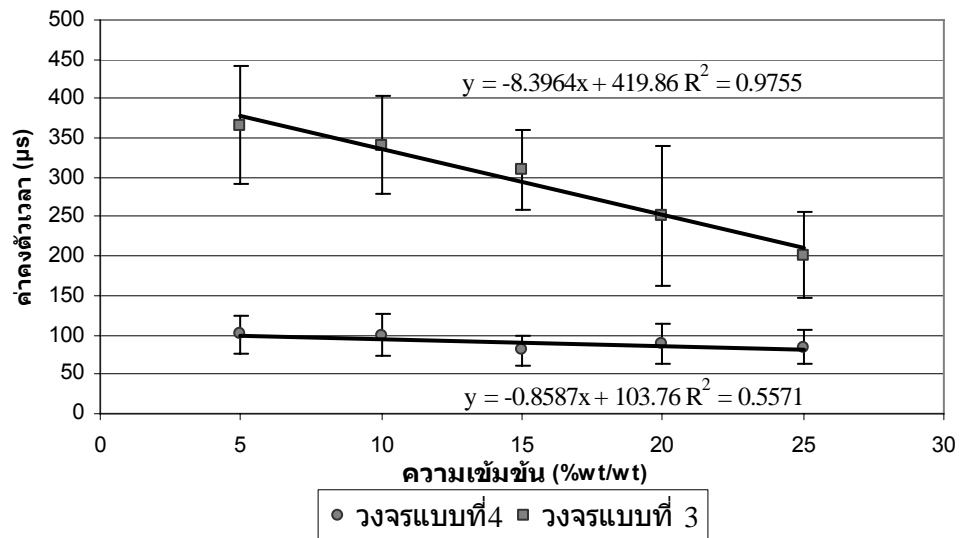
จากภาพที่ 4.10 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อหยดด้วยสารละลายน้ำตาล วงจรวัดแบบที่ 4 ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่าลดลงตามค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเทียบกราฟเส้นตรงจะได้ค่าความชันที่  $-12.2 \text{ Hz}/\% \text{glucose}$  และมีค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.93 กรณีวงจรวัดแบบที่ 3 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยไม่สอดคล้องกับทางทฤษฎี ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้ อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่าวงจรวัดแบบที่ 4 ให้ผลการวัดค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่า

จากภาพที่ 4.11 ทั้งวงจรแบบที่ 3 และ 4 ให้ค่าคงตัวเวลาที่ลดลงแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเทียบสมการเส้นตรงมาตรฐาน พบว่าวงจรวัดแบบที่ 3 มีค่าความชันอยู่ที่  $-8.34 \mu\text{s}/\% \text{glucose}$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.98 ในขณะที่วงจรวัดแบบที่ 4 มีค่าความชันอยู่ที่  $-0.86 \mu\text{s}/\% \text{glucose}$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.56 จึงอาจกล่าวได้ว่าวงจรวัดแบบที่ 3 มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวงจรถ้าค่าคงตัวเวลามากที่สุด เนื่องจากมีค่าความไวในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายมากที่สุด โดยพิจารณาได้จากความชันของกราฟ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีกว่าวงจรวัดแบบที่ 4



ภาพที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อใช้วงจรวัดแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 ด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีค่าความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาของวงจรวัดแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 ด้วยสารละลาย น้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้นต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปงานวิจัยและผลการทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาระบบวัดค่าความถี่และค่าคงตัวเวลาสำหรับตัวตรวจวัด QCM และทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลของวงจรแต่ละแบบ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการทดสอบวงจรวัดความถี่ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ค่าต่างๆ พบว่ามีความผิดพลาดในการวัดความถี่เกิดขึ้นเนื่องจากเวลาในการเปิดเกตน้อยกว่าค่า 1 s ที่กำหนดไว้เป็นเวลาประมาณ 65  $\mu$ s

5.1.2 ผลการทดสอบวงจรวัดความถี่ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาด้วย QCM ที่มีค่าความถี่กัทรประมาณ 12 MHz พบว่าวงจรแบบที่ 3 และแบบที่ 4 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่ดี มีค่าไม่เกิน 0.1 ppm

