

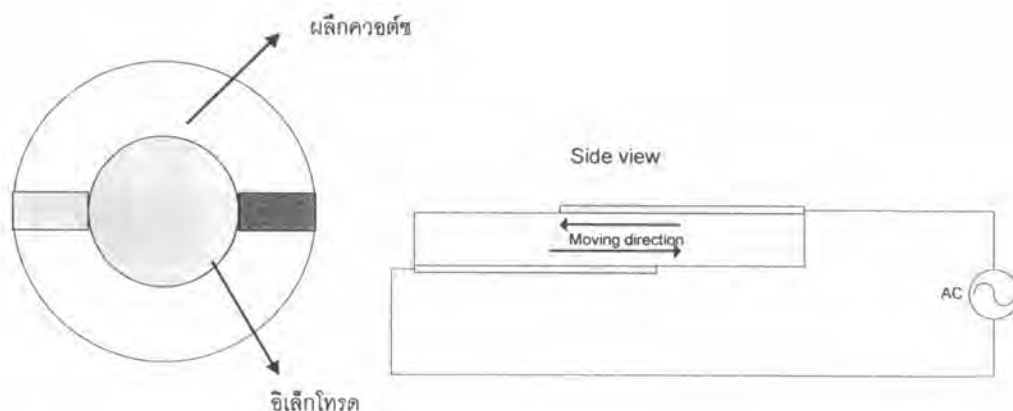
## บทที่ 2

### หลักการและระบบตรวจวัดเซลล์ด้วยตัวตรวจวัดแบบ QCM

จากรายงานต่างๆที่กล่าวในบทนำได้ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำ QCM มาใช้ในการวัดเซลล์ได้ อย่างไรก็ตามการออกแบบการวัดที่ดีได้นั้นควรมีความเข้าใจในเรื่องการทำงานของ QCM เป็นอันดับแรก เพื่อที่จะนำหลักการนี้มาประดิษฐ์วงจรออสซิลเลเตอร์และออกแบบระบบเพื่อวัดความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ในบทนี้จะกล่าวถึง การทำงานของตัวตรวจวัดแบบ QCM การทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ ระบบวัดปริมาณเซลล์ การทดสอบระบบวัดเบื้องต้น และการนำ QCM มาตรวจวัดจำนวนเซลล์

#### 2.1 การทำงานของตัวตรวจวัดแบบ QCM

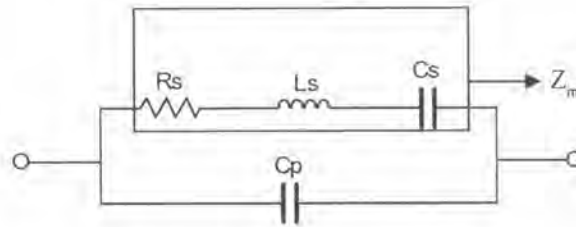
QCM เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่ง ทำจากผลึกควอตซ์ QCM ที่ใช้ทั่วไปเป็นแบบ AT-CUT ซึ่งมีมุมตัด  $35^{\circ}15'$  กับแกนโพลาริซเซชันโดยมีอิเล็กโทรดประกบอยู่ทั้ง 2 ด้าน ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ชนิดนี้เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการสั่น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการสั่นของ QCM เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้

การป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่ QCM ทำให้เกิดการสั่นเป็นคลื่น เรียกว่า “คลื่นเฉือน” (shear wave) สำหรับการวิเคราะห์ QCM นั้นโดยทั่วไปจะวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการสั่นทางกลเป็นการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า โดยสามารถแสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.2 [สำหรับ

รายละเอียดในการแปลงจากการสั่นทางกลเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสามารถดูได้ในหนังสือ  
Principle of Acoustic Devices ของ Velimir M. Ristic [12]]



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของ QCM ขณะอยู่ในอากาศ

โดยที่  $C_p$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ประกบอยู่ที่ทั้ง 2 ด้านของ QCM

$R_s$  คือ ค่าความต้านทาน แทน การสูญเสียพลังงานของ QCM ในขณะสั่น

$L_s$  คือ ตัวเหนี่ยวนำ แทนมวล  $C_s$  คือ ตัวเก็บประจุ แทนพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในขณะสั่น

จากรูปที่ 2.2 สามารถแสดงค่าแอดมิตแดนซ์ได้เป็น

$$Y = j\omega C_p + \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{Z} \quad (2.1)$$

