

## บทที่ 4

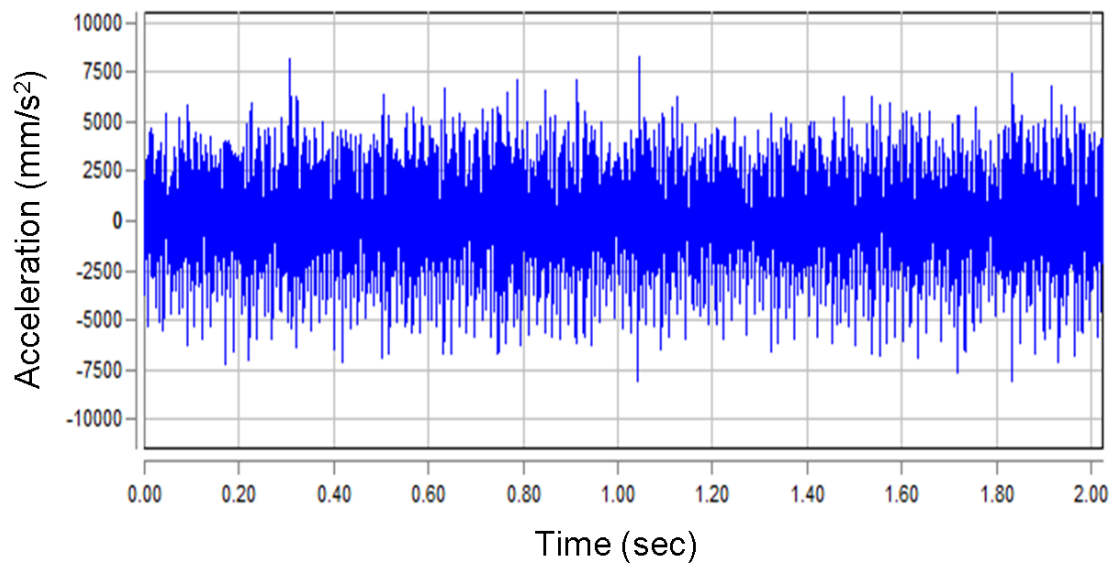
### ผลการวิจัย

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองโดยจะเริ่มจากการทดลองเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นของเครื่องจักร โดยจะทำการวัดความถี่สั่นพ้องที่ได้จากเครื่องจักรก่อน หลังจากนั้นจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของโครงสร้างรับแรงที่ประกอบกับเพียโซบัสเซอร์ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบ หรือ อุปกรณ์ต้นแบบ ทำการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบเมื่อต่อกับวงจรจัดการพลังงาน, ทดสอบการทำงานของระบบติดตามสภาพเครื่องจักร และสุดท้ายจึงจะนำอุปกรณ์ทั้งหมดที่ทำการทดสอบแล้วมาใช้งานร่วมกันแล้วนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับ การติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเอง สำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรและสามารถนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต

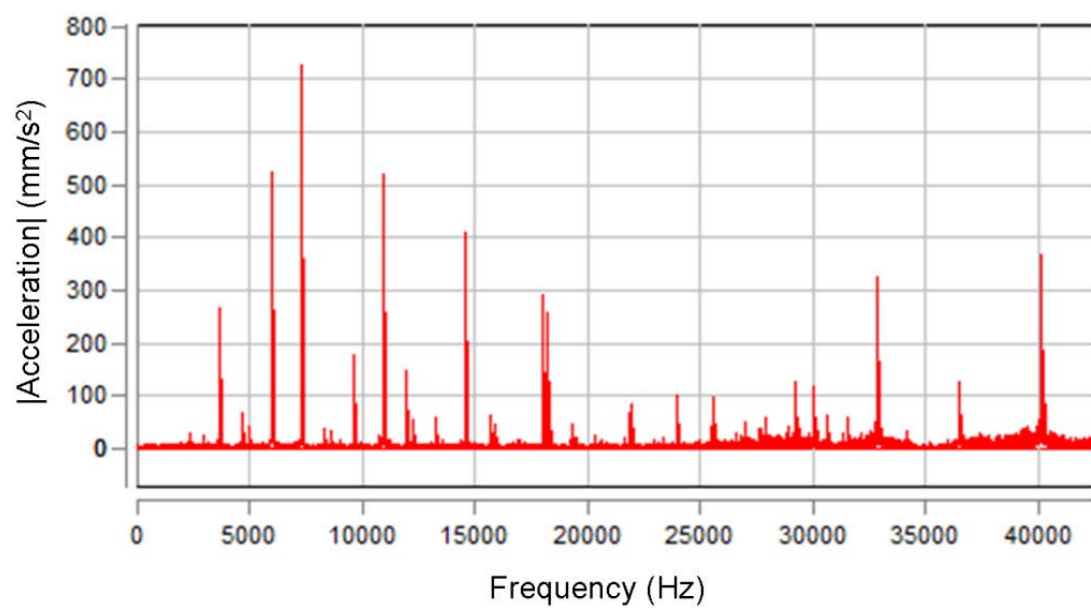
#### 4.1 การทดสอบวัดความถี่สั่นพ้องเครื่องจักร

โดยปกติแล้วอุปกรณ์เก็บพลังงานที่เก็บพลังงานจากเครื่องจักรนั้นจะอาศัยความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรให้ตรงกับอุปกรณ์เก็บพลังงานจึงจะสามารถเก็บพลังงานได้ ปัญหาที่ยากจึงตามมา คือ ต้องทำการปรับความถี่ทุกครั้งหากเปลี่ยนเครื่องจักรตัวใหม่ เพราะเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีความถี่ในการสั่นไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร โดยตัวอุปกรณ์สามารถผลิตพลังงานได้ด้วยตนเอง จากการแปลงแรงสั่นสะเทือนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเพียโซบัสเซอร์ซึ่งไม่ต้องอาศัยความถี่สั่นพ้อง ในการทดสอบจึงเริ่มด้วยการทดสอบวัดค่าความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรที่จะใช้ร่วมกับตัวอุปกรณ์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรกับตัวเพียโซบัสเซอร์อุปกรณ์นั้นต่างหรือเหมือนกันอย่างไร โดยผลการทดสอบวัดค่าความถี่เครื่องปั๊มขนาดเล็กด้วยเครื่องวัดความเร่งจากบริษัท EI-Calc ที่ฐานของเครื่องจักร ได้ข้อมูลแรงสั่นสะเทือนเมื่อเครื่องจักรขณะทำงาน ดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 โดย ภาพที่ 4.1 จะเป็นค่าความเร่งเทียบกับเวลา และ ภาพที่ 4.2 จะเป็นค่าความเร่งเทียบกับความถี่

จาก ภาพที่ 4.2 เห็นได้ว่าข้อมูลแรงสั่นสะเทือนที่วัดได้ประกอบไปด้วยความถี่หลายๆความถี่ ซึ่งสังเกตได้ว่าความถี่สั่นพ้องแรกจะอยู่ที่ความถี่ประมาณ 3.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความมากกว่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซบัสเซอร์ที่มีค่าความถี่สั่นพ้องอยู่ที่  $2.6 \pm 0.5$  กิโลเฮิร์ตซ์จากตารางข้อมูล (Data Sheet) ของเพียโซบัสเซอร์ที่นำมาใช้แต่ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงกระแทกก็ยังสามารถทำงานได้โดยไม่คำนึงถึงความถี่สั่นพ้องจึงไม่เป็นอุปสรรคในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเครื่องจักร ไม่ว่าจะเปลี่ยนไปใช้กับเครื่องจักรตัวอื่นๆก็ตาม



ภาพที่ 4.1 ข้อมูลความเร่งของเครื่องปั๊มลมเมื่อเทียบกับเวลา



ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์โดยวิธีฟาสต์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fast Fourier Transform) ของแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากเครื่องปั๊มลม