5.1.3 ผลการทดสอบวงจรวัดเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์ พบว่าค่าความถี่กัทรเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าคงตัวเวลามีค่าลดลง ค่าความแปรปรวนของความถี่มีค่าไม่เกิน 1.5 Hz และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (CV) ของค่าคงตัวเวลามีค่าต่ำสุดที่ 5% เมื่อใช้ค่าความต้านทานที่ 33  $\Omega$

5.1.4 ได้ทดสอบระบบวัดนี้ด้วยน้ำที่ปริมาตร 3, 10, 30 และ 100  $\mu$ L เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของวงจรทั้ง 4 แบบพบว่าวงจรวัดแบบที่ 4 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.003 ที่ปริมาตรน้ำ 30  $\mu$ L

5.1.5 เมื่อทำการทดสอบความสามารถของระบบที่ประดิษฐ์ขึ้น ในการหาค่าความถี่กัทรและหาค่าคงตัวเวลาด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคสปริมาตร 0.3  $\mu$ L ที่มีค่าความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยมวล ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่กัทรที่ดีที่สุดจากวงจรวัดแบบที่ 4 โดยมีค่าความไวที่ -12.17 Hz/%glucose และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.93 และได้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาที่ดีที่สุดจากวงจรแบบที่ 3 ได้ค่าความไวที่ -8.40  $\mu$ s/%glucose และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.98

5.1.6 ข้อดีและข้อเสียในวงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อดี

- 1) การใช้ FPGA ในการออกแบบวงจรจึงทำให้ได้ความเร็วในการประมวลผลที่สูงสามารถประมวลผลโดยใช้วงจรลอจิกภายในได้ ซึ่งทำให้สะดวกต่อการพัฒนา

- 2) สามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดสารปริมาณน้อยได้ดีเพราะมีความไวการวัดที่สูงโดย ในกรณีหยดสารบนผิว QCM เปล่า ที่เป็นของเหลว พบว่ามีการตอบสนองที่ดีที่ปริมาตร 0.3 - 2  $\mu\text{L}$
- 3) สามารถนำค่าคงตัวเวลาและความถี่การไปใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างได้

### ข้อเสีย

- 1) มีขีดจำกัดของคาบการชั่งตัวอย่าง ของวงจร ADC ที่ใช้มีค่าประมาณ 10  $\mu\text{s}$  อันเป็นผลของความเร็วในการแปลงสัญญาณของไอซีแปลงสัญญาณจากแอนาลอกเป็นดิจิตอล ทำให้ไม่สามารถวัดค่าคงตัวเวลาที่ต่ำกว่า 10  $\mu\text{s}$  ได้

จากข้อสรุปดังกล่าว ระบบที่พัฒนานี้สามารถนำไปพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องจากการออกแบบและเพิ่มเติมอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ระบบนี้อาจสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สารละลายหรือสารชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากขีดจำกัดของคาบการชั่งตัวอย่างของไอซีแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลที่ 10  $\mu\text{s}$  ในขณะที่ระบบนี้ใช้ FPGA จึงสามารถประมวลผลที่เร็ว สามารถประมวลผลโดยใช้วงจรลอจิกภายในได้ ซึ่งทำให้ภาพรวมการพัฒนาสามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ตามนี้

5.2.1 เพิ่มความถี่การชั่งตัวอย่าง เพื่อให้ขอบเขตของค่าต่ำสุดที่วัดได้มีค่าลดลง ใช้วงจรจับค่ายอดของสัญญาณเพื่อนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ได้สะดวกขึ้น

5.2.2 พัฒนาให้ระบบสามารถคำนวณค่าคงตัวเวลาได้ภายในตัวเองโดยไม่ต้องผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์

5.2.3 เพิ่มช่องสัญญาณในการวัดให้สามารถใช้งาน QCM ได้หลายตัวพร้อมกัน

5.2.4 พัฒนาให้สามารถบันทึกข้อมูลที่ได้เป็นเท็กซ์ไฟล์หรือไฟล์อื่นๆซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลได้ทันที