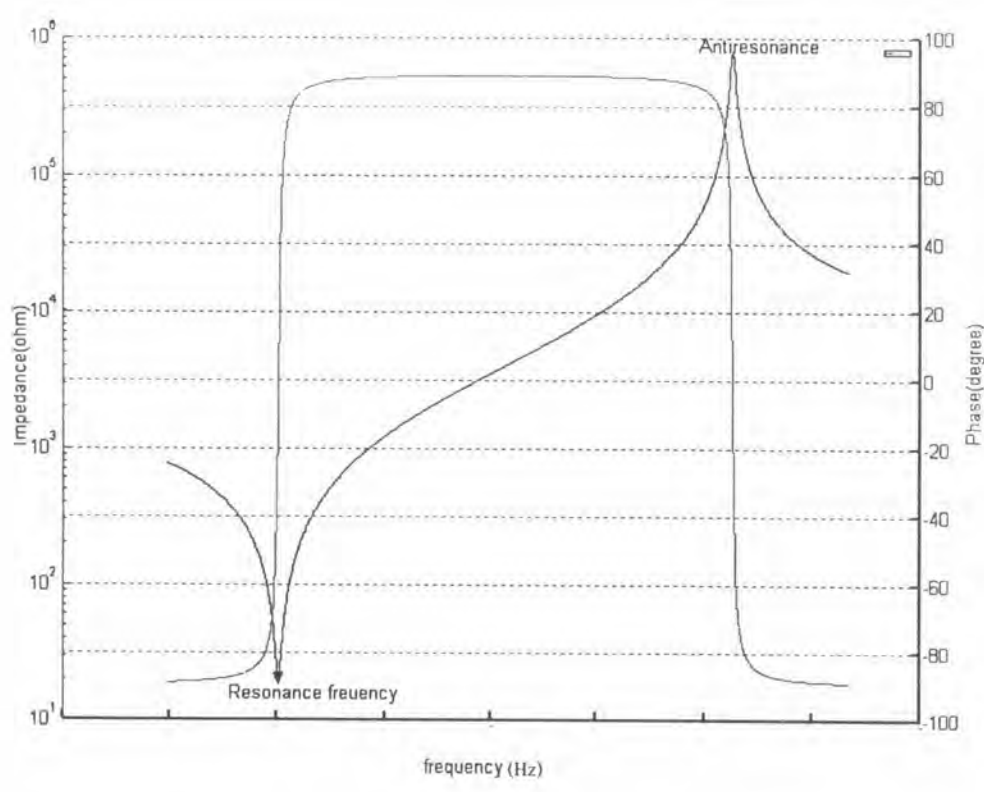
โดยที่  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณไซน์ที่ป้อนให้กับ QCM โดย  $Z_m$  มีค่าเท่ากับ

$$Z_m = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (2.2)$$

เมื่อป้อนสัญญาณไซน์จนถึงความถี่ค่าหนึ่งที่จะทำให้ QCM เกิดค่าแอดมิตแดนซ์สูงสุด ( $Y$ ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเกิดอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ต่ำสุดโดยเรียกความถี่นี้ว่า “ความถี่เรโซแนนซ์” ซึ่งมีค่าดังสมการที่ 2.3

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (2.3)$$

โดยที่  $f_0$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของ QCM เมื่ออยู่ในอากาศ



รูปที่ 2.3 อิมพีแดนซ์ และมุมเฟสของ QCM ในช่วง ความถี่เรโซแนนซ์ และแอนติเรโซแนนซ์

### 2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลกับความถี่เรโซแนนซ์

เมื่อมีมวลมาเกาะที่ผิวของ QCM จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการสั่น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลที่มาเกาะกับผิวของ QCM กับ ความถี่เรโซแนนซ์ ตามสมการของ Sauerbrey [7] (ภาคผนวก ก)

$$\Delta f_s = -\frac{2f_0^2 \Delta m}{A\sqrt{\rho_q \mu_q}} \quad (2.4)$$

โดยที่

$\Delta f_s$  คือ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลง (Hz)

$f_0$  คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ตั้งต้น (Hz)

$\Delta m$  คือ มวลที่มายึดเกาะผิวของ QCM (g)

$A$  คือ พื้นที่ของอิเล็กโทรด ( $\text{cm}^2$ )

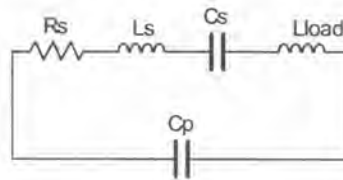
$\rho_q$  คือ ความหนาแน่นของ QCM ( $2.648 \text{ g/cm}^3$ )

$\mu_q$  คือ ค่าความเฉื่อยของ QCM ( $2.947 \times 10^{11} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^2$ )