## 4.2 การทดสอบโครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์

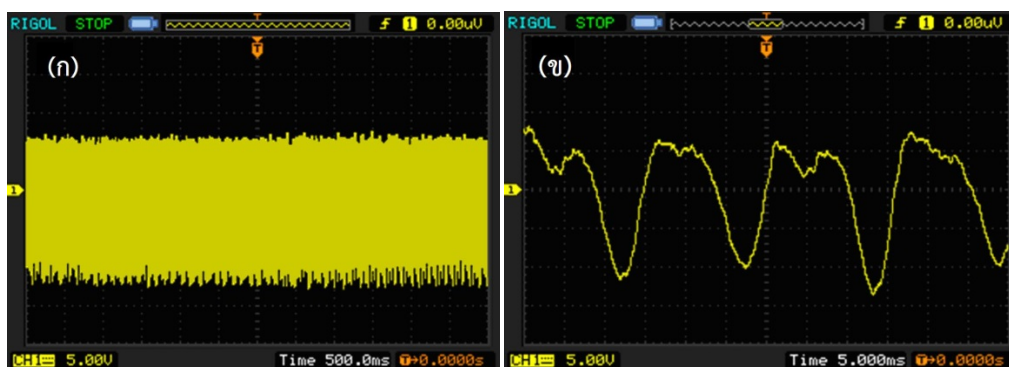
ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาผลตอบสนองจากเพียโซบัสเซอร์เมื่อเครื่องจักรทำงานซึ่งได้แสดงไว้ใน ภาพที่ 4.3 โดยในการทดลองได้ทดลองต่อตัวต้านทานขนาดต่างๆขนานกับเพียโซบัสเซอร์ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.4 แล้วใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) วัดค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสอง จากนั้น นำค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสองที่วัดได้ไปหากระแสเฉลี่ยของรากล้างสองโดยใช้สูตร

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

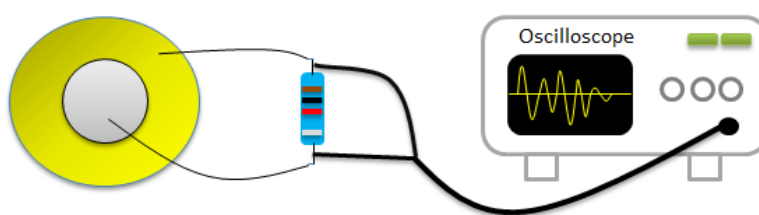
จากนั้นหาค่ากำลังเฉลี่ยโดยใช้สูตร

$$P_{avg} = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

เพื่อนำไปพล็อต (Plot) กราฟระหว่างค่าความต้านทานกับกำลังเพื่อหาค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด

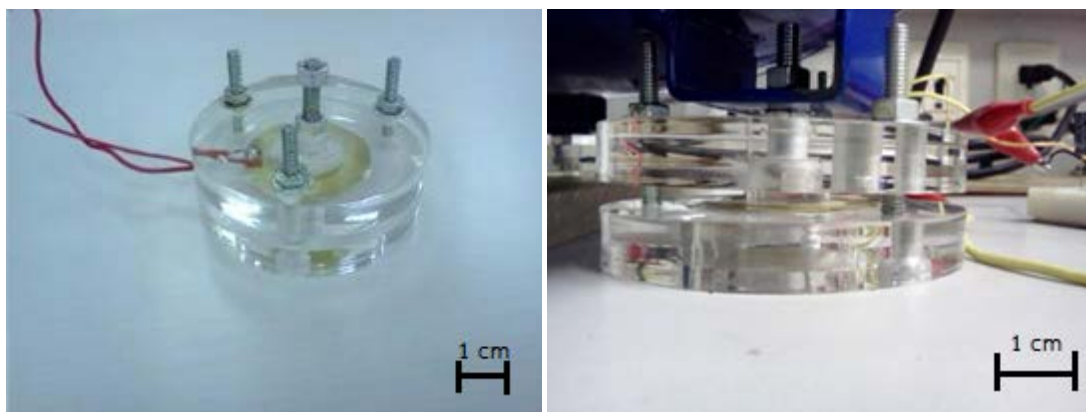


ภาพที่ 4.3 (ก) ภาพแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซบัสเซอร์ (ข) ภาพขยายแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซบัสเซอร์



ภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงการต่อตัวต้านทานขนานกับเพียโซบัสเซอร์

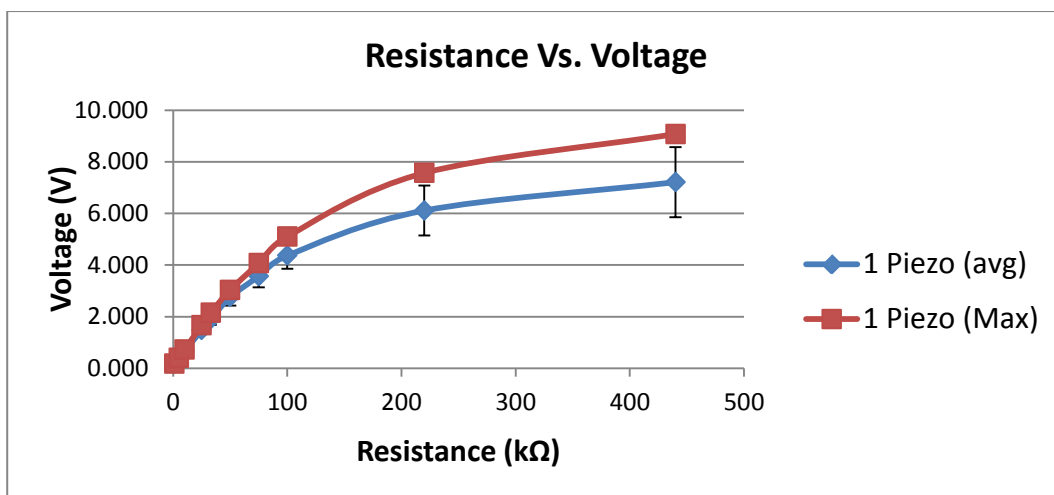
เนื่องจากเพียโซบัสเซอร์ที่นำมาใช้แต่ละตัวมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลี่ยของค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสองของเพียโซบัสเซอร์ทั้ง 3 ตัวเมื่อต่อ 1 ชั้น ดังแสดงใน ภาพที่ 4.5 ทีละตัว เมื่อเทียบกับตัวเพียโซบัสเซอร์ 1 ตัวที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดได้ผลออกมาแสดงใน ตารางที่ 4.1 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสองกับค่าความต้านทาน, ค่ากระแสเฉลี่ยของรากล้างสองกับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ดังแสดงใน ภาพที่ 4.6 - 4.8 ตามลำดับ



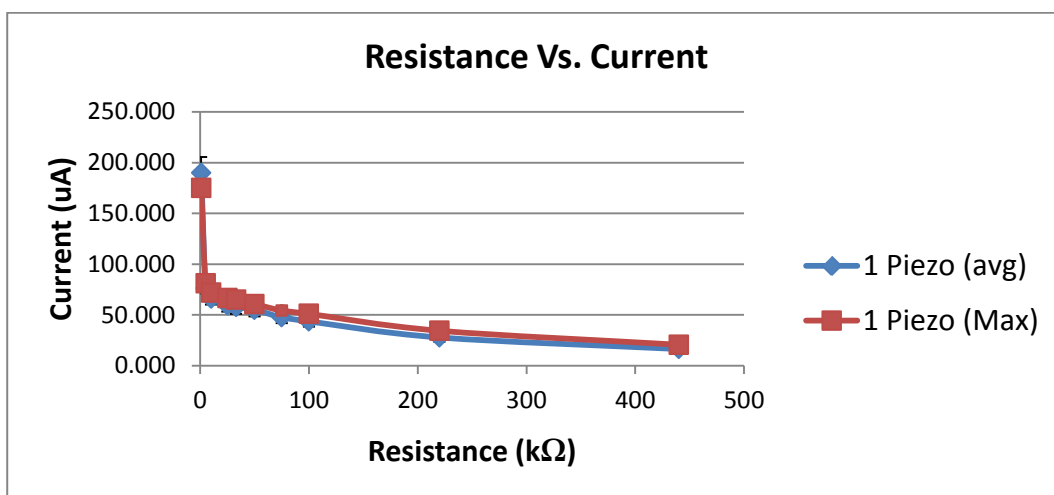
ภาพที่ 4.5 ภาพอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบเพียโซอิเล็กทริก 1 ตัว

