

เครื่องวัดกลิ่นโดยใช้ FPGA และ QCM เป็นเซ็นเซอร์
ODOR SENSING SYSTEM USING FPGA AND QCM SENSOR



ปรีชญานันท์ พงษ์นันทน์ และ นงนุช นงนุช จาก กองการศึกษาระดับมัธยมศึกษา ปรีชญานันท์ นงนุช นงนุช
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

เครื่องวัดกลิ่นโดยใช้ FPGA และ QCM เซ็นเซอร์

ODOR SENSING SYSTEM USING FPGA AND QCM SENSOR

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


พ.ศ.2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์	พ.ศ. 2557
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
หัวข้อปริญญาานิพนธ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เครื่องวัดกลิ่นโดยใช้ FPGA และ QCM เซ็นเซอร์ ODOR SENSING SYSTEM USING FPGA AND QCM SENSOR
ผู้จัดทำ	นายปฏิภาณ เวทยานัจฉมัย รหัสประจำตัว 54010758 นายเอนก ผมหอม รหัสประจำตัว 54011583

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว




(ดร.ยศศิริ อาริยะกุล)
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องวัดกลิ่นโดยใช้ FPGA และ QCM เซ็นเซอร์
นักศึกษา	นายปฏิภาณ เวทยานาวังจรรย์ รหัสประจำตัว 54010758
	นายเอนก ผมหอม รหัสประจำตัว 54011583
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ดร.ยศศิริ อาริยะกุล

บทคัดย่อ

การรับรู้กลิ่นมีความสำคัญเนื่องจากสามารถบอกได้ถึงสภาพของสิ่งแวดล้อมรอบๆตัวมนุษย์ เช่น บอกถึงอันตรายจากกลิ่นที่ผิดปกติ หรือบอกถึงคุณภาพของอาหารที่มนุษย์จะรับประทาน อย่างไรก็ตามการรับรู้กลิ่นของมนุษย์นั้นมีข้อจำกัด เนื่องจากแปรผันไปตาม วัย เพศ สุขภาพ และ ประสบการณ์ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ ในโครงการนี้จะทำการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดระดับความเข้มข้นของกลิ่นโดยใช้ QCM (Quartz crystal microbalance) เซ็นเซอร์ เพื่อให้สามารถวัดกลิ่นได้ในเชิงตัวเลข โดยใช้หลักการที่ความถี่เรโซแนนซ์ของ QCM เซ็นเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำหนักของโมเลกุลของกลิ่นที่สัมผัสตัวเซ็นเซอร์ โดยจะสร้างวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal ซึ่งมีความละเอียดสูงทั้งในเชิงเวลาและเชิงความถี่ ลงบน FPGA (Field programmable gate array) ซึ่งความถี่ที่วัดได้นั้นสามารถถูกแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของกลิ่นที่ทำการวัดได้อยู่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Odor sensing system using FPGA and QCM sensor
Student	Mr. Patiparn Voeiyawatjamai Student ID 54010758
	Mr. Anek Pomhom Student ID 54011583
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Dr. Yossiri Ariyakul

ABSTRACT

Sense of smell is important because it informs information of the environment around us. For example, some unusual odors imply dangers or some specific odors imply the quality of the food that we eat. However, human sense of smell has limitations since it depends on age, gender, health, experience, and etc. Thus an electronic device for measuring odor concentration using QCM (Quartz crystal microbalance) sensor was developed in this project. Due to the fact that the resonant frequency of a QCM sensor varies in accordance with the weight of the odor molecules adsorbing on the sensor surface, the frequency shift can be converted into the change of measured odor intensity. A reciprocal frequency counter which can realize both high temporal resolution and frequency resolution was implemented on an FPGA (Field programmable gate array) board to measure the frequency shift.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ศศิรี อาริยะกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงาน อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการเรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

ปริญญาน เวชชาชีวะ

ปริญญาน เวชชาชีวะ

Conr

เอนก ผมหอม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และความมุ่งหมายของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
บทที่ 2.....	3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับกลิ่น.....	3
2.1.1 Lucretius's philosophy.....	3
2.1.2 Wright's vibrational theory.....	3
2.1.3 Amoore's stereochemical theory.....	5
2.1.4 Turin's spectroscopic theory.....	7
2.1.5 Proposed theories on primary smells.....	8
2.2 โครงสร้างและการรับรู้กลิ่นของมนุษย์.....	11
2.3 เซ็นเซอร์วัดกลิ่นชนิด Quartz crystal microbalance.....	14
2.4 วิธีการวัดความถี่.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดความถี่นั้นโดยทั่วไปมีวิธีการวัด 2 วิธี ดังจะอธิบายในหัวข้อนี้	17
2.4.1 การวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement	17
2.4.2 การวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement	18
บทที่ 3	21
โครงสร้างและการออกแบบ	21
3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดคลื่นที่ออกแบบ	21
3.2 บอร์ด FPGA ที่ใช้	22
3.3 การออกแบบวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter	23
3.4 การออกแบบ CPU ของวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter ลงบน FPGA	28
บทที่ 4	31
การทดลองและผลการทดลอง	31
4.1 ผลการโปรแกรมวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter ลงบนบอร์ด FPGA	31
4.2 ผลการวัดสัญญาณจากส่วนต่างๆ ของวงจรที่ออกแบบ	32
4.3 ผลการทดลองและกราฟแสดงผลจากการทดลอง	34
บทที่ 5	37
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	37
5.1 สรุปการศึกษา	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	39

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของการมีกลิ่นหอมกลุ่มที่ 1.....	4
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของการมีกลิ่นหอมกลุ่มที่ 2.....	5
รูปที่ 2.3 ตัวรับกลิ่นของมนุษย์ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับแม่กลิ่นทั้งเจ็ดกลิ่น.....	6
รูปที่ 2.4 แบบจำลองอธิบายว่าโมเลกุลของกลิ่นที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวรับกลิ่น.....	7
รูปที่ 2.5 แบบจำลองรูปแบบการเกิดการกระตุ้นในออลแฟกทอรีบิลด์ด้วยกลไกต่างๆที่กระทำต่อตัวรับกลิ่น	11
รูปที่ 2.6 ภาพตัดแนวขวางของเซลล์รับกลิ่น (Odorant receptor).....	12
รูปที่ 2.7 กระบวนการการส่งข้อมูลกลิ่น.....	13
รูปที่ 2.8 ภาพแสดงกระบวนการรับกลิ่น.....	13
รูปที่ 2.9 ภาพแสดง เซนเซอร์วัดกลิ่นชนิด Quartz crystal microbalance.....	14
รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของเซนเซอร์วัดกลิ่นชนิด Quartz crystal microbalance ในมุมมองตัดขวาง.....	14
รูปที่ 2.11 ภาพแสดงวงจร Quartz crystal microbalance circuit.....	16
รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement.....	17
รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement.....	18
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของของเครื่องวัดกลิ่นที่ออกแบบ.....	21
รูปที่ 3.2 บอร์ด DE0-Nano.....	23
รูปที่ 3.3 วงจร Reciprocal frequency counter ที่ได้ออกแบบ.....	23
รูปที่ 3.4 วงจรที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1.....	24
รูปที่ 3.5 วงจรภายในของวงจรที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1.....	25
รูปที่ 3.6 วงจรหารความถี่ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1.....	25
รูปที่ 3.7 วงจรมิกเซอร์ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1	26
รูปที่ 3.8 วงจรเกทควมคุมและวงจรมับ Reciprocal frequency counter ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1	26
รูปที่ 3.9 Nios II CPU ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1.....	27
รูปที่ 3.10 การออกแบบ Nios II CPU ผ่าน Quartus II โดยใช้ Tools Qsys.....	28

เอกสารรูปที่ 3.11 แผนภาพ block diagram ของ Nios II CPU ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 หน้าต่างการโปรแกรมของ nios ii software build tools for eclipse.....	29
รูปที่ 3.13 หน้าจอที่แสดงผลค่าที่คำนวณได้จาก CPU	29
รูปที่ 3.14 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่าง FPGA และ SDRAM	30
รูปที่ 3.15 วงจร Phase lock loop ที่ใช้กับ SDRAM.....	30
รูปที่ 4.1 วงจรที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1	31
รูปที่ 4.2 แสดงผลการโปรแกรมวงจรที่ออกแบบลงบนบอร์ด FPGA.....	31
รูปที่ 4.3 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จาก QCM Sensor	32
รูปที่ 4.4 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จากสัญญาณอ้างอิง	32
รูปที่ 4.5 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จากสัญญาณอินพุต	33
รูปที่ 4.6 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จากสัญญาณเอาพุตของวงจรมิกเซอร์	33
รูปที่ 4.7 ค่าความถี่ที่แสดงผลทุกๆวินาที โดยตำแหน่งที่ค่าพุ่งสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเกิดจากที่เซ็นเซอร์ได้สัมผัสกับคลื่น	35



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 ทฤษฎีของการรับรู้กลิ่น.....	9
ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ทุกๆวินาทีที่แสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การรับรู้กลิ่นเป็นประสาทสัมผัสหนึ่งของมนุษย์นอกเหนือจากการมองเห็น การได้ยิน การรับรู้รส และการสัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งมนุษย์เริ่มมีความสงสัยเกี่ยวกับกลิ่นตั้งแต่อดีตกาลและพยายามจะหาคำตอบและอธิบายว่ากลิ่นคืออะไร มีลักษณะรูปร่างเป็นอย่างไร การรับรู้กลิ่นเกิดขึ้นได้อย่างไร และสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างไรบ้าง โดยมีการเสนอทฤษฎีและแบบจำลองเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นและการรับรู้กลิ่น แต่ในปัจจุบันก็ยังไม่สามารถที่จะอธิบายได้ทั้งหมด การรับรู้กลิ่นมีประโยชน์ต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เช่น การรับรู้ถึงสภาพแวดล้อมที่ผิดปกติ การระงับภัย การรับรู้ถึงคุณภาพของอาหาร แม้กระทั่งในเรื่องความรู้สึกสุนทรีย์ แต่ถึงกระนั้นก็ตาม การรับรู้กลิ่นของมนุษย์ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากการรับกลิ่นของแต่ละบุคคลแตกต่างกันไปตามวัย เพศ สุขภาพ และประสบการณ์ ดังนั้นการสร้างเครื่องมือที่สามารถวัดกลิ่นได้จึงเป็นสิ่งจำเป็น

1.2 วัตถุประสงค์และความมุ่งหมายของการศึกษา

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวัดกลิ่นแบบใช้ QCM เซ็นเซอร์ ที่สามารถวัดระดับความเข้มข้นของกลิ่นได้ มีผลตอบสนอง (Response time) และระยะเวลาในการคืนตัว (Recovery time) รวดเร็วและมีขนาดเล็กพกพาได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เพื่อที่จะพัฒนาระบบวัดกลิ่นที่มีความละเอียด (Resolution) และความไวในการวัด (Sampling rate) สูง ในโครงการนี้จะใช้วงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal (Reciprocal frequency counter) ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของสัญญาณที่ออกจากวงจรเซ็นเซอร์ ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้สามารถได้ความละเอียดในเชิงความถี่ (Frequency resolution) และความละเอียดในเชิงเวลา (Temporal resolution) สูง ซึ่งจะนำไปสู่ความละเอียดที่สูงและความไวในการวัดที่รวดเร็วของวงวัดความถี่

1.4 ขอบเขตการศึกษา

พัฒนางจรวัดความถี่แบบ Reciprocal ซึ่งเป็นวงจรหลักในเครื่องวัดกลิ่นแบบใช้ QCM เซ็นเซอร์ โดยทำการพัฒนางจรลงบนบอร์ด FPGA และทำการประเมินผลโดยใช้ QCM เซ็นเซอร์จริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาเครื่องวัดกลิ่นที่สามารถวัดระดับความเข้มข้นของกลิ่นได้ มีผลตอบสนอง (Response time) และระยะเวลาในการคืนตัว (Recovery time) รวดเร็วและมีขนาดเล็กพกพาได้ เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับกลิ่น

ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการรับรู้กลิ่นอย่างแพร่หลายมานานแต่อดีตกาล แต่การรับรู้กลิ่นยังคงถูกเข้าใจน้อยมากเมื่อเทียบกับประสาทสัมผัสอื่นๆ ความพยายามในการอธิบายว่ากลิ่นคืออะไร เริ่มมีขึ้นตั้งแต่สองพันปีที่ผ่านมาเช่นปรัชญาแนว Lucretius's philosophy Wright's vibrational theory Amoore's stereochemical theory และ Turin's spectroscopic theory จะถูกอธิบายในหัวข้อนี้

2.1.1 Lucretius's philosophy

ความพยายามในการอธิบายเกี่ยวกับธรรมชาติของกลิ่นถูกกล่าวขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อสองพันปีที่ผ่านมาโดย Titus Lucretius Carus นักกวีและนักปราชญ์ ในหนังสือบทกวีที่มีชื่อเสียงเล่มหนึ่งคือ De rerum nature ("On the Nature of Thing") โดยมีรายละเอียดดังนี้

มีสิ่งที่เรามองไม่เห็นอีกมากมาย แต่สิ่งเหล่านั้นยังคงมีอยู่ เช่น ลม กลิ่น ความร้อน และความเย็น มีกลิ่นจำนวนมากไหลออกมาและหมวนวนลอยอยู่ในอากาศและถูกกระจายไปทุกทิศทางตามกระแสลม กลิ่นจะมีลักษณะและรูปร่างที่แตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของกลิ่น กลิ่นบางชนิดจะสามารถถูกจำแนก (Identity) ได้ง่ายโดยสัตว์บางชนิด เช่น กลิ่นหอมของน้ำผึ้งที่ไวต่อการรับรู้โดยผึ้งหรือกลิ่นของสัตว์ป่าที่ไวต่อการรับรู้โดยต่อสู้นั้นกล่าว กลิ่นบางชนิดจะสามารถเดินทางได้ไกลกว่ากลิ่นอื่น อย่างไรก็ตามไม่มีกลิ่นใดจะเดินทางได้ไกลกว่าเสียง

ถึงแม้ว่าปรัชญาแบบ Lucretius จะเป็นเพียงคำอธิบายง่ายๆ ไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการรับรู้กลิ่นของจมูกและลักษณะการทำงานว่าเป็นอย่างไร แต่ก็จุดเริ่มต้นของแนวคิดแรกที่มีการกล่าวถึงเรื่องกลิ่น