เมื่อแทนค่าคงที่แล้วจัดรูปสมการจะได้สมการเป็น

$$\Delta f_s = -\frac{2.264 \times 10^{-6} f_0^2 \Delta m}{A} \quad (2.5)$$

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์นี้สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของ QCM เมื่อมีมวลยึดเกาะบริเวณพื้นผิวโดยที่ Load แทนการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์เมื่อมีมวลมาเกาะบนผิวของ QCM

สำหรับเงื่อนไขที่จะทำให้สมการ 2.5 เป็นจริงได้ วัตถุที่มาเกาะบนผิวของ QCM ต้องมีลักษณะดังนี้

1. เป็นฟิล์มบางและเป็นวัตถุที่แข็ง (rigid mass)
2. ไม่เกิดการสั่นไถลในขณะที่ QCM สั่น
3. มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวของอิเล็กโทรด

### 2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวกับความถี่เรโซแนนซ์

QCM เมื่อนำไปใช้กับของเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าความเหนียวน้ำ ( $L_s$ ) และความต้านทาน ( $R_s$ ) ในวงจรสมมูล โดยสามารถแสดงวงจรสมมูลใหม่ได้ในรูปที่ 2.5 โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวกับความถี่เรโซแนนซ์ ตามสมการของ Kanazawa [8] (ภาคผนวก ก)

$$\Delta f_L = -f_0^{3/2} \left( \frac{\rho_L \eta_L}{\pi \rho_q \mu_q} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

$$R_L = \frac{\omega_0 L_s (2\omega \rho_L \eta_L)^{1/2}}{\pi (\rho_q \mu_q)^{1/2}} \quad (2.7)$$

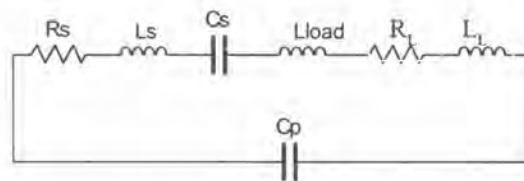
โดยที่

$\rho_L$  คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว ( $\text{g/cm}^3$ )

$\eta_L$  คือ ค่าความหนืดของของเหลว ( $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$ )

$R_L$  คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในวงจรสมมูลของ QCM เมื่อพื้นผิว QCM สัมผัสกับของเหลว (Ohm)

$\omega_0$  คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุมตั้งต้น (rad/s)



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ QCM เมื่ออยู่ในของเหลวและมีมวลยึดเกาะบริเวณพื้นผิว โดยที่  $L_L$  แทน การเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากความหนืดและความหนาแน่นของของเหลว

$R_L$  แทน การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสั่นของ QCM ในของเหลว

สำหรับเงื่อนไขที่จะทำให้สมการ (2.6) เป็นจริงได้ ของเหลวที่สัมผัสกับผิวของ QCM นั้นต้องมีความสูงมากกว่าระยะ skin depth ที่คลื่นเคลื่อนเคลื่อนที่ไปในของเหลว ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้ QCM ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 12 MHz มีระยะ skin depth ในน้ำ เท่ากับ  $0.16 \mu\text{m}$  [8]

## 2.2 การวัดผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมวลที่เกาะที่ผิวของ QCM และ/หรือ เนื่องจากการที่ QCM สัมผัสกับของเหลว

เมื่อ QCM มีมวลมาเกาะ และ/หรือสัมผัสกับของเหลว จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลตามหัวข้อ 2.1 การตรวจการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

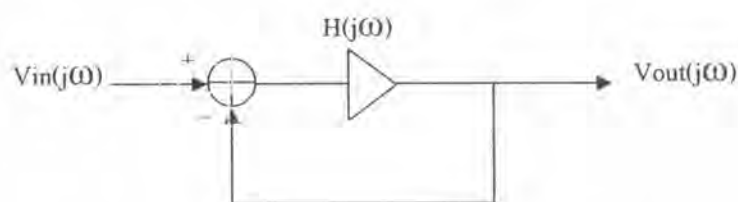
1. ใช้เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ วิธีนี้จะสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงค่าวงจรสมมูลของ QCM ได้ทั้งหมด และเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เครื่องมือมีราคาแพง อีกทั้งมีขนาดใหญ่ และให้ผลตอบสนองต่อความถี่ได้ช้ากว่าวิธีอื่น

2. การวัดผลตอบของ QCM เมื่อใส่สัญญาณสี่เหลี่ยม หรือสัญญาณอิมพัลส์ให้กับ QCM วิธีนี้สามารถดูการเปลี่ยนค่าวงจรสมมูลของ QCM ได้ แต่วิธีนี้ก็มีความผิดพลาดเนื่องจากการสร้างสัญญาณอิมพัลส์ หรือสัญญาณสี่เหลี่ยมที่เที่ยงตรงเป็นไปได้ยาก

3. วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวิธีที่มีความว่องไวมีราคาประหยัด แม้จะไม่สามารถดูการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในของ QCM ได้ แต่สามารถดูผลตอบเป็นความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ในการตรวจสอบ โดยมีหลักการทำงานดังนี้

### 2.2.1 หลักการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ คือ วงจรที่ทำหน้าที่ทำให้ QCM เกิดการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ หรือความถี่ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์ โดยวงจรออสซิลเลเตอร์จะมีบล็อกไดอะแกรมดังรูป 2.6 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนขยาย  $H(j\omega)$  และ ส่วนป้อนกลับจาก  $V_{out}$  ไปยัง  $V_{in}$  โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{out}$  กับ  $V_{in}$  ได้ดังสมการ 2.8



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์

$$V_{out}(j\omega) = (V_{in}(j\omega) - V_{out}(j\omega))H(j\omega) \quad (2.8)$$

โดยที่  $V_{in}$  คือ สัญญาณรบกวน(noise) ที่เข้ามาในวงจรออสซิลเลเตอร์

เริ่มแรก  $V_{out}$  ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อมีสัญญาณรบกวน (noise) เข้ามาสู่วงจร วงจรจะเริ่มขยายสัญญาณ ( $H(j\omega) > 1$ ) และป้อนกลับจนสัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่จะถือว่า  $V_{in}$  มีค่าเล็กมาก เมื่อเทียบกับ  $V_{out}$  และได้สมการที่เลขค่า  $V_{in}$  ดังสมการที่ 2.9

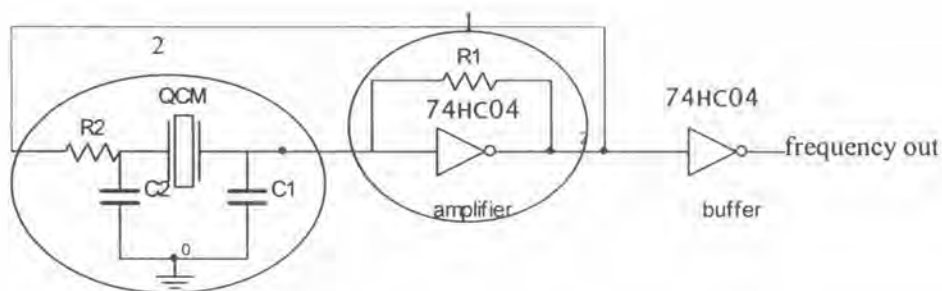
$$V_{out}(j\omega) = (-V_{out}(j\omega))H(j\omega) \quad (2.9)$$

ฟังก์ชันการขยาย  $H(j\omega)$  นี้มีสถานะไม่เชิงเส้นและมีการลดอัตราขยายลงเรื่อยๆ ท้ายสุดเมื่อวงจรเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ฟังก์ชันการขยายจะมีค่าเท่ากับ -1 ซึ่งจะทำให้  $V_{out}$  มีค่าคงที่ ลักษณะที่กล่าวมานี้สามารถเขียนเป็นเงื่อนไขของวงจรออสซิลเลเตอร์ในสภาวะสมดุลได้ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 โดยเรียกเงื่อนไขนี้ว่า “Barkhausen criteria” [13]

$$|H(j\omega)| = 1 \quad (2.10)$$

$$\angle H(j\omega) = 180^\circ \quad (2.11)$$

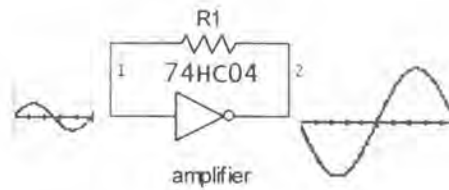
วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้กับ QCM ในวิทยานิพนธ์นี้ ก็ใช้เงื่อนไขดังกล่าว โดยเรียกววงจรออสซิลเลเตอร์นี้ว่า “วงจรออสซิลเลเตอร์แบบ โคพิคต์” ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบ โคพิคต์โดยใช้ IC 74HC04 เป็นตัวขยายสัญญาณ

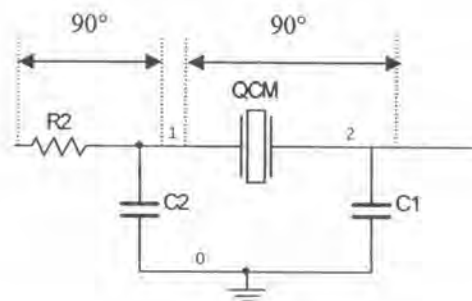
หลักการทำงานของวงจรนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน

1. ส่วนแรกจะใช้ IC เบอร์ 74HC04 เป็นตัวขยายสัญญาณ โดยสัญญาณที่ผ่านนี้จะมีการกลับเฟสไป  $180^\circ$  ส่วนค่า R1 ใช้สำหรับไบแอสให้ IC นี้ทำงานในโหมดการขยายสัญญาณ (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 การขยายสัญญาณของ IC 74HC04

2. ส่วนที่สองประกอบด้วย R2, C2, QCM, C1 ซึ่งในส่วนนี้จะทำให้มีการกลับเฟสอีก  $180^\circ$  (รูปที่ 2.9) โดย R2, C2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านต่ำเพื่อไม่ให้ QCM เกิดการออสซิลเลตในโหมดอื่น โดยการจูนค่า C1 จะสามารถทำให้ QCM มีความถี่ในการสั่นใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของวงจรที่ทำให้เกิดการกลับเฟสอีก  $180^\circ$



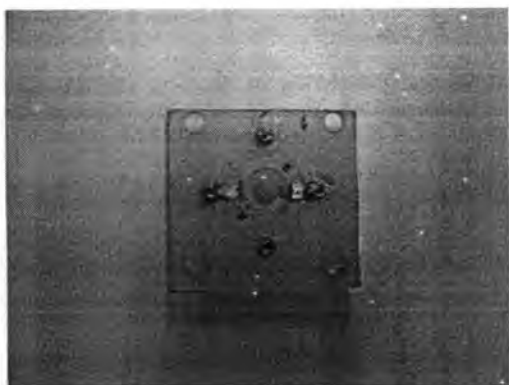
## 2.3 ระบบวัดปริมาณเซลล์

ระบบวัดปริมาณเซลล์นี้ได้ออกแบบส่วนประกอบต่างๆไว้ 3 ส่วน ได้แก่ 1)ห้อง (chamber) ใช้ในการเลี้ยงเซลล์ 2) ระบบประมวลผลและเก็บข้อมูล 3) ระบบควบคุมอุณหภูมิ

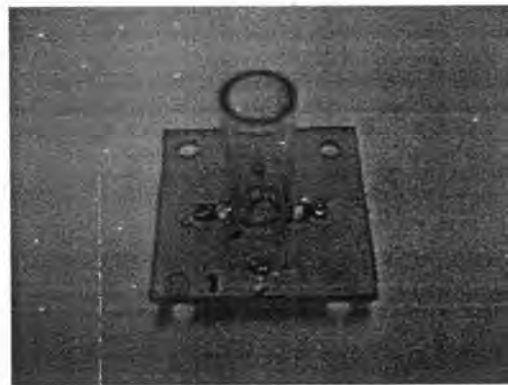
### 2.3.1 ห้อง (chamber) ที่ใช้ในการเลี้ยงเซลล์

เนื่องจากการนำ QCM ที่มีขนาดเล็กมาตรวจวัดปริมาณของเซลล์ซึ่งส่วนใหญ่มีกเลี้ยงในอาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลว ดังนั้นการออกแบบห้อง ที่ใช้ในการตรวจวัดจำเป็นต้องสร้างระบบที่สามารถควบคุมปริมาตรได้แน่นอน และมีผลกระทบต่อภาระของของเหลวได้น้อย

สำหรับห้องดังกล่าวนี้ประกอบด้วยท่อพลาสติกยาว 2 เซนติเมตร มีรัศมี 6 มิลลิเมตร ซึ่งนำมาติดกับซิลิโคนโอริงด้วยกาวซิลิโคน แล้วนำมาติดกับ QCM ที่ยึดติดกับฐานด้วยกาวเงิน โดยห้องสามารถใส่ปริมาตรของเหลวได้ในช่วง 0- 0.5 ml