ตารางที่ 4.1 ผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกำลึงสอง กระแสเฉลี่ยของรอกำลึงสองและกำลังเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าสูงสุด

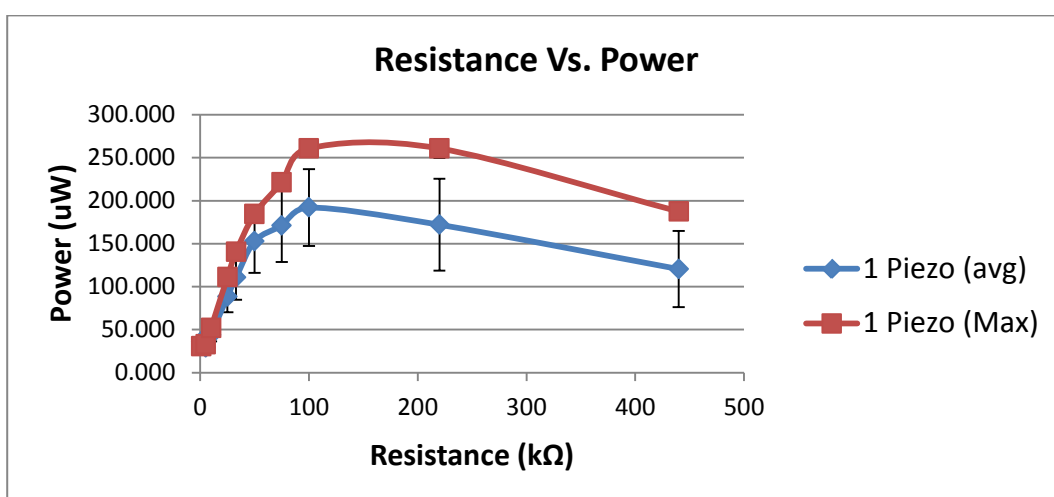
|                | 1 Piezo (Average)    |                             |                             | 1 Piezo (Max)        |                             |                             |
|----------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| R(k $\Omega$ ) | V <sub>rms</sub> (V) | I <sub>rms</sub> ( $\mu$ A) | P <sub>avg</sub> ( $\mu$ W) | V <sub>rms</sub> (V) | I <sub>rms</sub> ( $\mu$ A) | P <sub>avg</sub> ( $\mu$ W) |
| 1              | 0.190                | 190.000                     | 36.226                      | 0.175                | 175.200                     | 30.703                      |
| 5              | 0.382                | 76.333                      | 29.200                      | 0.405                | 80.400                      | 32.856                      |
| 10             | 0.660                | 66.033                      | 43.774                      | 0.721                | 72.500                      | 51.966                      |
| 25             | 1.481                | 59.253                      | 88.259                      | 1.664                | 66.120                      | 110.855                     |
| 33             | 1.903                | 57.677                      | 110.534                     | 2.152                | 64.545                      | 140.415                     |
| 50             | 2.754                | 55.080                      | 152.806                     | 3.036                | 60.760                      | 184.370                     |
| 75             | 3.569                | 47.582                      | 171.097                     | 4.072                | 52.813                      | 221.206                     |
| 100            | 4.367                | 43.667                      | 192.021                     | 5.107                | 50.040                      | 260.862                     |
| 220            | 6.112                | 27.782                      | 172.019                     | 7.570                | 33.327                      | 260.727                     |
| 440            | 7.214                | 16.395                      | 120.448                     | 9.079                | 19.802                      | 187.440                     |