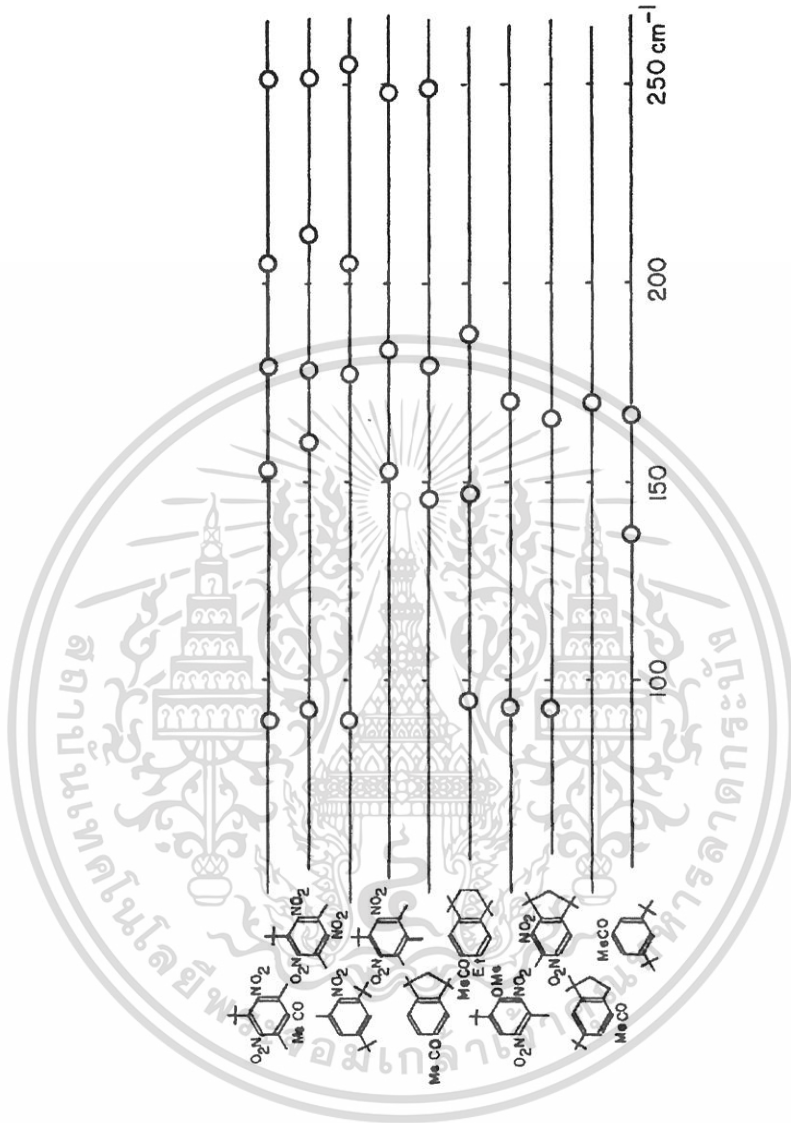
2.1.2 Wright's vibrational theory

สมมติฐานพื้นฐานเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของกลิ่นถูกเสนอโดย Wright [Wright 1964-1] เขากล่าวว่าคุณภาพ (Essential quality of odors) ที่สำคัญส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่โดยการสั่น (vibrational movement) ของโมเลกุลของกลิ่นเป็นหลัก โดยความแรงของกลิ่น (Strength of odor) นั้นจะขึ้นอยู่กับขั้ว (Volatility) ความสามารถในการละลายในน้ำหรือไขมัน ความสามารถในการดูดซับและคุณสมบัติอื่นของโมเลกุลนั้นเล็กน้อย ในความคิดเห็นเขากการสั่นของโมเลกุลกลิ่นนี้ จะมีความถี่ต่ำกว่าช่วง $300-400\text{ cm}^{-1}$ แต่จะไม่ต่ำกว่าช่วง $50-60\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจากแนวคิดนี้จะแบ่งชนิดของกลิ่นหลักได้ ประมาณ 25 กลิ่น ซึ่งได้มาจากการรวมกันของวิธีต่างๆ ส่วนใหญ่แล้วสารที่มีโมเลกุลของกลิ่นซับซ้อนและไม่มีการสั่นเพียงกลิ่นเดียว เขาดำเนินการทดลองโดยการใช้ น้ำหอมและไม่มีน้ำหอม เพื่อตรวจสอบสมมติฐานนี้ ในการทดลองจุดที่ไกลที่สุดที่มีการดูดกลิ่นรังสีอินฟราเรด ซึ่งสังเกตโดยใช้เครื่อง Spectro-photometer ผลที่ได้ของการมีกลิ่นหอมเหมือนที่แสดงในรูป 2.1 และ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

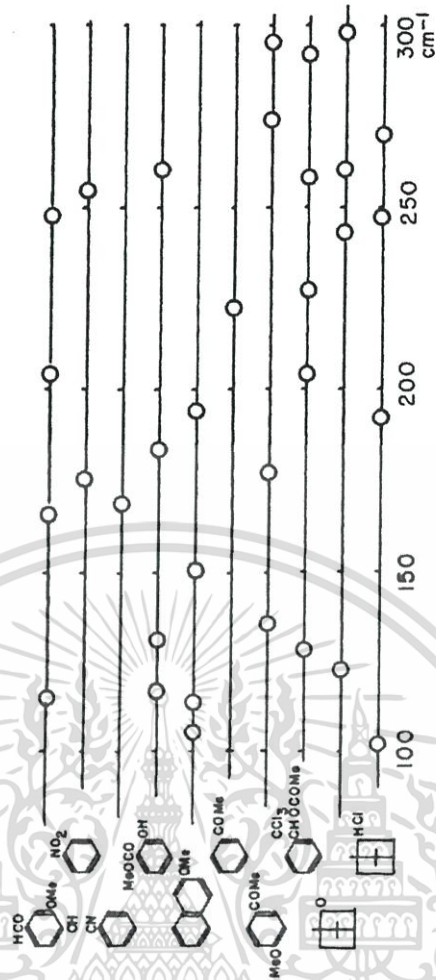
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ผลในรูป 2.1 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่เหมือนกันของอินฟราเรดสเปกตรัมกับโครงสร้างของกลุ่มตัวอย่างที่ใกล้เคียงกันประกอบด้วยลูปปิดของ $-CH_2-$ กลุ่มนี้ในขณะที่จะไม่สามารถสังเกตได้จากผลในรูป 2.2



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของการมีกลิ่นหอมกลุ่มที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



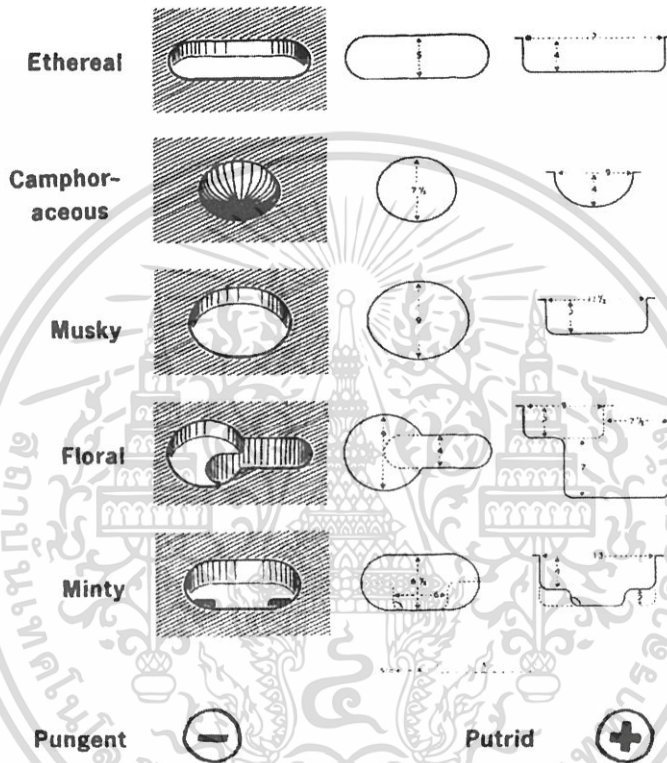
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของการมีกลิ่นหอมกลุ่มที่ 2

2.1.3 Amoore's stereochemical theory

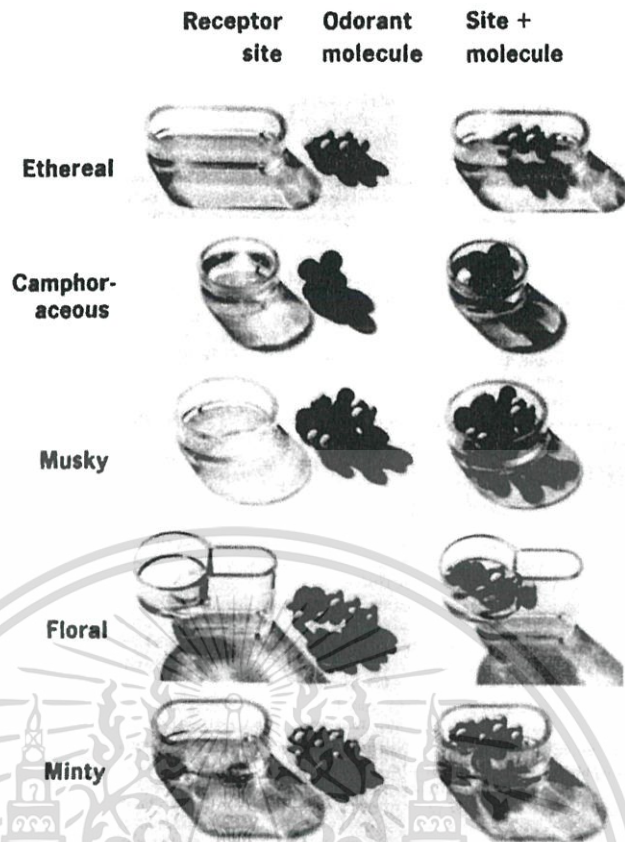
ทฤษฎีนี้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Amoore เขาเชื่อว่าคุณภาพของกลิ่นจะถูกกำหนดโดยขนาดโมเลกุล [Amoore 1963] ดังนั้นกลิ่นที่คล้ายกันจะมีแนวโน้มที่จะมีขนาดรูปร่างคล้ายกันและความแตกต่างจะมีความละเอียดในระดับโมเลกุล จากทฤษฎีจะระบุได้ว่าโมเลกุลของกลิ่นจะแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่น แต่ในความเป็นจริงแล้วยังสามารถแบ่งได้มากกว่านี้ ในขณะที่สามารถจัดเรียงรูปทรงเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของการรับของกลิ่นนั้น Amoore เขาเสนอว่ากลิ่นที่มีความแตกต่างกันแบ่งได้ 7 ประเภท คือ กลิ่น camphor-aceous กลิ่นมัสค์ก็ กลิ่นดอกไม้ กลิ่นมันต์ กลิ่นฉุนและกลิ่นเน่าเหม็น กลิ่นทั้งหมดนี้เป็นกลิ่นที่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นกลิ่นนี้จะเรียกว่า "ลีดและคีย์" เป็นกลไกที่โมเลกุลกลิ่นเข้าไปในระบบรับกลิ่นในเยื่อจมูก ขั้นตอนแรกจะเห็นสามกลิ่นหลักส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลภายในช่องแคบๆ จะรับเฉพาะโมเลกุลขนาดเล็กมากหรือบางๆ ภายใน กลิ่น camphor จะมีลักษณะเป็นอ่างครึ่งวงกลมแต่ภายในของกลิ่นมัสค์ก็จะมีขนาดเท่าใหญ่เท่ารูปไข่และจุดที่แบนที่สุดจะมีโมเลกุลที่มีรูปร่างเหมือนแผ่นดิสก์ขนาดใหญ่เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมเต็มอย่างเพียงพอ อีกสองกลิ่นหลักจะเป็นผลมาจากรูปร่างแทนที่จะเป็นขนาด ภายในกลิ่นดอกไม้จะมีลักษณะคล้ายลูกกุญแจหรือรูปทรงคาตรูปว่า ส่วนภายในกลิ่นมีนส์จะมีลักษณะคล้ายกับลิ้ม สองกลิ่นสุดท้ายจะไม่อยู่กับขนาดหรือรูปร่างเลย แต่จะเกี่ยวข้องกับสถานะทางไฟฟ้าของโมเลกุลกลิ่น ดังนั้นกลิ่นฉุนที่เกิดจากโมเลกุลของ electrophilic และกลิ่นเน่าเหม็นจะเกิดจากโมเลกุล nucleophilic ตามลำดับ ซึ่งภายในจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า รายละเอียดตัวรับที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นแต่ละชนิดแสดงในรูป 2.3 และแบบจำลองอธิบายว่าโมเลกุลของกลิ่นที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวรับแสดงในรูป 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ตัวรับกลิ่นของมนุษย์ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับแม่กลิ่นทั้งเจ็ดกลิ่น



รูปที่ 2.4 แบบจำลองอธิบายว่าโมเลกุลของกลิ่นที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวรับกลิ่น

ในปัจจุบันทฤษฎีของ Amoore ยังคงมีประโยชน์เพราะสามารถอธิบายกลไกของกลิ่น แต่อย่างไรก็ตามจำนวนกลิ่นที่ได้เสนอมาข้างต้นในทฤษฎีก็ยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นได้หมด กลิ่นหลักที่ได้จากการเสนอทฤษฎีอาจจะยังไม่ค้นพบในปัจจุบันหรืออาจจะอยู่ไม่มีจริงเลยก็ได้ [Amoore1964]

2.1.4 Turin's spectroscopic theory

ทฤษฎีของเขายืนยันว่าการรับกลิ่นไม่ตอบสนองต่อรูปร่างของโมเลกุล แต่ตอบสนองต่อการสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับในแง่ของการมองเห็นที่ตรวจสอบความถี่ของการสั่นสะเทือนของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเซลล์ที่เกี่ยวกับมองเห็นภาพสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน และเซลล์ที่เกี่ยวกับการมองเห็นภาพระดับสีเทาในดวงตา และในแง่ของการได้ยินซึ่งในอวัยวะของหูชั้นในตรวจสอบความถี่ของคลื่นเสียงตามลำดับ [Turin1996] อย่างไรก็ตามในการคำนวณความถี่ของการสั่นสะเทือนโมเลกุลที่เกิดขึ้นจริงนั้นมีความซับซ้อนและยุ่งยาก

ทฤษฎีนี้มีความแตกต่างจากทฤษฎีของไรท์ในการให้รายละเอียดและกลไกที่เป็นไปได้สำหรับการถ่ายโอนพลังงานทางชีวภาพของการสั่นสะเทือนของโมเลกุล ตัวรับการตอบสนองต่อช่วงที่แตกต่างของการสั่นสะเทือนมีหลายประเภท ในลูกตามีหลายล้านสีที่แตกต่างกันไปแต่สามารถแบ่งตัวรับการตอบสนองในเรตินาได้เพียงสามประเภท ในกรณีที่มีการรับรู้กลิ่นอาจจะมียาบางกลิ่นที่ตัวรับกลิ่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถรับได้ ทฤษฎีการสั่นสะเทือนของกลืนของตุรินแสดงให้เห็นสองรูปแบบที่ทฤษฎีของมัวร์ไม่สามารถอธิบายได้ ตามที่ได้อธิบายไว้ด้านล่าง