(ก) QCM ที่ติดบนฐาน

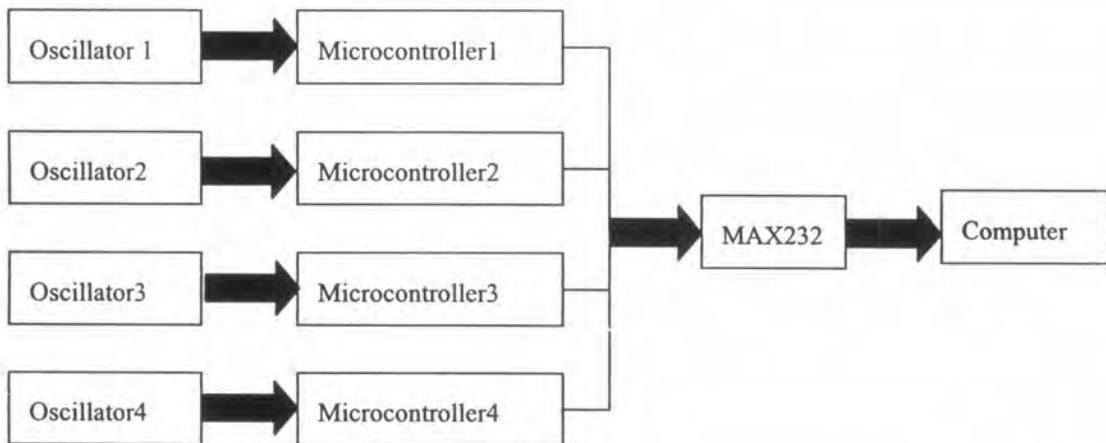


(ข) ห้องที่ประกอบเสร็จแล้ว

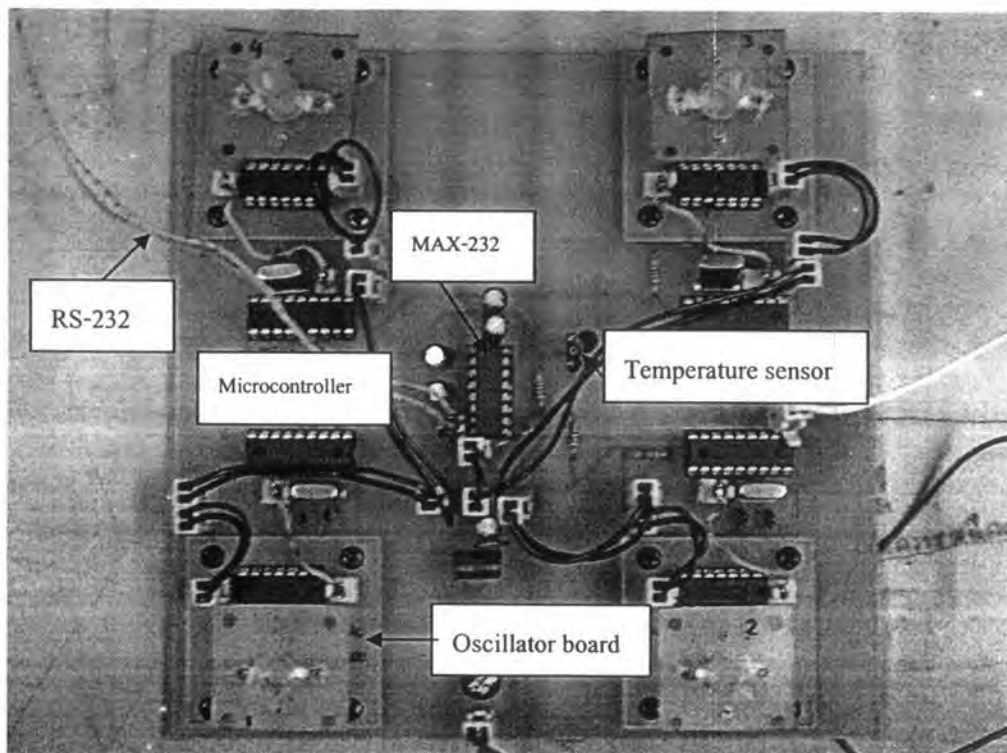
รูปที่ 2.10 ห้องที่ใช้ในการทดลองวัดปริมาณเซลล์

### 2.3.2 ระบบประมวลผลและเก็บข้อมูล

เพื่อให้สามารถวัดผลการทดลองได้หลายชุดในเวลาเดียวกันจึงออกแบบระบบประมวลผลให้วัดความถี่ได้พร้อมกัน 4 ช่อง โดยในแต่ละช่องจะมีหลักการทำงานเหมือนกันกล่าวคือ เมื่อ QCM ถูกทำให้เกิดการออสซิลเลต ความถี่จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC 16F628) เพื่อนับความถี่ จากนั้นจึงส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านสายซีเรียล RS-232 โดยใช้ IC MAX232 เป็นตัวส่ง และได้กำหนดให้การส่งข้อมูลในแต่ละช่องมีการส่งเหลื่อมเวลากัน 100 ms คอมพิวเตอร์จะทำการเก็บข้อมูลที่ส่งเข้ามาเพื่อแสดงผลในเวลาจริง (real time)