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากลำกล้องสองกับค่าความต้านทาน

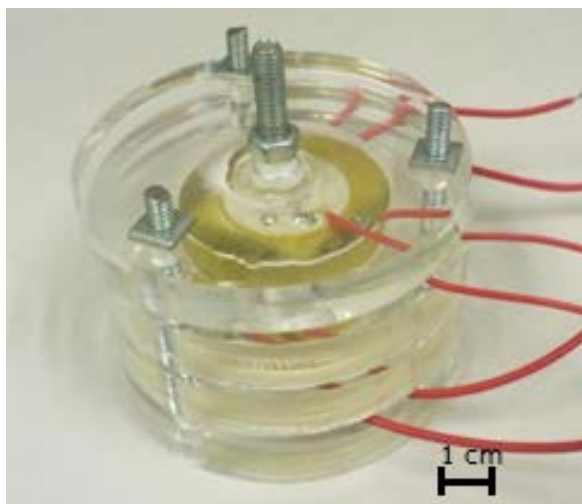


ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเฉลี่ยของรากลำกล้องสองกับค่าความต้านทาน



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

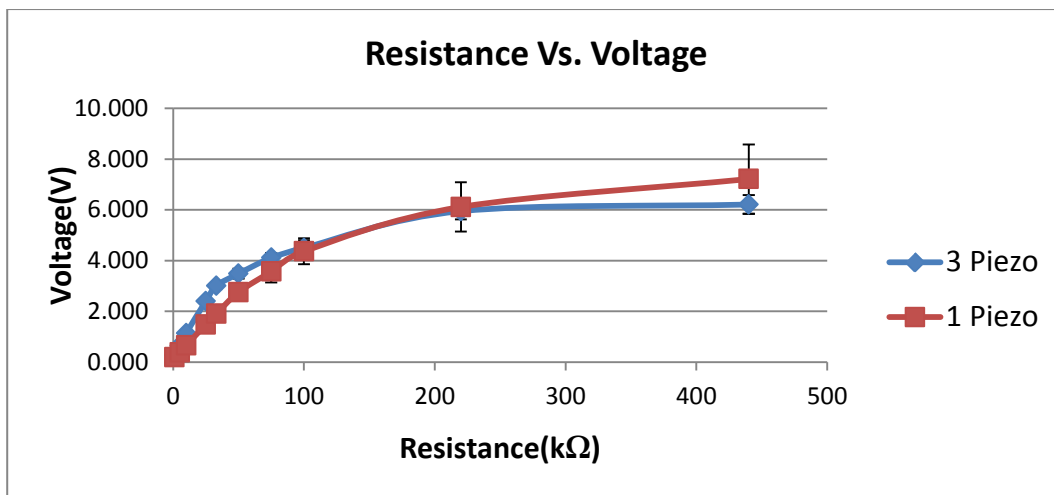
จาก ภาพที่ 4.6 - 4.8 สังเกตได้ว่าค่ากำลังที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของเพียโซบัสเซอร์แต่ละตัวมีค่าต่ำกว่าการใช้เพียโซบัสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดตัวเดียว ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับการต่อขนาน 3 ชั้น หรือ ต่อแบบคอนโด (Condo) ดังภาพที่ 4.9 โดยใช้เพียโซบัสเซอร์ทั้ง 3 ตัวที่นำมาหาค่าเฉลี่ยในตอนแรก ซึ่งผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสอง, กระแสเฉลี่ยของรากล้างสอง และกำลังเฉลี่ยได้แสดงใน ตารางที่ 4.2 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสองกับค่าความต้านทาน, ค่ากระแสเฉลี่ยของรากล้างสองกับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ได้แสดงในภาพที่ 4.10 - 4.12 ตามลำดับ