- (1) โมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่มีไฮโดรเจนและคาร์บอนอะตอม โดยไฮโดรเจนอยู่ในรูปแบบไอโซเมอร์ฟอร์ม โดยในนิวเคลียสจะประกอบด้วยโปรตอนและอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียส ขณะที่โปรตอนมีมวลประมาณ 1,800 เท่าของอิเล็กตรอน โดยโปรตอนเป็นมวลส่วนใหญ่ที่อยู่ในนิวเคลียส อย่างไรก็ตามขนาดของอะตอมไฮโดรเจนจะถูกกำหนดโดยวงโคจรของอิเล็กตรอน รูปแบบที่สองจากของอะตอมไฮโดรเจน เรียกว่าดิวทีเรียมมีอนุภาคที่เป็นกลางเรียกว่านิวตรอนเป็นนิวเคลียส ขนาดและรูปร่างของอะตอมดิวทีเรียมเหมือนกันกับของอะตอมไฮโดรเจน แต่มีมวลประมาณสองเท่าของอะตอมไฮโดรเจน ถ้าอะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยอะตอมดิวทีเรียมแล้วรูปร่างโมเลกุลจะไม่ได้รับผลกระทบ แต่ความถี่การสั่นสะเทือนของโมเลกุลจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในกรณีนี้กลืนของโมเลกุลที่มีกระบวนการถูกแทนที่อะตอมไฮโดรเจนด้วยอะตอมดิวทีเรียมจะแตกต่างจากโมเลกุลเดิมโดยทฤษฎีของมัวร์ ไม่สามารถอธิบายกลไกนี้ได้
- (2) อีกหลักฐานที่ตุรินค้นพบคือ สองโมเลกุลที่มีการสั่นสะเทือนเดียวกัน แต่มีรูปร่างของโมเลกุลที่แตกต่างกันที่มีกลิ่นเดียวกัน ตุรินบอกว่าสารประกอบกำมะถันที่มีกลิ่นเหม็นพิเศษก็เชื่อว่าเกิดมาจากพันธะของกำมะถันและไฮโดรเจนที่มีจำนวนของคลื่น 2500 cm^{-1} นอกจากนี้เขายังพบว่าสารประกอบของโบรอนที่มีการสั่นสะเทือนเดียวกันนั้น มีกลิ่นเดียวกันกับกำมะถันแม้ว่ารูปร่างโมเลกุลของมันจะแตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากสารประกอบของกำมะถัน หลักฐานนี้แตกต่างจากการที่ได้มีการอธิบายไว้โดยทฤษฎีของมัวร์

ถึงแม้ว่าทฤษฎีของตุรินสามารถอธิบายโครงสร้างโมเลกุลและกลไกของกลิ่นได้ แต่การทดลองของเขาได้รับการวิพากษ์วิจารณ์จากนักวิทยาศาสตร์บางคนว่า เมื่อพวกเขาทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันสองครั้งเพื่อตรวจสอบทฤษฎีที่ตุรินนำเสนอ กลับได้ผลลัพธ์ไม่ใกล้เคียงกัน [Keller et al. 2004] ในปัจจุบันคำอธิบายง่ายๆของทฤษฎีของมัวร์ยังคงเป็นที่ยอมรับถึงแม้ว่าจะไม่สามารถอธิบายกลไกบางอย่างของการรับกลิ่น

2.1.5 Proposed theories on primary smells

ระบบการรับรู้กลิ่นสามารถแยกแยะระหว่างสารเคมีขนาดใหญ่ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันโดยใช้ตัวรับรู้กลิ่นประมาณสามร้อยประเภท เพื่อที่จะอธิบายการเข้ารหัสของกลิ่นในระบบการดมกลิ่น มีแบบจำลองสำหรับการก่อตัวของรูปแบบการทำงานในต่อมรับกลิ่น โดนการทำงานร่วมกันของตัวรับรู้กลิ่นที่เสนอโดย Touhara et al. [Touhara 2001] แสดงให้เห็นในรูปแบบที่ 2.5 โมเลกุลของกลิ่นส่วนใหญ่ถูกตรวจพบได้โดยตัวรับรู้กลิ่นมากกว่าหนึ่งตัว และตัวรับรู้กลิ่นส่วนใหญ่ตรวจพบกลิ่นได้จำนวนมาก ดังแสดงในรูป 2.5(a) โครงสร้างโมเลกุลของกลิ่นจะเป็นตัวกำหนดประเภทของตัวรับรู้กลิ่นที่จะมาตรวจพบกลิ่นโดยเฉพาะ เซลล์ประสาทรับกลิ่นที่มีตัวรับรู้กลิ่นมาบรรจบกับหลอดเลือดฝอยเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

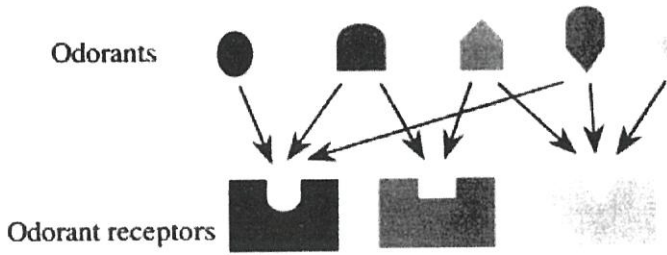
สำหรับต่อมรับกลิ่น ดังในรูป 2.5(b) แล้วการทำงานของตัวรับกลิ่นหลายตัวที่มีรูปแบบการทำงานเชิงพื้นที่เฉพาะเจาะจงกับกลิ่นในต่อมรับรูกลิ่น ที่แสดงในรูป 2.5 (c)

ถึงแม้ว่ากลไกในการตรวจสอบของระบบกลิ่นจะเป็นที่กันรู้จักร้อยมาก ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้รับจากตัวรับรูกลิ่นและคุณสมบัติโมเลกุลของกลิ่นยังคงไม่สามารถที่จะเข้าใจได้จากแนวคิดต่างๆที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นชุดการทดลองของระบบการรับรู้กลิ่นจะอยู่บนพื้นฐานของการรวมเอาแนวคิดต่างๆมาอธิบายและต่อยอดเพื่ออธิบายสิ่งที่ยังไม่ค้นพบกันต่อไป มีหลายทฤษฎีที่นำเสนอเกี่ยวกับกลไกการทำงานร่วมกันระหว่างระบบการรับกลิ่นและสิ่งเร้าที่เกิดจากกลิ่นดังแสดงในตารางที่ 1.1

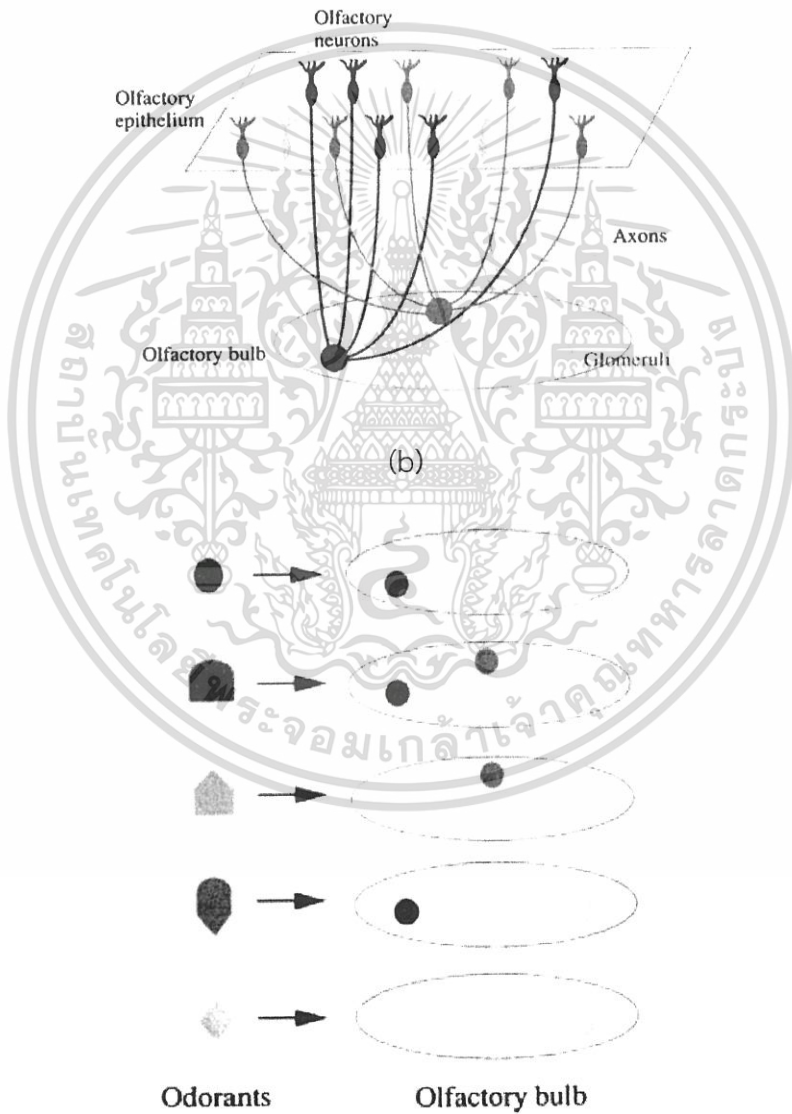
ตารางที่ 1.1 ทฤษฎีของการรับรู้กลิ่น

Researcher	Theory	Reference
G.M. Dyson et al.	Molecular vibration	[Dyson1938]
J.E. Amoore et al.	Molecular shape	[Amoore1952]
J.T. Davies et al.	Diffusion pore	[Davies1959]
B. Rosenberg et al.	Piezo-effect	[Rosenberg1968]
L. Turin et al.	Nose as a spectroscope	[Turin1996]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แบบจำลองรูปแบบการเกิดการกระตุ้นในออลแฟกทอรีรีบับด้วยกลไกต่างๆที่กระทำต่อตัวรับกลิ่น

ถึงแม้ว่า น่าจะเป็นไปได้ที่สุดที่จะใช้วิธีการนี้ในการนำเสนอการคาดการณ์ความสัมพันธ์ระหว่างกลิ่นและรูปแบบการตอบสนองของเซลล์รับกลิ่น แต่ทฤษฎีนี้ยังคงเป็นเป็นแค่ขั้นตอนเบื้องต้นที่มีความสอดคล้องกันน้อยมาก ดังนั้นชุดหลักของการรับกลิ่นยังคงไม่ถูกค้นพบ

2.2 โครงสร้างและการรับรู้กลิ่นของมนุษย์

การได้กลิ่นจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อ อากาศที่หายใจเข้า ไปสัมผัสกับเซลล์ประสาทรับกลิ่น (Olfactory receptor cell) ซึ่งอยู่บริเวณเพดานภายในช่องจมูก โดยเซลล์ประสาทรับกลิ่นนี้จะประกอบด้วยเซลล์ 3 ประเภทได้แก่ เซลล์ประสาทรับความรู้สึกที่มีลักษณะเป็นขน (Ciliated sensory neurons) เซลล์ค้ำจุน (Supporting cells) และเซลล์พื้นฐาน (Basal cells) ซึ่งเป็นเซลล์ที่อยู่ชั้นล่างสุดของเยื่อจมูกเรียงตัวเป็นแถวเดียว

เมื่อเซลล์รับกลิ่นซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมากที่ละลายในเยื่อเมือก (Olfactory mucus membrane) ที่อยู่บนเยื่อเซลล์ (Nasal epithelium) ภายในช่องจมูก โดยบริเวณนี้ของมนุษย์จะมีขนาดเล็กประมาณ 2-5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งแตกต่างกับในสัตว์ เช่น สุนัขจะมีพื้นที่ในบริเวณนี้ขนาดใหญ่ประมาณ 25 ตารางเซนติเมตร โดยกลิ่นที่จะกระตุ้นเซลล์รับกลิ่นได้ทีนั้น ควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ

1. ระเหยได้ในอากาศ เพื่อสูดผ่านเข้าจมูกได้
2. ละลายน้ำได้ดีเพื่อผ่านเยื่อจมูกไปสู่เซลล์รับกลิ่นได้
3. ละลายได้ดีในไขมัน เนื่องจากเซลล์รับกลิ่นมีสารไขมันเป็นองค์ประกอบ

หลังจากนั้นเยื่อเมือกที่มีโปรตีนซึ่งรวมตัวกับกลิ่นแล้วเรียกว่า ออเดอร์ไบนด์โปรตีน (Odorant binding protein) จะไปจับกับเซลล์รับกลิ่น (Receptor) และไปกระตุ้นอะดีนิวัไซคลาส (Adenyl cyclase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ ที่ฝังตัวอยู่ในเยื่อของเซลล์ขน (cilia) เพื่อกระตุ้นให้เปลี่ยนพลังงาน เอทีพี (ATP) เป็นไซคลิกเอเอ็มพี (Cyclic AMP:cAMP) ในไซโตซอล (Cytosol) จากนั้นไซคลิกเอเอ็มพี (Cyclic AMP:cAMP) จะทำให้ช่องโซเดียม (Sodium channels) เปิดเป็นผลให้โซเดียมเข้าสู่เซลล์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์เกิดแอกชั่นโพเทนเชียล (Action potential) เป็นกระแสประสาทส่งไปตามเส้นประสาทสมองคู่ที่ 1 (Olfactory nerve) ไปยังสมองเพื่อแปลสัญญาณกลิ่นที่ได้รับ

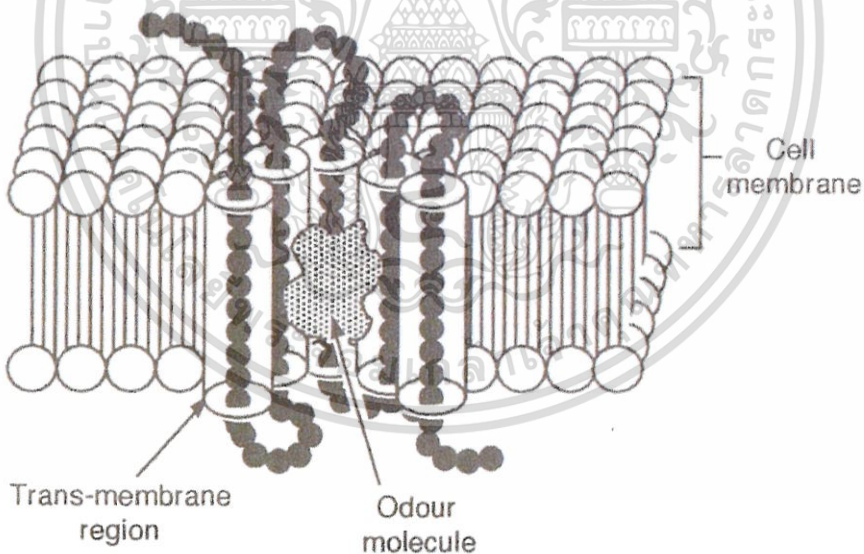
การที่คนเราสามารถแยกความแตกต่างระหว่างกลิ่นต่างๆซึ่งมีอยู่มากมายประมาณ 10,000 กลิ่นได้นั้นเนื่องจาก เซลล์รับกลิ่นมียีนที่เฉพาะเจาะจงเพียง 1 ยีนเท่านั้น ฉะนั้นเซลล์รับกลิ่นจึงมีอยู่เป็นจำนวนมากและมีหลายชนิด โดยผู้ที่ค้นพบการอธิบาย ปรากฏการณ์นี้ซึ่งถือว่าการค้นพบองค์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเข้าข่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความรู้ใหม่และได้รับรางวัลโนเบลสาขาสรีรวิทยาและแพทยศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2547 (คศ.2004) คือ ดร. ริชาร์ด เอเซล (Richard Axel) แห่งมหาวิทยาลัยโคลัมเบีย รัฐนิวยอร์ก และดร.ลินดา บัค (Linda Buck) ซึ่งทำงานที่ศูนย์วิจัยโรคมะเร็งเฟร็ด ของสถาบันวิจัยทางการแพทย์ เฮาเวริค ฮิวส์ นครซีแอตเติล ประเทศสหรัฐอเมริกา (Howard Hughes Medical Institute, Fred Hutchinson Cancer Research Center, University of Washington, Seattle, USA.)