5.2.5 ปรับปรุงการส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์และ การจัดการข้อมูลให้ง่ายต่อการใช้งานมากขึ้นเนื่องจาก ในปัจจุบันแสดงผลเฉพาะค่าทางตัวเลขผ่านทางหน้าจอแสดงผล ของโปรแกรม Nios2 11.1 Software Build Tools for Eclipse ผู้ใช้งานทั่วไปอาจเกิดความสับสนได้

## รายการอ้างอิง

- [1] Janshoff, Andreas, Galla, Hans-Joachim and Steinem, Claudia. Piezoelectric mass-sensing devices as biosensors—an alternative to optical biosensors?, Angewandte Chemie International Edition 39 (2000): 4004-4032.
- [2] G. Sauerbrey. Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung. Zeitschrift für Physik 155 (1959): 206-222.
- [3] Kanazawa, K. Keiji and Gordon, Joseph G., Frequency of a quartz microbalance in contact with liquid. Analytical Chemistry 57 (1985): 1770-1771.
- [4] Aizawa, H., Kurosawa, S., Tozuka, M., Park, J. W. and Kobayashi, K., Rapid detection of fibrinogen and fibrin degradation products using a smart QCM-sensor. Sensors and Actuators B-Chemical 101 (2004): 150-154.
- [5] Hook, F., et al., The dissipative QCM-D technique: Interfacial phenomena and sensor applications for proteins, biomembranes, living cells and polymers. Frequency and Time Forum, 1999 and the IEEE International Frequency Control Symposium, 1999., Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European 2 (1999): 966-972 vol.962.
- [6] Fohlerova, Z., Skladal, P. and Turanek, J., Adhesion of eukaryotic cell lines on the gold surface modified with extracellular matrix proteins monitored by the piezoelectric sensor. Biosensors and Bioelectronics 22 (2007): 1896-1901.
- [7] Rodahl, M., Hook, F., Krozer, A., Brzezinski, P. and Kasemo, B., Quartz crystal microbalance setup for frequency and q factor measurements in gaseous and liquid environments. Review of Scientific Instruments 66, 7 (1995): 3924-3930.
- [8] Nakamoto, T. and Kobayashi, T., Development of circuit for measuring both q variation and resonant frequency shift of quartz crystal microbalance. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on 41 (1994): 806-811.
- [9] Ferrari, V., Marioli, D. and Taroni, A., Acc oscillator for in-liquid quartz microbalance sensors. Sensors, 2003. Proceedings of IEEE 2 (2003): 849-854.
- [10] Avramov, I. D., A 0-phase circuit for QCM-based measurements in highly viscous liquid environments. Sensors Journal, IEEE 5 (2005): 425-432.



- [11] Valdes, M. D., Villares, I., Farina, J. and Moure, M. J., A FPGA-based frequency measurement system for high-accuracy QCM sensors. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE (2008): 1707-1712.
- [12] Dewar, Richard J., Ash, Dean C., German, Matthew J. and Joyce, Malcolm J., Practical considerations of the QCM as a viscometer within the food industry: Performance deterioration with repeated use and surface roughness. Journal of Food Engineering 75 (2006): 461-468
- [13] Schroder, Jens, Borngraber, Ralf, Eichelbaum, Frank and Hauptmann, Peter. Advanced interface electronics and methods for qcm. Sensors and Actuators A: Physical 97-98 (2002): 543-547.

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศวิษฐ์ ฌ สงขลา เกิดวันที่ 2 ตุลาคม 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553

### ทุนที่ได้รับ

ทุนจากบริษัทโตชิบ้าประเทศไทย เพื่อไปฝึกงานที่ Toshiba Fuchu complex เมืองโตเกียว ประเทศไทยในปี 2553

### ผลงานที่นำเสนอ

ศวิษฐ์ ฌ สงขลา และมานะ ศรียุทธศักดิ์ การวัดค่า Q ของตัวตรวจวัด QCM การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34 (EECON 34) ฉบับที่ 2 ปีที่ตีพิมพ์ 2554 หน้า 885 - 888