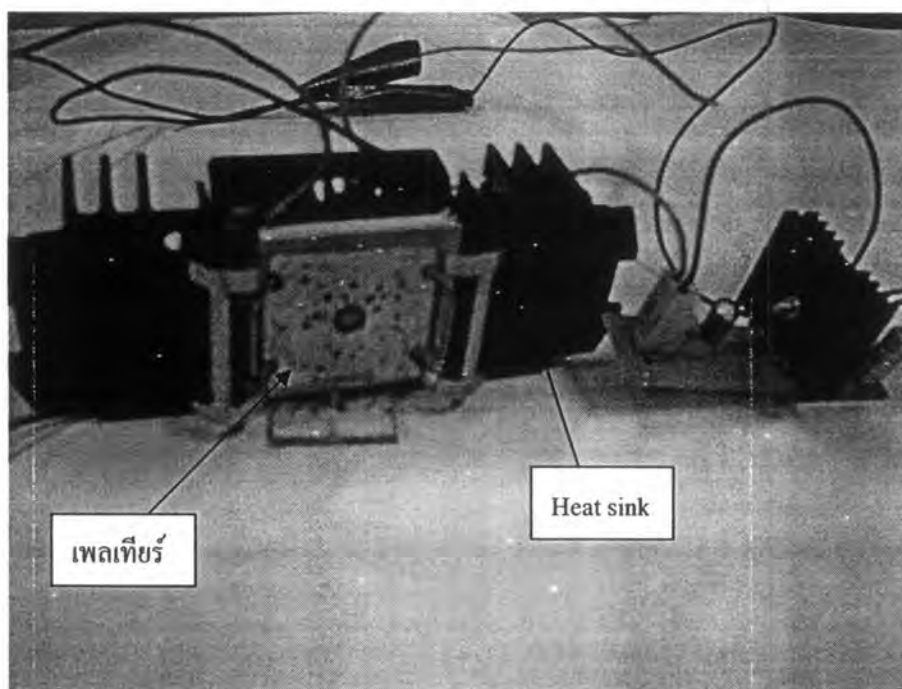
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบประมวลผลและเก็บข้อมูล



รูปที่ 2.12 ภาพของระบบวัดที่ใช้ในการทดลอง

### 2.3.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ของ QCM ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นเพื่อลดผลของอุณหภูมิ ในระหว่างการวัดจึงออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ระบบควบคุมอุณหภูมินี้จะใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (DS18B20) เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิโดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ละเอียดถึง  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วส่งค่าอุณหภูมิไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC 16F628) จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการควบคุมการเปิดปิดวงจรจ่ายไฟไปยัง เพลเทียร์ (peltier) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ โดยมี Heat sink และ พัดลมเป็นตัวกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งระบบ ระบบการควบคุมอุณหภูมินี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ละเอียด  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมิระหว่าง 34 ถึง  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.13 ภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ

## 2.4 การทดสอบระบบวัดเบื้องต้น

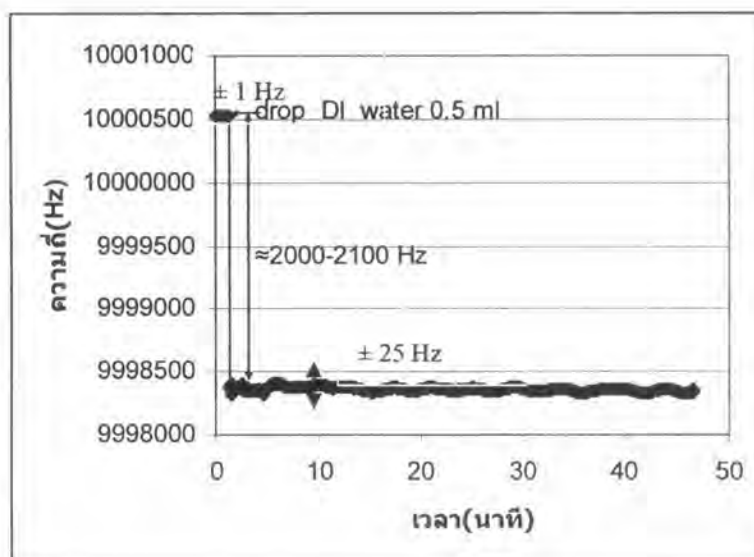
ความผิดพลาดในการทำงานของระบบรวมถึงการทำงานอย่างไม่ถูกต้องในการวัดเกิดจากหลายสาเหตุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบระบบวัดมีการทำงานอย่างถูกต้องก่อนนำไปใช้ในการทดลองวัดปริมาณเซลล์ ในหัวข้อนี้จะมีการทดสอบระบบ 2 อย่างดังต่อไปนี้