ขั้นตอนการรับกลิ่น

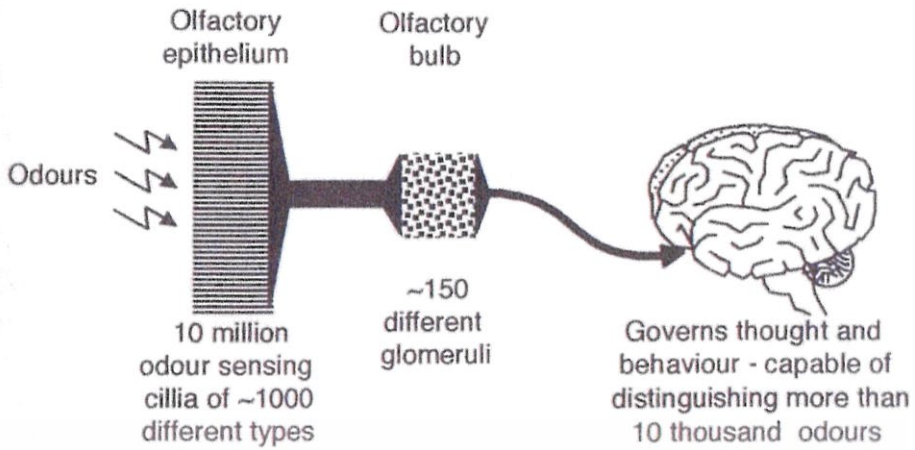
เมื่อกระแสประสาทถูกส่งผ่านแอกซอนของเซลล์รับกลิ่นผ่านเพดานโพรงจมูกเข้าไปในออลแฟกทอรีบัลล์ (olfactory bulb) แล้วไปตามออลแฟกทอรีแทรค (Olfactory tract) จากนั้นจะแยกกันอยู่ในสมอง 2 ส่วนคือ

1. ออลแฟกทอรีด้านข้างส่วนต้น (Primary lateral olfactory area) ในสมองส่วนพู่ด้านขมับ (Temporal lobe) ทำหน้าที่ในการรับรู้กลิ่น
2. ออลแฟกทอรีที่อยู่ตรงกลางและด้านใน (Intermediate and medial olfactory area) ในสมองส่วนหน้า (Frontal cortex) ทำหน้าที่ประสานงานและเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกลิ่นกับการเกิดอารมณ์ต่างๆ ตามลำดับ

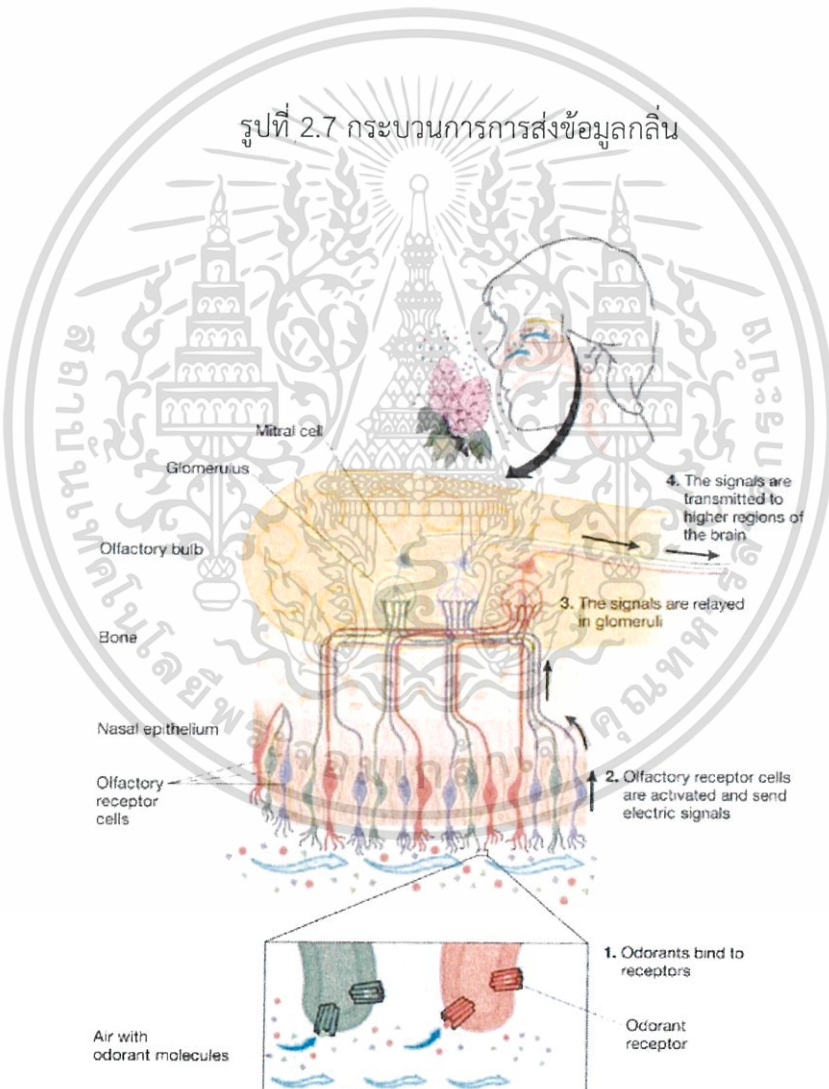


รูปที่ 2.6 ภาพตัดแนวขวางของเซลล์รับกลิ่น (Odorant receptor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กระบวนการการส่งข้อมูลกลิ่น



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงกระบวนการรับกลิ่น

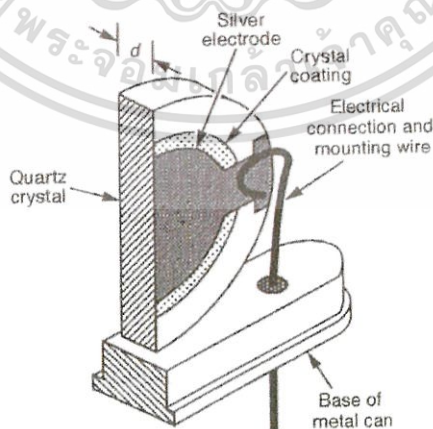
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เซ็นเซอร์วัดกลิ่นชนิด Quartz crystal microbalance

เซ็นเซอร์ชนิดนี้ใช้ผลึกคริสตัลประเภทควอตซ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในการซั่งน้ำหนักของโมเลกุลของกลิ่น มีแสดงภาพตัวอย่างเซ็นเซอร์จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ ซึ่งสารเคมีที่เคลือบบนผลึกคริสตัลจะมีผลต่อกลิ่นเป้าหมาย ในอากาศจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของกลิ่นชนิดต่างๆ เมื่อโมเลกุลของกลิ่นของกลิ่นมาสัมผัสกับผลึกคริสตัลบางส่วนของโมเลกุลกลิ่นจะถูกดึงดูดติดอยู่บนผิวที่เคลือบด้วยสารเคมีไว้ชั่วคราว โมเลกุลของกลิ่นที่ถูกจับไว้จะทำให้มวลของผลึกเพิ่มขึ้นและมีผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์มีค่าลดลง ซึ่งเซ็นเซอร์จะมีค่าความถี่รีโซแนนซ์อยู่ค่าๆหนึ่ง โครงสร้างและภาพในมุมมองตัดขวาง



รูปที่ 2.9 ภาพแสดง เซ็นเซอร์วัดกลิ่นชนิด Quartz crystal microbalance



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของเซ็นเซอร์วัดกลิ่นชนิด Quartz crystal microbalance ในมุมมองตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประยุกต์ใช้งาน Microbalance เมื่อผลึกมีมวลเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความถี่โซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น จากแบบจำลองที่เสนอโดย Sauerbrey โดยได้มีการคาดคะเนถึงผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของมวลผลึกคริสตัลที่มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (Lu,1984) ใน Thickness shear mode ของผลึกคริสตัล d จะเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น λ

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad 2.1$$

ความเร็ว V ของคลื่นเสียงในผลึกคริสตัลจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ f และความยาวคลื่น λ ดังสมการ

$$V = f\lambda \quad 2.2$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$f = \frac{v}{2d} \quad 2.3$$

(ถ้ากำหนดให้ความเร็วของเสียงในควอตซ์มีค่าเป็น 3340 m/s ที่ 10 MHz จะพบว่าค่าความหนาของผลึกคริสตัลจะมีค่าประมาณ 0.167 mm)

ถ้าความหนาแน่นของหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผลึกคริสตัลเพิ่มขึ้นเป็น Δd เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของการสะท้อนความถี่ในผลึกคริสตัล Δf จะได้ว่า

$$(f + \Delta f) = \frac{v}{2(d + \Delta d)} \quad 2.4$$

สมมติว่าการเพิ่มความหนาของผลึกคริสตัลเพียงเล็กน้อยจากความหนาเดิม เมื่อสังเกตจะพบว่ามวลที่เพิ่มขึ้นของคริสตัลเป็นสัดส่วนกับความหนาเดิม ดังสมการ

$$\frac{\Delta f}{f} = - \frac{\Delta m}{m} \quad 2.5$$

เมื่อ M = มวลของผลึกต่อหน่วยพื้นที่

Δm = มวลที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่

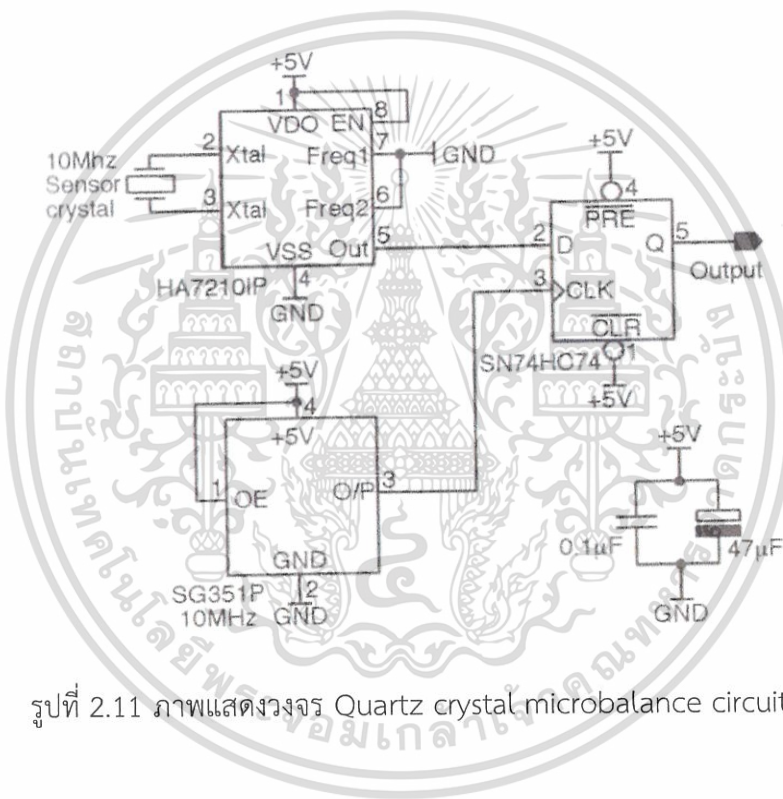
การเพิ่มมวลผลึกคริสตัลจะช่วยลดความถี่ลง เมื่อแทนสมการ 2.3 ลงในสมการ 2.5 จะพบว่ามวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะเท่ากับความหนาแน่นของวัสดุ p เวลาที่ความหนา D แล้วความถี่จะเปลี่ยนเมื่อความหนาที่เพิ่มขึ้น

$$\Delta f = - \frac{2f^2 \Delta m}{pv} \quad 2.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.6 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มความไวของเซ็นเซอร์จะเป็นความถี่กำลังสองและการตอบสนองเซ็นเซอร์ที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารเคมี โดยที่ปริมาณของสารเคมีที่ดูดซับเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นในอากาศโดยรอบ

แต่การใช้งานจริงของเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะออกแบบใช้งานร่วมกับวงออสซิลเลเตอร์ ดังรูป 2.11 ซึ่งจะทำให้ค่าของสัญญาณที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น มีขนาดกระทัดรัด มีการตอบสนองต่อโมเลกุลของกลิ่นได้ดี ไม่ต้องทำงานในที่อุณหภูมิสูง ยังหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดและยังสามารถนำพัฒนาสำหรับการแยกกลิ่นได้ ถึงกระนั้นก็ยังมียข้อเสียในเรื่องของความถี่ เพราะความถี่มากขึ้นจะทำให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้



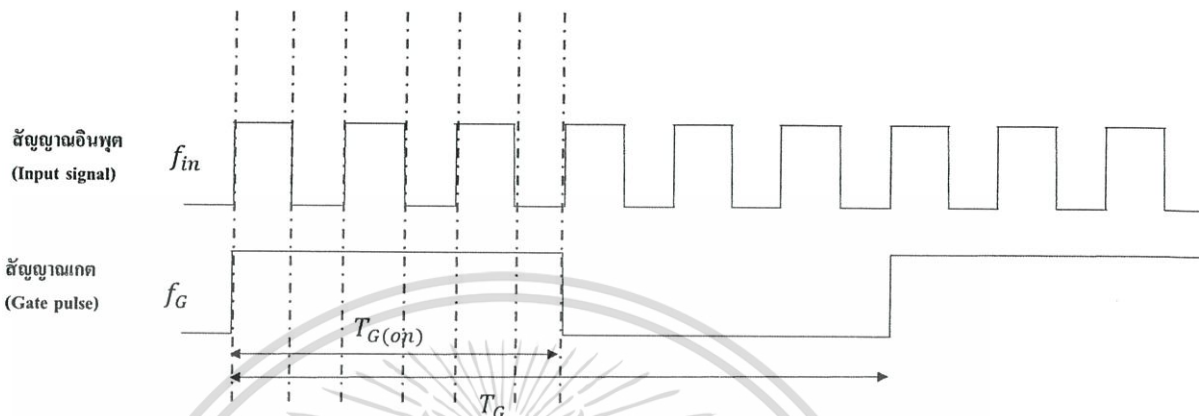
รูปที่ 2.11 ภาพแสดงวงจร Quartz crystal microbalance circuit

2.4 วิธีการวัดความถี่

ในการวัดความถี่นั้นโดยทั่วไปมีวิธีการวัด 2 วิธี ดังจะอธิบายในหัวข้อนี้

2.4.1 การวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement

มีหลักการดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement

จากรูปความถี่ของสัญญาณอินพุต (f_{in}) เป็นค่าที่ต้องการวัด ในขณะที่สัญญาณเกต (Gate pulse) คือสัญญาณที่ถูกใช้ช่วยในการวัด เมื่อสัญญาณเกตมีความถี่เท่ากับ f_G

จะได้ว่า

$$T_G = \frac{1}{f_G}$$

การที่สัญญาณเกตมีค่า Duty cycle = 50 (%) จะเห็นว่าคาบเวลาในฝั่งซีกบวกของสัญญาณเกตจะเท่ากับ

$$T_{G(on)} = \frac{T_G}{2} = \frac{1}{2f_G}$$

ซึ่งเมื่อเราใช้วงจรรนับ (Counter) ทำการวัดจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณอินพุตที่เกิดขึ้นในช่วง $T_{G(on)}$ ก็จะทำให้ทราบถึงความถี่ของสัญญาณอินพุตได้โดย

$$T_{in} = \frac{T_{G(on)}}{n} = \frac{1}{2f_G n}$$

จะได้ว่า

$$f_{in} = \frac{1}{T_{in}} = 2nf_G$$

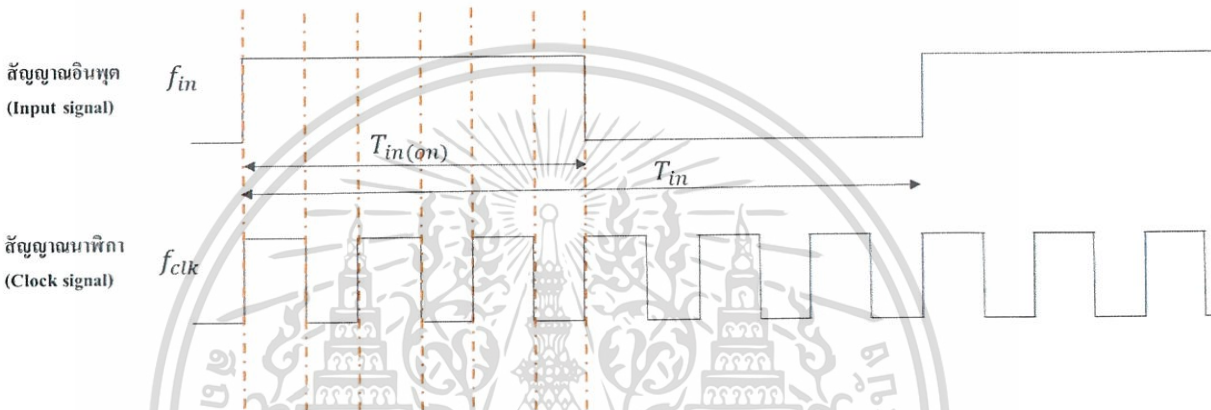
โดยที่ n คือ สัญญาณอินพุตที่เกิดขึ้นใน $T_{G(on)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าวิธีการวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement มีค่าความละเอียด (Resolution) ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณเกิด โดยความละเอียดในเชิงความถี่ (frequency Resolution) สามารถถูกปรับปรุงได้ โดยการลดความถี่ของสัญญาณเกิด อย่างไรก็ตามเนื่องจากคาบของสัญญาณเกิด (T_G) เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดระยะเวลาในการวัด (Temporal Resolution) การลดความถี่ของสัญญาณเกิดจึงส่งผลให้ความเร็วในการวัดช้าลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement

2.4.2 การวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement

มีหลักการดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement

จากรูปความถี่ของสัญญาณอินพุต (f_{in}) เป็นค่าที่ต้องการวัด ในขณะที่สัญญาณนาฬิกา (Clock signal) คือสัญญาณที่ถูกใช้ช่วยในการวัด

จะได้ว่า
$$T_{in} = \frac{1}{f_{in}}$$

กรณีที่สัญญาณอินพุตมีค่า Duty cycle = 50 (%) จะเห็นว่าคาบเวลาในฝั่งซีกบวกของสัญญาณอินพุตจะเท่ากับ

$$T_{in(on)} = \frac{T_{in}}{2} = \frac{1}{2f_{in}}$$

ซึ่งเมื่อเราใช้วงจรนับ (Counter) ทำการวัดจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณนาฬิกาที่เกิดขึ้นในช่วง $T_{in(on)}$ ก็จะทำให้ทราบถึงความถี่ของสัญญาณนาฬิกาได้โดย

$$T_{clk} = \frac{T_{in(on)}}{n} = \frac{1}{2f_{in}n}$$

จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $f_{clk} = 2nf_{in}$ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ n คือ สัญญาณนาฬิกาที่เกิดขึ้นใน $T_{in(on)}$

จะเห็นได้ว่าวิธีการวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement จะมีค่าความละเอียด (Resolution) ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณอินพุต แต่จะขึ้นอยู่กับจำนวนความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการวัด (Temporal Resolution) จะช้าหรือเร็วจะขึ้นอยู่กับความถี่สัญญาณนาฬิกา ซึ่งสามารถกำหนดเองได้ ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีการวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



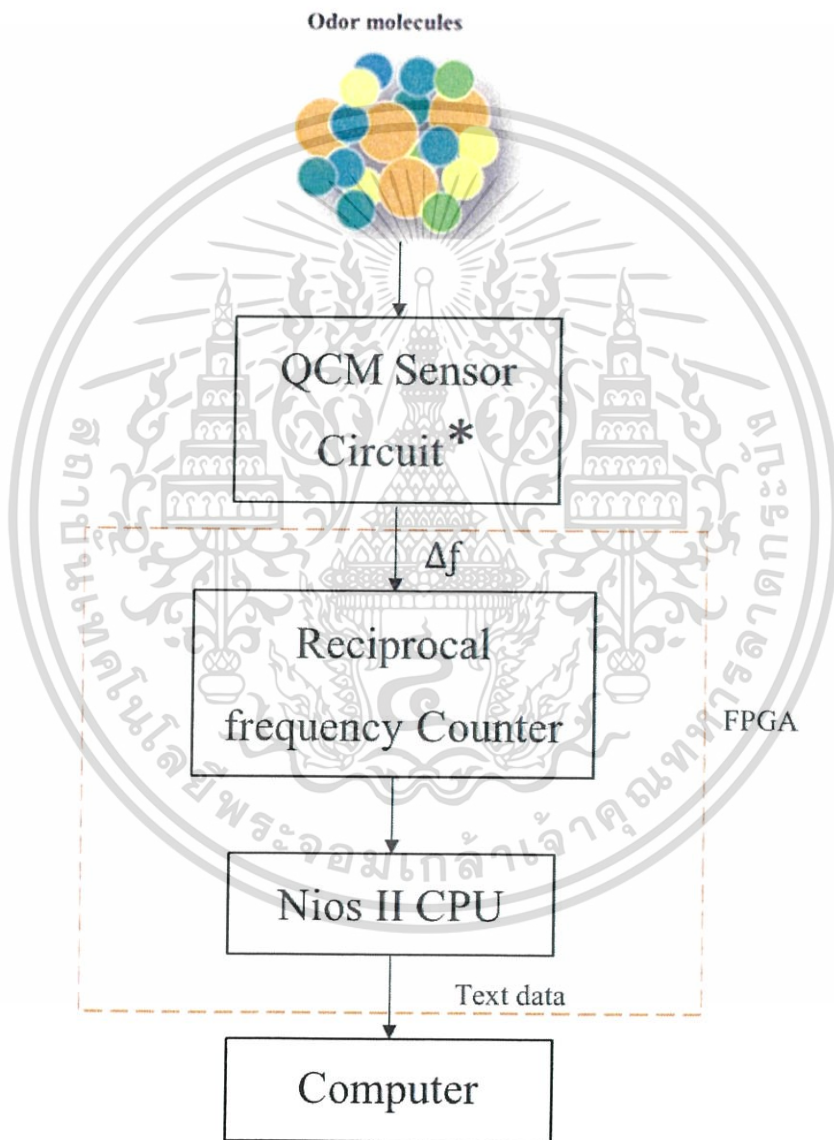
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โครงสร้างและการออกแบบ

3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดกลิ่นที่ออกแบบ

ในโครงงานนี้จะทำการออกแบบเครื่องวัดกลิ่นโดยใช้ QCM (Quartz Crystal Microbalance) เซ็นเซอร์ เพื่อให้สามารถวัดกลิ่นได้ในเชิงตัวเลข โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1



*QCM Sensor Circuit is an Oscillator Circuit with a QCM Sensor

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดกลิ่นที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

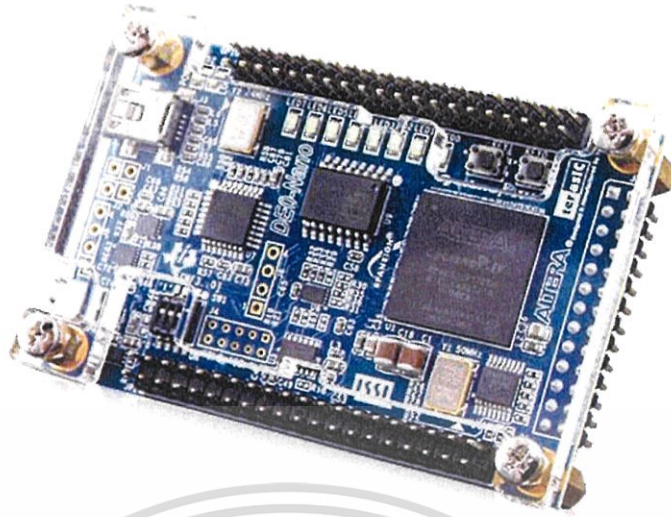
QCM เซ็นเซอร์จะถูกติดอยู่กับวงจรรอสซิลเลเตอร์ เมื่อโมเลกุลของกลิ่นในอากาศลอยมาสัมผัสกับผิวของ QCM เซ็นเซอร์ จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรรอสซิลเลเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความถี่จะสามารถวัดได้โดยการใช้วงจรวัดความถี่ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ วงจรวัดความถี่แบบ Direct frequency measurement และ วงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement อย่างไรก็ตาม ในปริณญาณิพนธ์นี้เราได้เลือกใช้ วงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency measurement เพื่อให้ได้ความละเอียดสูงทั้งในเชิงความถี่ (Frequency resolution) และในเชิงเวลา (Temporal resolution) กล่าวคือวงจรวัดความถี่จะสามารถวัดความถี่ได้อย่างละเอียดและมีความไวในการวัดที่รวดเร็ว ค่าความถี่ที่วัดได้จะถูกส่งไปยัง CPU เพื่อทำการประมวลผลและส่งค่าต่อไปยังคอมพิวเตอร์ในรูปแบบ text file ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม โดยวงจรวัดความถี่และ CPU จะถูกสร้างลงบน FPGA โดย CPU ที่สร้างจะเป็น Soft CPU เรียกว่า Nios II

3.2 บอร์ด FPGA ที่ใช้

ในส่วนของการออกแบบฮาร์ดแวร์ของวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency Counter Nios II CPU ลงบน FPGA นั้นทำโดยใช้บอร์ด FPGA รุ่น DE0-Nano ของบริษัท Teras IC ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดย บอร์ด DE0-Nano มีคุณสมบัติดังนี้

- Altera Cyclone® IV EP4CE22F17C6N FPGA
- Spansion EPCS64
- 32MB SDRAM
- 2Kb I2C EEPROM
- On-board 50MHz clock oscillator

โดยทำการออกแบบวงจรทั้งหมดด้วยซอฟต์แวร์ Quartus II Web Edition 14.1.0.186 ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows 7 Professional 64 บิต



รูปที่ 3.2 บอร์ด DE0-Nano [DE0-Nano User Manual]

3.3 การออกแบบวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter

วงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter ที่ออกแบบมีโครงสร้างดังในรูปที่ 3.3

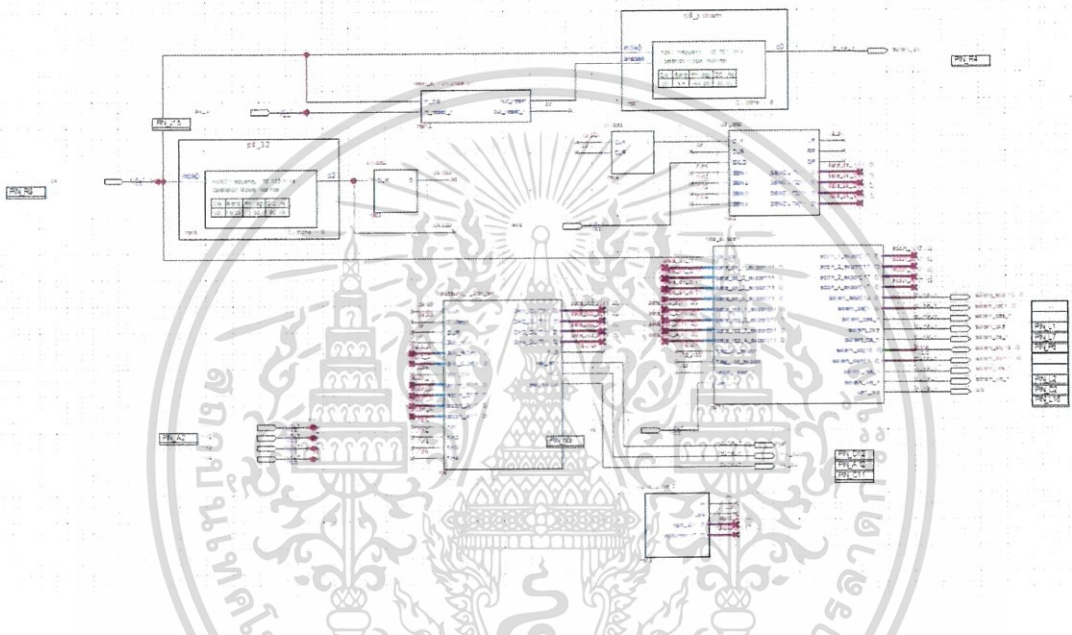


รูปที่ 3.3 วงจร Reciprocal frequency counter ที่ได้ออกแบบ

จากวงจร Reciprocal frequency counter ที่ได้ออกแบบในรูปที่ 3.3 สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณที่ได้มาจาก QCM เซ็นเซอร์ มีความถี่ 20 MHz จากนั้นสัญญาณที่ได้จะผ่านวงจรรหารความถี่จะได้ความถี่ประมาณ 1 MHz จากนั้นสัญญาณจะไปผ่านวงจรมิกเซอร์เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเป็นอีกส่วนไว้สำหรับการชั่งน้ำหนักการชั่งน้ำหนักนั้น เมื่อสัญญาณได้เข้าไปถึงระดับของสัญญาณที่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

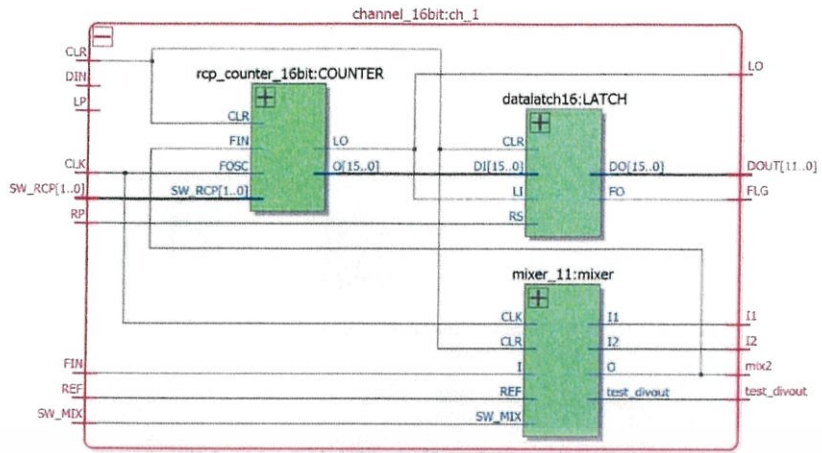
อ้างอิงขนาด 1.004 MHz ได้ผลลัพธ์เป็นผลต่างโดยสัญญาณมีความถี่ 4KHz ต่อมาสัญญาณนี้จะไปผ่านวงจรหารความถี่อีกครั้ง แล้วจึงจะผ่านวงจร Reciprocal frequency counter ได้ผลลัพธ์เป็นจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณ หลังจากนั้นผลลัพธ์จะถูกส่งไปทำการประมวลผลโดย Nios II เมื่อทำการประมวลผลเสร็จเรียบร้อยแล้ว เอาท์พุทที่ได้จะเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขและจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงออกมาทางจอภาพ

จากรูปที่ 3.5 เป็นรูปแสดงวงจรที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1 ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรเฟสล็อกคัลป์ วงจรหารความถี่ วงจรรีเซตอะซิงโครนัส วงจรวงจร Reciprocal frequency counter และ NiosII ส่วนรูปที่ 3.4 เป็นภาพที่แสดงถึงวงจรภายในที่ได้ออกแบบแล้ว

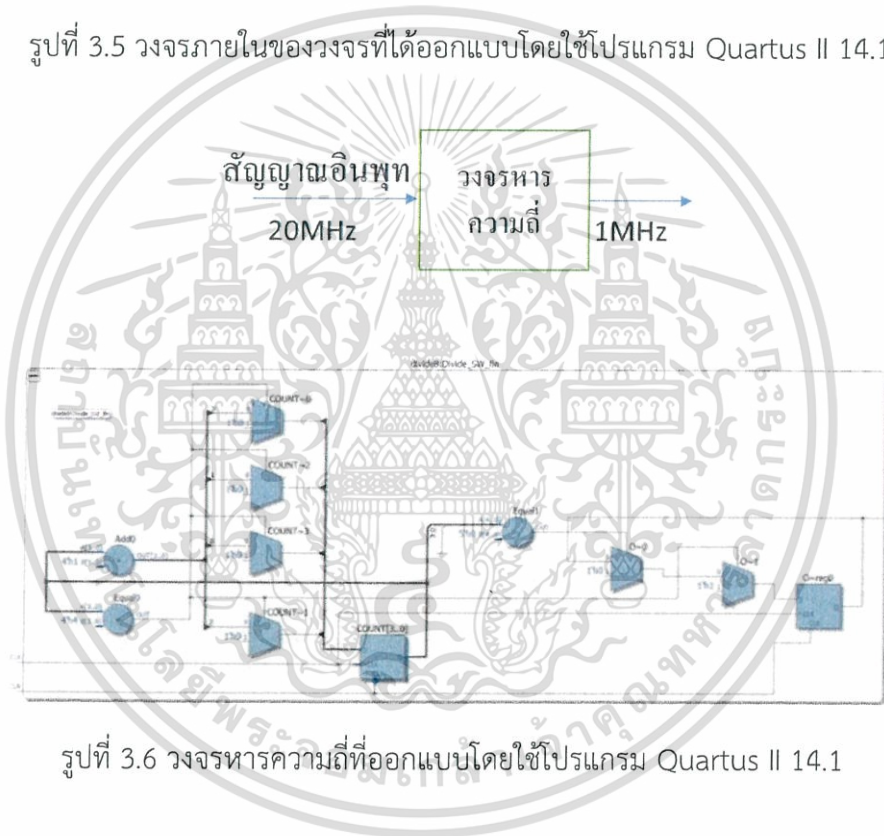


รูปที่ 3.4 วงจรที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3 จะสามารถออกแบบวงจรดิจิทัลโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1 จากรูปที่ 3.6 3.7 3.8 และ 3.9 จะเป็นวงจรหารความถี่ วงจรมิกเซอร์ วงจรเกทควบคุมและวงจรรนับ Reciprocal frequency counter และ Nios II CPU ตามลำดับ ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1

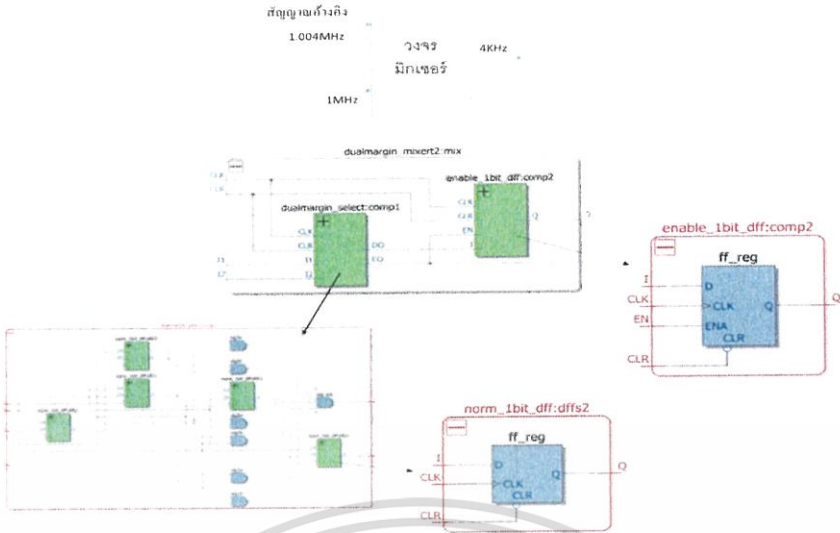


รูปที่ 3.5 วงจรภายในของวงจรที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1

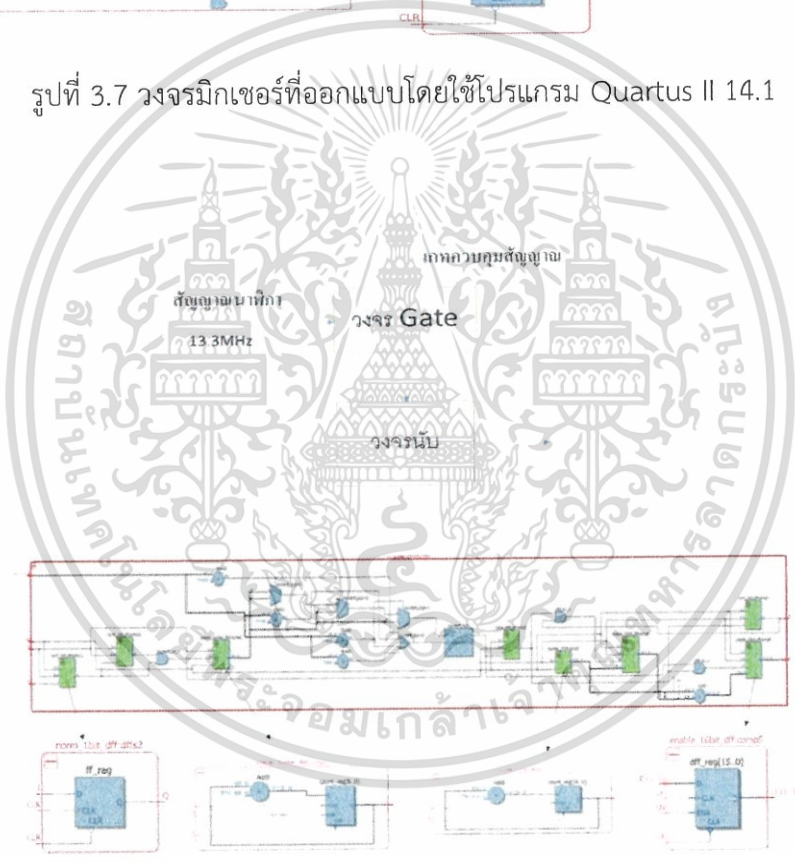


รูปที่ 3.6 วงจรรหารความถี่ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

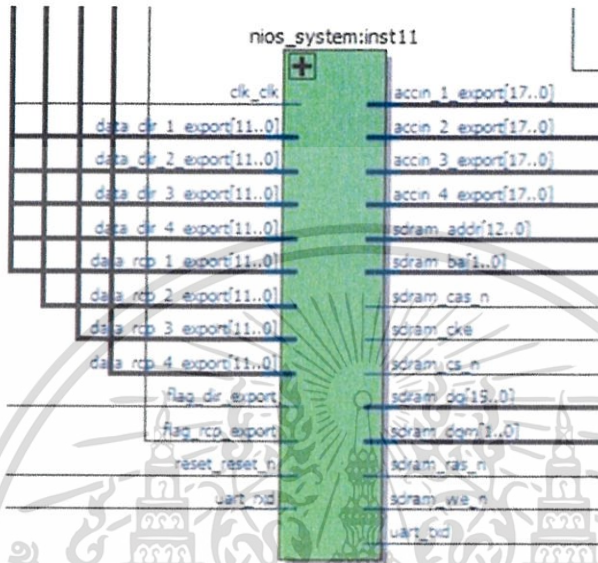


รูปที่ 3.7 วงจรมิกเซอร์ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1



รูปที่ 3.8 วงจรเกตควบคุมและวงจรมิกเซอร์ Reciprocal frequency counter ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 Nios II CPU ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Quartus II 14.1

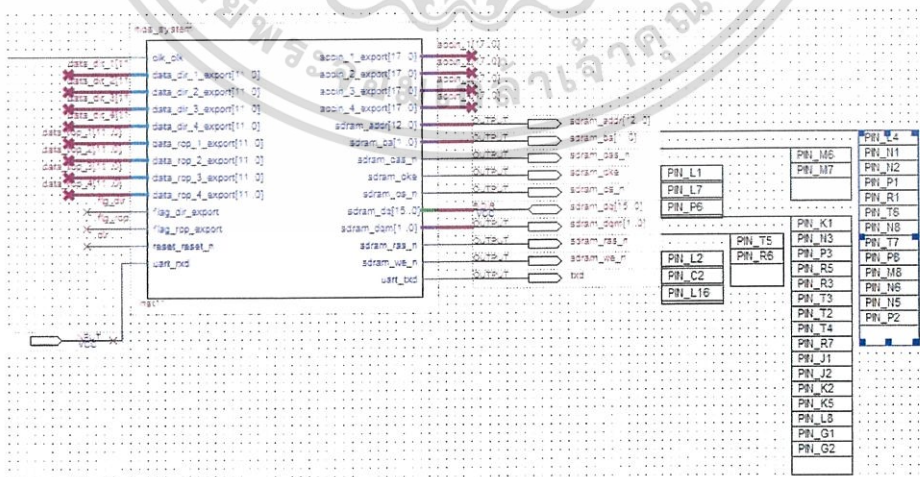
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบ CPU ของวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter ลงบน FPGA

CPU ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์บน Altera Cyclone IV FPGA ที่มีชื่อว่า Nios II CPU จะต้องทำการออกแบบผ่านโปรแกรมที่ชื่อว่า Quartus II โดยใช้ Tools ที่ชื่อว่า Qsys ในการกำหนดค่าต่างๆของ CPU และฟังก์ชันการทำงานต่างๆของ FPGA ที่จำเป็นสำหรับการสร้าง Nios II CPU หลังจากนั้นก็ทำการสร้างสัญลักษณ์แผนภาพ block diagram ของ Nios II CPU เพื่อทำงานร่วมกับส่วนของวงจรวัดความถี่ต่อไป

Use	C...	Name	Description	Export	Clock	Base	End	IRQ
<input checked="" type="checkbox"/>		clk	Clock Source		exported			
<input checked="" type="checkbox"/>		cpu	Nios II (Classic) Processor		clk	0x0400_4800	0x0400_4fff	
<input checked="" type="checkbox"/>		sdram	SDRAM Controller		clk	0x0200_0000	0x03ff_ffff	
<input checked="" type="checkbox"/>		jtag_to_fpga_bri...	JTAG to Avalon Master Bridge		clk			
<input checked="" type="checkbox"/>		onchip_sram	On-Chip Memory (RAM or ROM)		multiple	multiple	multiple	
<input checked="" type="checkbox"/>		onchip_sram_2	On-Chip Memory (RAM or ROM)		clk	multiple	multiple	
<input checked="" type="checkbox"/>		jtaguart	JTAG UART		clk	0x0400_5108	0x0400_510f	
<input checked="" type="checkbox"/>		uart	UART (RS-232 Serial Port)		clk	0x0400_5000	0x0400_501f	
<input checked="" type="checkbox"/>		sysid	System ID Peripheral		clk	0x0400_5100	0x0400_5107	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_rcp_1	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_50f0	0x0400_50ff	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_rcp_2	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_50d0	0x0400_50df	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_rcp_3	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_50c0	0x0400_50cf	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_rcp_4	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_50b0	0x0400_50bf	
<input checked="" type="checkbox"/>		flag_rcp	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_50e0	0x0400_50ef	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_dir_1	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_50a0	0x0400_50af	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_dir_2	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5090	0x0400_509f	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_dir_3	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5080	0x0400_508f	
<input checked="" type="checkbox"/>		data_dir_4	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5070	0x0400_507f	
<input checked="" type="checkbox"/>		flag_dir	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5060	0x0400_506f	
<input checked="" type="checkbox"/>		accin_1	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5050	0x0400_505f	
<input checked="" type="checkbox"/>		accin_2	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5040	0x0400_504f	
<input checked="" type="checkbox"/>		accin_3	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5030	0x0400_503f	
<input checked="" type="checkbox"/>		accin_4	PIO (Parallel I/O)		clk	0x0400_5020	0x0400_502f	

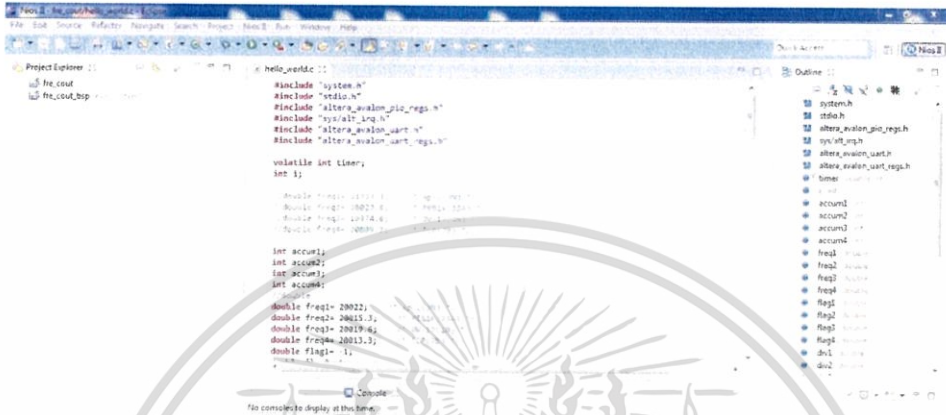
รูปที่ 3.10 การออกแบบ Nios II CPU ผ่าน Quartus II โดยใช้ Tools Qsys



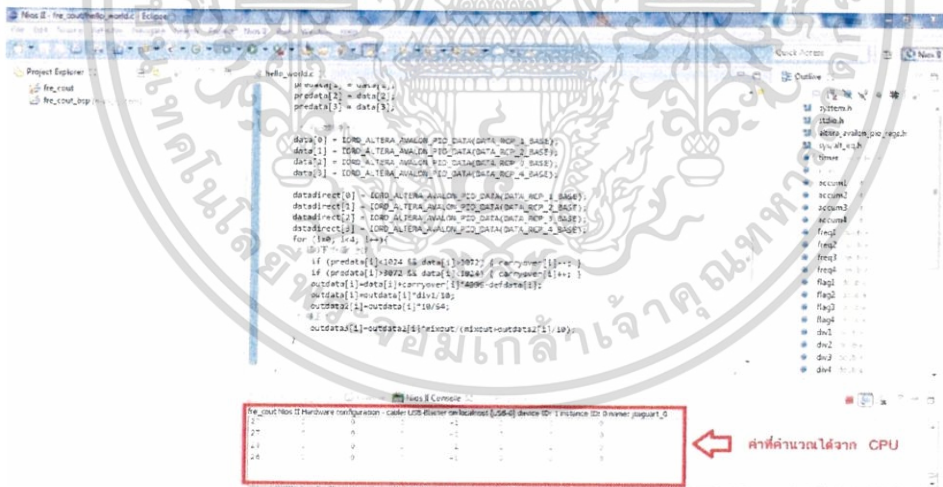
รูปที่ 3.11 แผนภาพ block diagram ของ Nios II CPU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการออกแบบส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ของ Nios II CPU เสร็จเรียบร้อยแล้วจะเป็นการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของตัว CPU โดยจะเป็นการเขียนโค้ดภาษา C ผ่านโปรแกรม Nios II EDS โดยใช้ tools nios ii software build tools for eclipse เพื่อทำการคำนวณค่าความถี่ที่ส่งมาจากส่วนวงจรดิจิทัล และทำการแสดงค่าผ่านหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.12 หน้าตาการโปรแกรมของ nios ii software build tools for eclipse