### 1. ผลการทดสอบการวัดความถี่ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับออสซิลอสโคป

ผลจากการวัดความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ กับ QCM ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 10 MHz ได้ความถี่ 9,999,609-9,999,610 Hz ผลจากออสซิลอสโคปวัดได้ความถี่ 10,000,03x Hz (x คือ ค่าหลักหน่วยที่ออสซิลอสโคปไม่สามารถอ่านได้) ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องนับความถี่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถวัดความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมีความผิดพลาดน้อยมาก โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้มาจากการที่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าผิดพลาดจากความถี่อ้างอิงเล็กน้อย โดยแสดงรายละเอียดการวัดไว้ในภาคผนวก ง

### 2. การทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์ขณะทำงานในของเหลว

จากวงจรสมมูลของ QCM ที่แสดงในหัวข้อ 2.1 จะเห็นได้ว่าในขณะที่ QCM เมื่อมีมวลมาเกาะหรือในงานของเหลวจะมีวงจรสมมูลเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้งานในของเหลว QCM จะมีค่าความต้านทาน ( $R_p$ ) ในวงจรสมมูลสูงขึ้นมาก การที่ความต้านทานภายในวงจรสมมูลสูงขึ้นนี้ส่งผลต่อการเกิดออสซิลเลตเนื่องจากจะทำให้อัตราขยายลดลง [14] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อปรับจูนอัตราขยายเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการใช้งานในของเหลว



รูปที่ 2.14 ผลการวัดความถี่ของ QCM ก่อน และหลังหยดน้ำปราศจากไอออนลงบน QCM

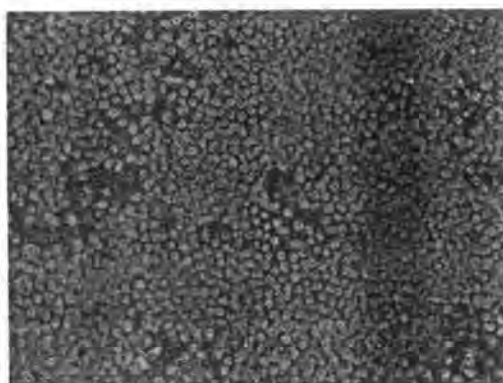
ผลการทดสอบพบว่าวงจรวัดสามารถทำงานในน้ำได้ แต่เนื่องจากการทดสอบวงจรนี้ ยังไม่ได้มีการคุมการระเหยของน้ำ อีกทั้งยังไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิ และใช้อิเล็กโทรดที่เป็นเงินซึ่งเกิดการออกซิเดชันได้ง่าย ผลการทดลองที่ได้จึงยังมีการแกว่งอยู่บ้างในช่วง  $\pm 25$  Hz

## 2.5 การนำ QCM มาตรวจวัดเซลล์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของ QCM เกิดจากการที่มีมวลมาเกาะที่ผิว หรือ ถ้า QCM ถูกใช้งานในของเหลวความถี่เรโซแนนซ์ก็จะแปรค่าตามความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวโดยมีการตอบสนองในน้ำได้ในระยะ 0.16 ไมโครเมตรจากพื้นผิวสำหรับ QCM ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 12 MHz

โดยปกติแล้วเซลล์ที่จะอยู่ในของเหลวจะมีลักษณะแบบเกาะผิว และไม่เกาะผิว ตามหลักการแล้วพบว่าเซลล์ที่ไม่เกาะผิวจะทำให้ค่าความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก QCM มีการตอบสนองเป็นลักษณะเกาซ์เซียนโดยมีการตอบสนองดีที่สุดในบริเวณกึ่งกลางของอิเล็กโทรด [14] อีกทั้งยังมีระยะเวลาตอบสนองที่ต่ำมาก การให้ผลการทดลองที่แม่นยำอาจทำได้ยากเนื่องจากเซลล์มีลักษณะแขวนลอย และไม่สามารถทำให้กระจายอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกับของเหลวได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกเซลล์ซึ่งลงเกาะที่ผิวเนื่องจากการควบคุมการกระจายตัวของเซลล์ทั่วทั้งผิวสามารถทำได้ง่ายกว่า และให้ผลตอบสนองได้

สำหรับเซลล์ที่เลือกมาใช้ทำการทดลองคือเซลล์แมคโครฟาจ (ATCC Number TIB-71; Raw 246.7) ซึ่งสามารถเกาะผิวแบบ epithelial like



รูปที่ 2.15 ลักษณะของเซลล์ RAW246.7 ที่เกาะอยู่บน QCM ที่มีอิเล็กโทรดเป็นทอง