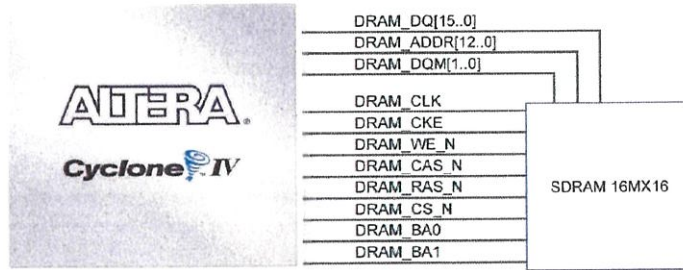


รูปที่ 3.13 หน้าจอที่แสดงผลค่าที่คำนวณได้จาก CPU

3.5 การโปรแกรมวงจรที่ออกแบบลงใน SDRAM

เนื่องจากในงานนี้ขนาดของโปรแกรมที่ทำการสร้างมีขนาดมากกว่า on-chip memory ของ Altera Cyclone IV FPGA จึงได้ทำการโปรแกรมลงบน SDRAM Memory ของบอร์ด DE0-Nano แทน โดยมีหน่วยความจำขนาด 32 MB โดยมีการเชื่อมต่อข้อมูลแบบ 16 bit กับ Altera Cyclone IV FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่าง FPGA และ SDRAM [DE0-Nano User Manual]

โดยการใช้งาน SDRAM จำเป็นต้องใช้สัญญาณนาฬิกาที่ นำสัญญาณนาฬิกาของส่วนวงจรดิจิทัลและ CPU อยู่ -3ns เพื่อเตรียมการทำงานก่อนส่วนอื่น จึงต้องมีการใช้ Phase lock loop ในการปรับสัญญาณ



รูปที่ 3.15 วงจร Phase lock loop ที่ใช้กับ SDRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ผลการโปรแกรมวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal frequency counter ลงบนบอร์ด FPGA

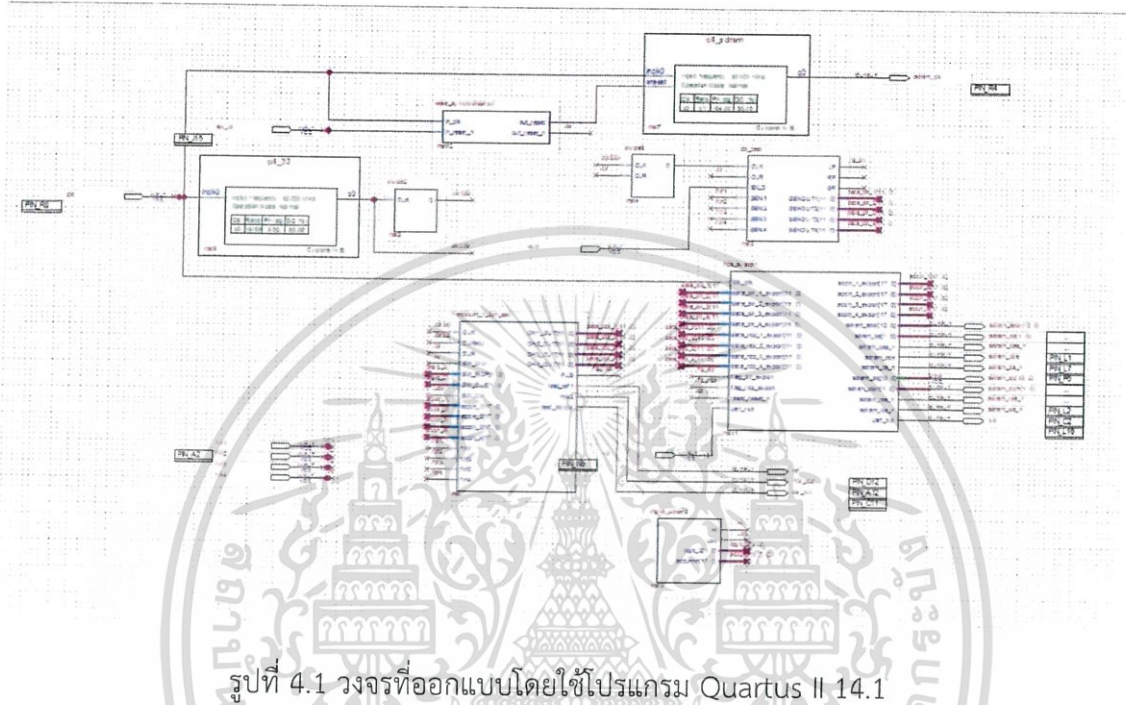


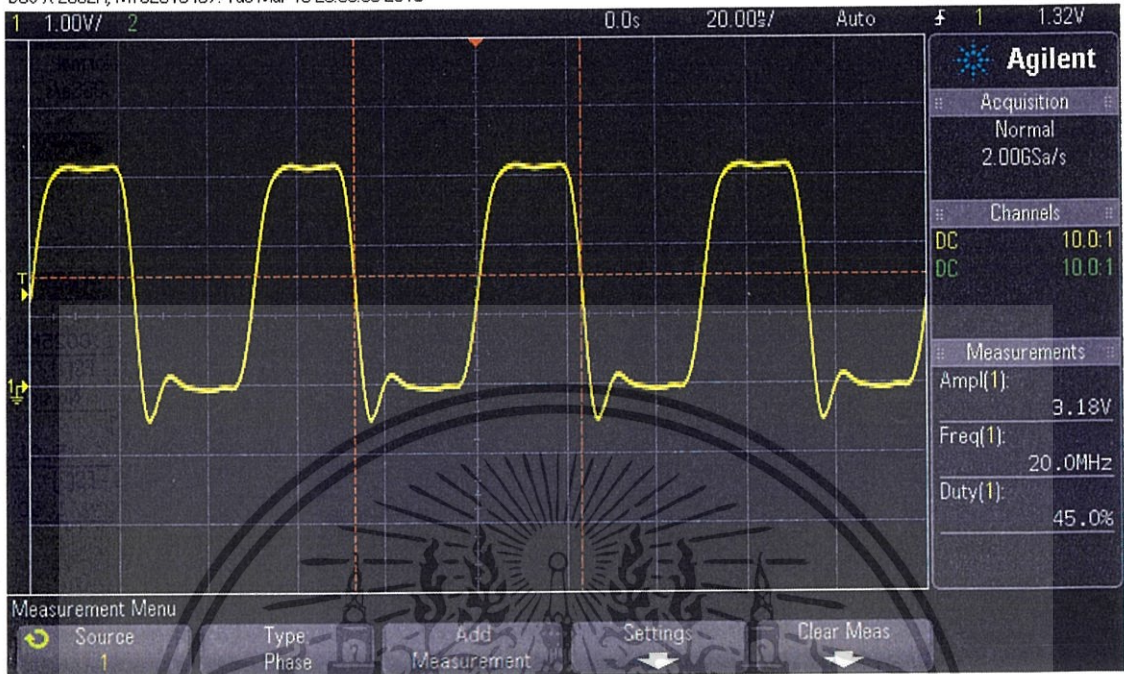
Table of Contents		Flow Summary	
Flow Summary		Flow Status	Successful - Tue Apr 21 20:10:41 2015
Flow Settings		Quartus II 64-Bit Version	14.1.0 Build 186 12/03/2014 SJ Web Edition
Flow Non-Default Global Settings		Revision Name	onechannel
Flow Elapsed Time		Top-level Entity Name	Block3
Flow OS Summary		Family	Cydone IV E
Flow Log		Device	EP4CE22F17C6
Analysis & Synthesis		Timing Models	Final
Fitter		Total logic elements	3,879 / 22,320 (17 %)
Assembler		Total combinational functions	3,500 / 22,320 (16 %)
TimeQuest Timing Analyzer		Dedicated logic registers	2,186 / 22,320 (10 %)
EDA Netlist Writer		Total registers	2255
Flow Messages		Total pins	50 / 154 (32 %)
Flow Suppressed Messages		Total virtual pins	0
		Total memory bits	142,848 / 608,256 (23 %)
		Embedded Multiplier 9-bit elements	0 / 132 (0 %)
		Total PLLs	3 / 4 (75 %)

รูปที่ 4.2 แสดงผลการโปรแกรมวงจรที่ออกแบบลงบนบอร์ด FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

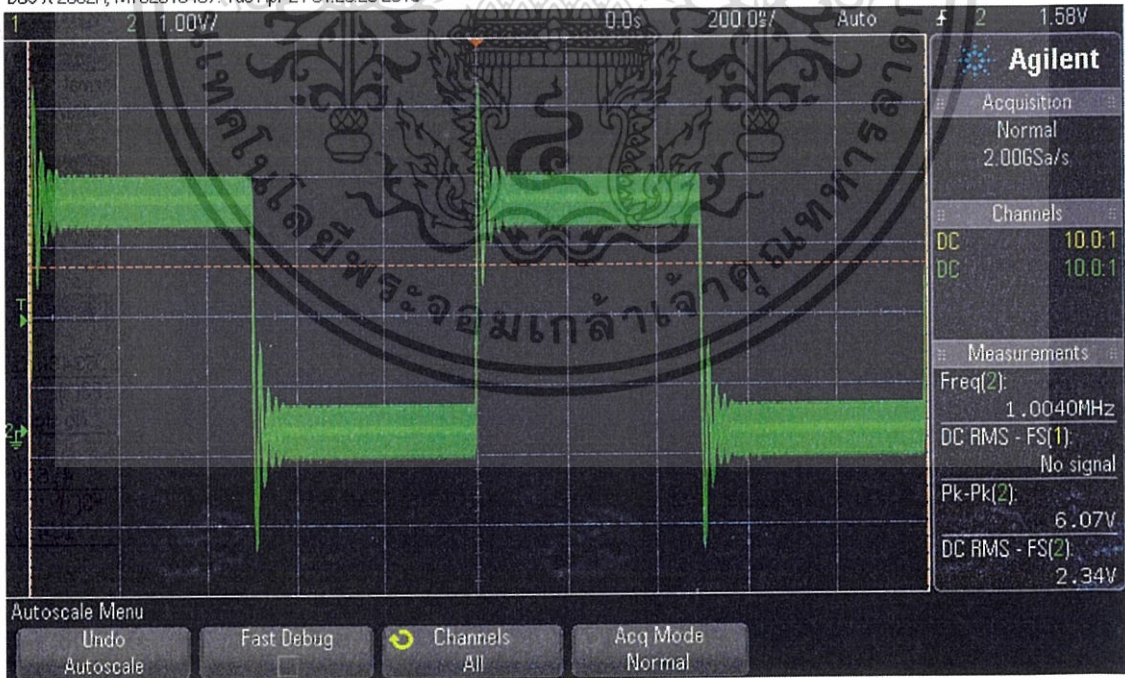
4.2 ผลการวัดสัญญาณจากส่วนต่างๆ ของวงจรที่ออกแบบ

DSO-X 2002A, MY52013457: Tue Mar 10 20:59:03 2015



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จาก QCM Sensor

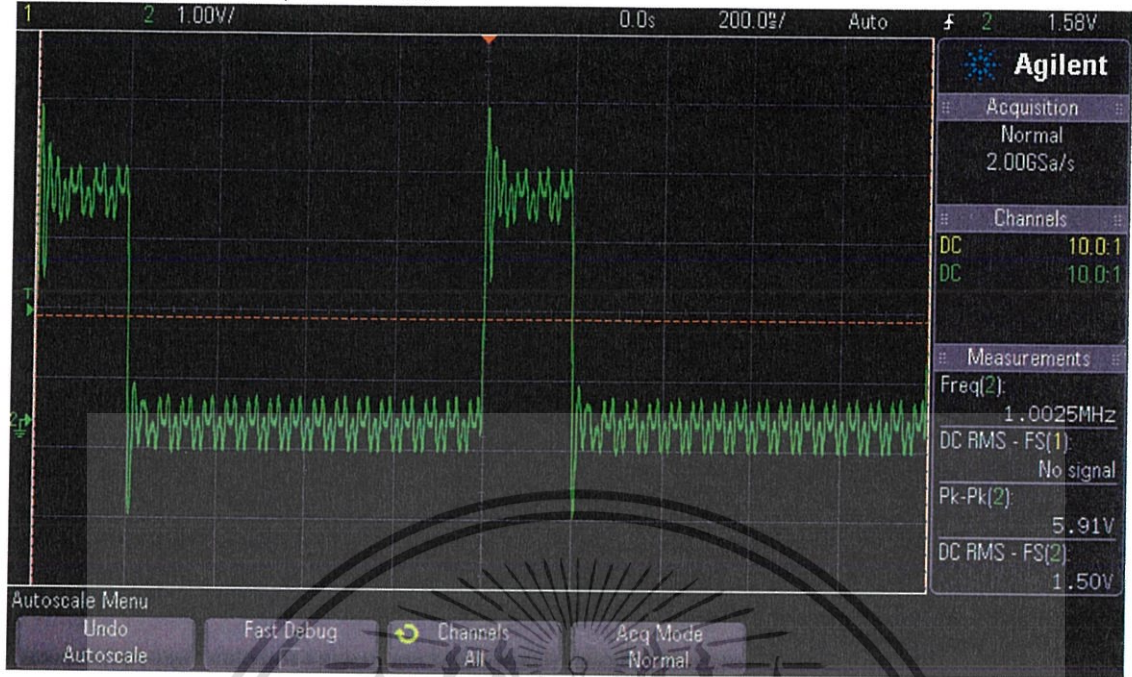
DSO-X 2002A, MY52013457: Tue Apr 21 01:23:26 2015



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จากสัญญาณอ้างอิง

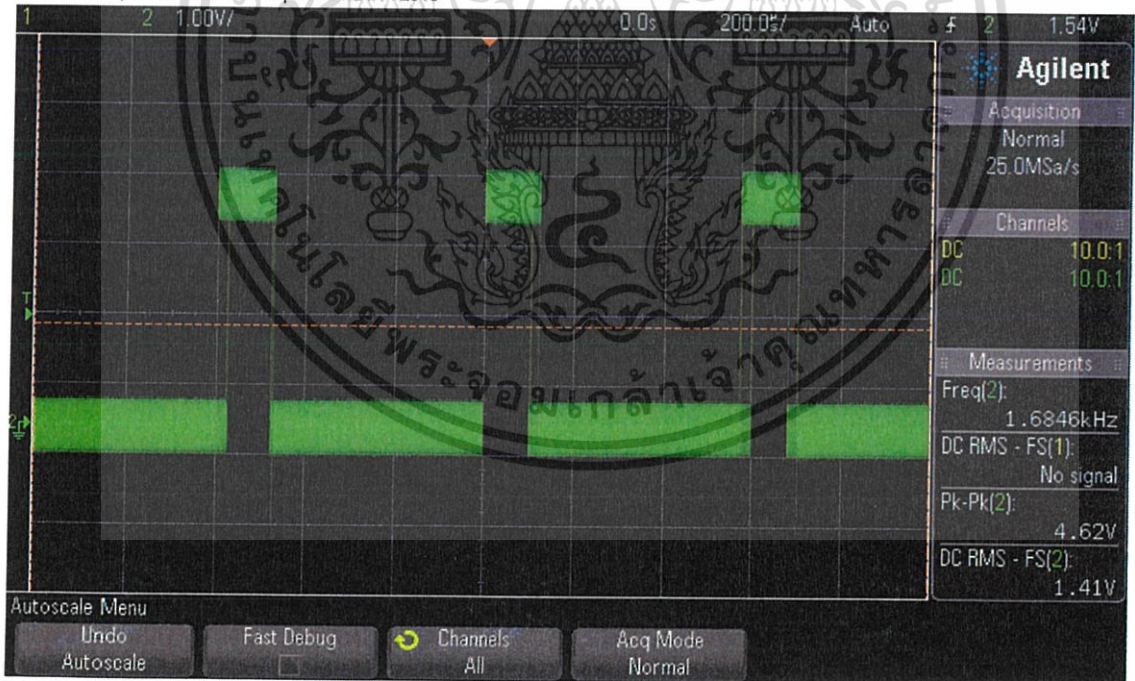
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DSO-X 2002A, MY52013457; Tue Apr 21 01:23:54 2015



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จากสัญญาณอินพุต

DSO-X 2002A, MY52013457; Tue Apr 21 01:24:14 2015



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงค่าความถี่ที่วัดได้จากสัญญาณเอาพุตของวงจรมิกเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองและกราฟแสดงผลจากการทดลอง

ผลการทดลอง

ค่าความถี่ทุกๆวินาทีที่แสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ เมื่อต่อ QCM เซ็นเซอร์เข้ากับวงจรที่พัฒนาขึ้น ทำการบันทึกผลเป็นเวลา 159 วินาที โดยในระหว่างนั้นนำน้ำหอมกลิ่นตระกูลโรสรี่เข้าไปใกล้เซ็นเซอร์ แสดงดังตารางที่ 4.1

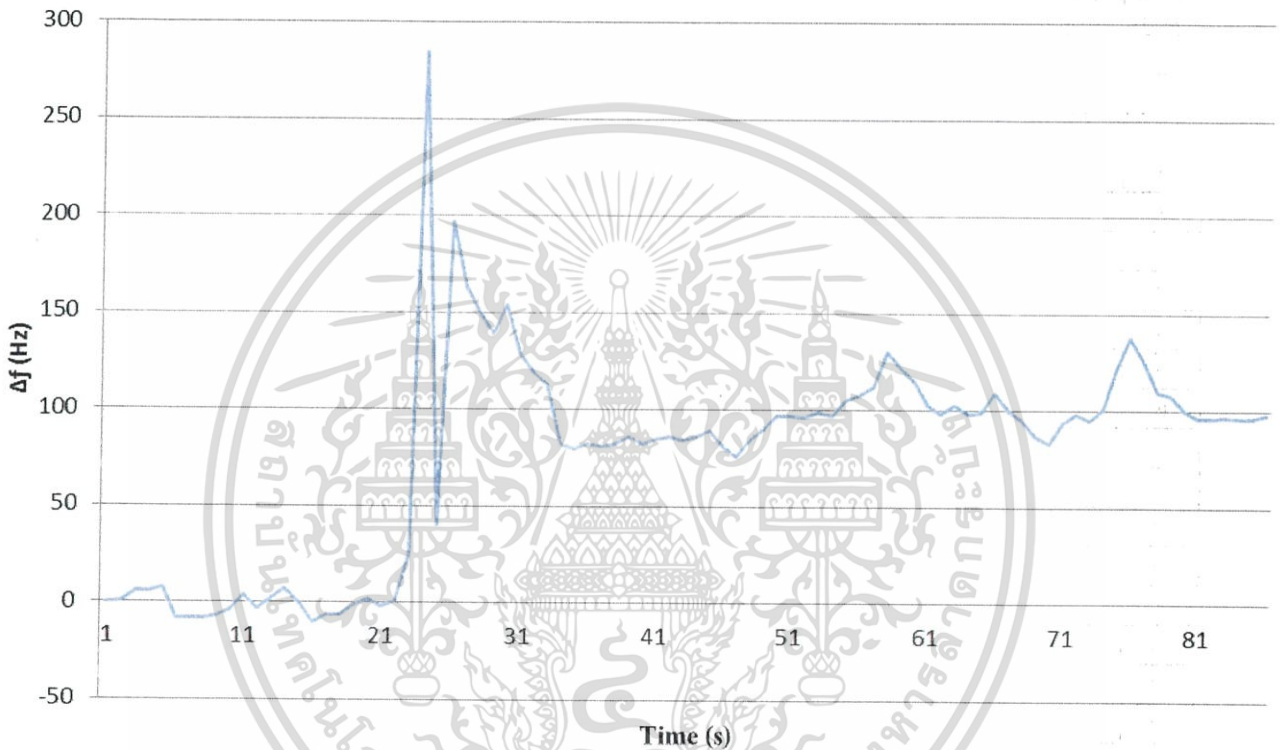
ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ทุกๆวินาทีที่แสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

เวลา(s)	ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz)	เวลา(s)	ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz)	เวลา(s)	ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz)	เวลา(s)	ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz)	เวลา(s)	ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz)
1	-13	37	139	73	79	109	96	145	-46
2	-10	38	126	74	74	110	93	146	-45
3	2	39	115	75	75	111	88	147	-48
4	1	40	130	76	85	112	89	148	-45
5	7	41	105	77	76	113	85	149	-41
6	7	42	95	78	71	114	86	150	-35
7	-8	43	89	79	63	115	87	151	-27
8	-16	44	58	80	59	116	103	152	-20
9	34	45	56	81	70	117	214	153	-31
10	-28	46	58	82	74	118	10	154	-46
11	-24	47	57	83	71	119	-39	155	-44
12	-23	48	58	84	77	120	-37	156	-42
13	-18	49	62	85	98	121	-61	157	-41
14	-18	50	58	86	114	122	-79	158	-44
15	-16	51	61	87	102	123	-74	159	-35
16	-32	52	62	88	86	124	-68		
17	-32	53	60	89	84	125	-53		
18	-32	54	62	90	76	126	-58		
19	-31	55	65	91	72	127	-59		
20	-28	56	57	92	72	128	-58		
21	-20	57	52	93	73	129	-58		
22	-27	58	60	94	72	130	-54		
23	-22	59	66	95	72	131	-56		
24	-17	60	73	96	74	132	-59		
25	-24	61	73	97	72	133	-61		
26	-34	62	72	98	79	134	-59		
27	-30	63	75	99	78	135	-55		
28	-30	64	73	100	74	136	-62		
29	-25	65	81	101	82	137	-61		
30	-22	66	84	102	87	138	-61		
31	-26	67	88	103	93	139	-53		
32	-23	68	106	104	86	140	-51		
33	1	69	98	105	79	141	-47		
34	261	70	91	106	81	142	-49		
35	16	71	79	107	86	143	-53		
36	173	72	74	108	87	144	-53		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 สามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าผลตอบสนองของเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อตัวเซ็นเซอร์ได้รับคลื่นระลอก และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าของเซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยแม้จะไม่มีคลื่นอยู่รอบตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งคาดว่าเป็นผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น ทิศทางลมที่ไม่คงที่ เป็นต้น นอกจากนี้ค่าของเซ็นเซอร์จะไม่ลดกลับสู่ค่าเริ่มแรกก่อนทำการทดลอง คาดว่าเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของคลื่นเกาะติดบนตัวเซ็นเซอร์



รูปที่ 4.7 ค่าความถี่ที่แสดงผลทุกๆวินาที โดยตำแหน่งที่ค่าพุ่งสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเกิดจากจากที่เซ็นเซอร์ได้สัมผัสกับคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาวงจรวัดความถี่แบบ Reciprocal ซึ่งเป็นวงจรหลักในเครื่องวัดคลื่นแบบใช้ QCM เซ็นเซอร์ โดยทำการพัฒนาวงจรลงบนบอร์ด FPGA และทำการประเมินผลโดยต่อเข้ากับ QCM เซ็นเซอร์จริง โดยผลการทดลองยืนยันยืนยันว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของ QCM เซ็นเซอร์ และสามารถส่งค่าวัดได้ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในการทดลองพบว่าหลังจากเซ็นเซอร์ได้รับคลื่นแล้ว ค่าของเซ็นเซอร์จะไม่ลดกลับสู่ค่าเริ่มแรกก่อนทำการทดลอง คาดว่าเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของกลินเกาะติดบนตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งคาดว่าจะสามารถแก้ไขได้โดยการบรรจุเซ็นเซอร์ลงในท่อ ที่ควบคุมทิศทางลมให้เป็นทิศทางเดียว และเพิ่มความเร็วลมในท่อเพื่อให้โมเลกุลของกลินที่เซ็นเซอร์สัมผัสได้แล้วหลุดออกจากตัวเซ็นเซอร์
- การวัดคลื่นในงานนี้สามารถวัดได้เพียงความเข้มข้นของกลินเท่านั้น ยังไม่สามารถแยกแยะชนิดของกลินได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- J. W. Gardner, H. W. Shin and E. L. Hines (2000). An electronic nose system to diagnose illness. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 70, pp. 19-24.
- M. Fleisher, E. Simon, E. Rumpel, H. Ulmer, M. Harbeck, M. Wandel, C. Fietzek, U. Weimar and H. Meixner (2002). Detection of volatile compounds correlated to human diseases through breath analysis with chemical sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 83, pp. 245-249.
- C. Natale, A. Macagnano, E. Martinelli, R. Paolesse, G. D’Arcangelo, C. Roscioni, A. Finazzi-Agro and A. D’Amico (2003). Lung cancer identification by the analysis of breath by means of an array of non-selective gas sensors. *Biosens. Bioelectron.*, 18, pp. 1209-1218.
- J. Bastard and D. Tiran (2006). Aromatherapy and massage for antenatal anxiety: Its effect on the fetus. *Complementary therapies in Clinical Practice*, Vol. 12, pp. 48-54.
- L. Buck and R. Axel (1991). A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition. *Cell*, 65, pp. 175-187.
- T. Davide, M. Holmberg, I. Lundstrom, G. Riva and F. Davide, in: G. Riva, F. Davide (Eds.) (2001). *Virtual olfactory interfaces: Electronic noses and olfactory displays in Communications through Virtual Technologies*, Amsterdam, IOS, pp. 194-220.
- Shepherd, G. M. (2004). “The human sense of smell: Are we better than we think?”. *PLoS Biology*, Vol.2, Issue 5, pp. 572-575.
- K. Touhara (2001). Functionnal cloning and reconstitution of vertebrate odorant receptors. *Life Science*, 68, pp. 2199-2206
- S. Firestein (2001). How the olfactory system make sense of scents. *Nature*, Vol. 413, pp, 211-218.
- L. Turin (1996). A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception. *Chemical Sense*, 21, pp. 779-791.
- L. Turin (2002). A method of the calculation of odor character form molecular structure. *Journal of theoretical biology*, 216, pp. 367-385.
- L. Turin and F. Yosshii (2003). Structure-odor relation: a modern perspective. *Handbook of Olfaction and Gustation*, R. Doty ed., Marcell Dekker, New York.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R. Andrew Russell (1998). Odour detection by mobile robots, World scientific in robotics and intelligent systems, Vol. 22, pp 37-40.

กมลรัตน์ เกษรทอง, (2010). ส่วนประกอบของจมูก. October 10, 2014, Web site:
<https://www.l3nr.org/posts/451822>

DE0-Nano User Manual, Terasic Technologies Inc., 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดขาของบอร์ด DE0-Nano สำหรับใช้งาน SDRAM [DE0-Nano User Manual]

Signal Name	FPGA Pin No.	Description	I/O Standard
DRAM_ADDR[0]	PIN_P2	SDRAM Address[0]	3.3V
DRAM_ADDR[1]	PIN_N5	SDRAM Address[1]	3.3V
DRAM_ADDR[2]	PIN_N6	SDRAM Address[2]	3.3V
DRAM_ADDR[3]	PIN_M8	SDRAM Address[3]	3.3V
DRAM_ADDR[4]	PIN_P8	SDRAM Address[4]	3.3V
DRAM_ADDR[5]	PIN_T7	SDRAM Address[5]	3.3V
DRAM_ADDR[6]	PIN_N8	SDRAM Address[6]	3.3V
DRAM_ADDR[7]	PIN_T6	SDRAM Address[7]	3.3V
DRAM_ADDR[8]	PIN_R1	SDRAM Address[8]	3.3V
DRAM_ADDR[9]	PIN_P1	SDRAM Address[9]	3.3V
DRAM_ADDR[10]	PIN_N2	SDRAM Address[10]	3.3V
DRAM_ADDR[11]	PIN_N1	SDRAM Address[11]	3.3V
DRAM_ADDR[12]	PIN_L4	SDRAM Address[12]	3.3V
DRAM_DQ[0]	PIN_G2	SDRAM Data[0]	3.3V
DRAM_DQ[1]	PIN_G1	SDRAM Data[1]	3.3V
DRAM_DQ[2]	PIN_L8	SDRAM Data[2]	3.3V
DRAM_DQ[3]	PIN_K5	SDRAM Data[3]	3.3V
DRAM_DQ[4]	PIN_K2	SDRAM Data[4]	3.3V
DRAM_DQ[5]	PIN_J2	SDRAM Data[5]	3.3V
DRAM_DQ[6]	PIN_J1	SDRAM Data[6]	3.3V
DRAM_DQ[7]	PIN_R7	SDRAM Data[7]	3.3V
DRAM_DQ[8]	PIN_T4	SDRAM Data[8]	3.3V
DRAM_DQ[9]	PIN_T2	SDRAM Data[9]	3.3V
DRAM_DQ[10]	PIN_T3	SDRAM Data[10]	3.3V
DRAM_DQ[11]	PIN_R3	SDRAM Data[11]	3.3V
DRAM_DQ[12]	PIN_R5	SDRAM Data[12]	3.3V
DRAM_DQ[13]	PIN_P3	SDRAM Data[13]	3.3V
DRAM_DQ[14]	PIN_N3	SDRAM Data[14]	3.3V
DRAM_DQ[15]	PIN_K1	SDRAM Data[15]	3.3V
DRAM_BA[0]	PIN_M7	SDRAM Bank Address[0]	3.3V
DRAM_BA[1]	PIN_M6	SDRAM Bank Address[1]	3.3V
DRAM_DQM[0]	PIN_R6	SDRAM byte Data Mask[0]	3.3V
DRAM_DQM[1]	PIN_T5	SDRAM byte Data Mask[1]	3.3V
DRAM_RAS_N	PIN_L2	SDRAM Row Address Strobe	3.3V
DRAM_CAS_N	PIN_L1	SDRAM Column Address Strobe	3.3V
DRAM_CKE	PIN_L7	SDRAM Clock Enable	3.3V
DRAM_CLK	PIN_R4	SDRAM Clock	3.3V
DRAM_WE_N	PIN_C2	SDRAM Write Enable	3.3V
DRAM_CS_N	PIN_P6	SDRAM Chip Select	3.3V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้