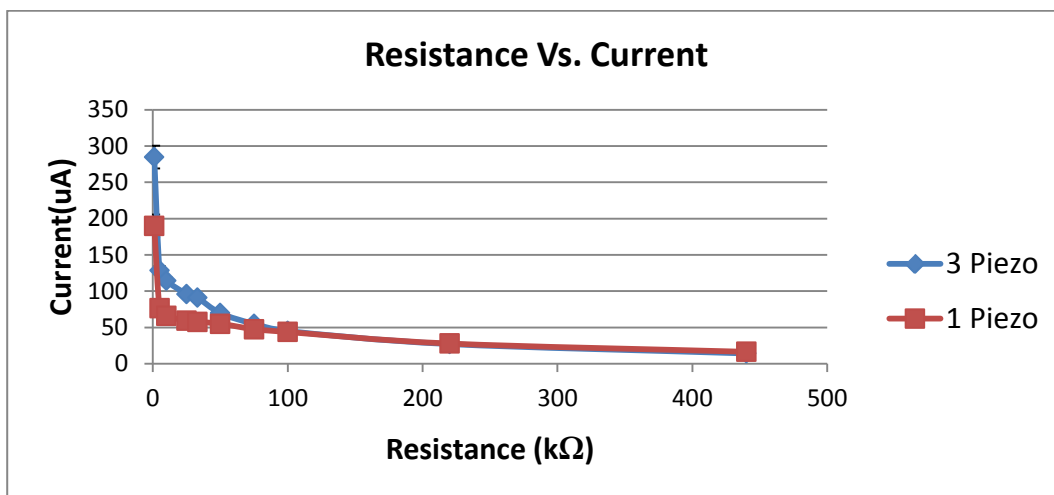
ภาพที่ 4.9 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบต่อแบบคอนโด

ตารางที่ 4.2 แสดงผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากล้างสอง กระแสเฉลี่ยของรากล้างสองและกำลังเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน

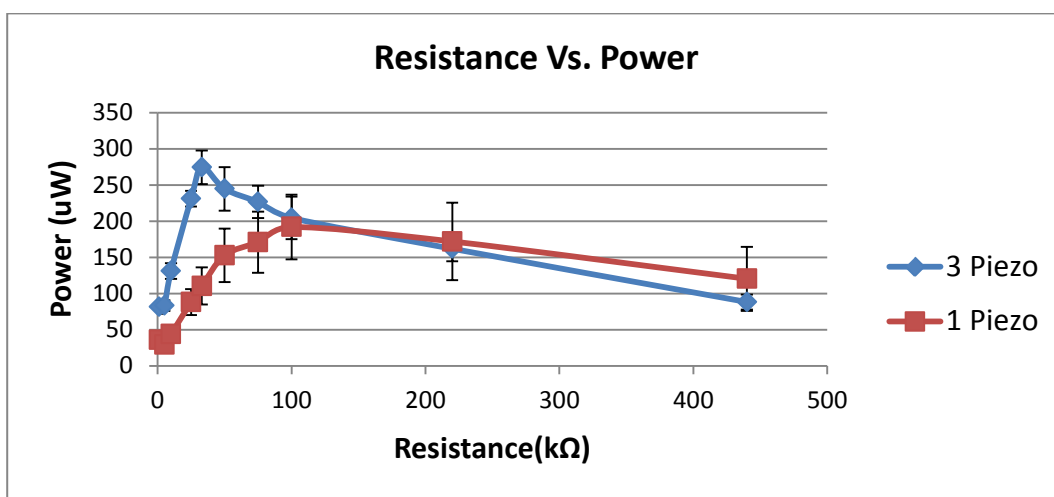
|                | 1 Piezo (Avg)        |                             |                             | 3 Piezo (Condo)      |                             |                             |
|----------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| R(k $\Omega$ ) | V <sub>rms</sub> (V) | I <sub>rms</sub> ( $\mu$ A) | P <sub>avg</sub> ( $\mu$ W) | V <sub>rms</sub> (V) | I <sub>rms</sub> ( $\mu$ A) | P <sub>avg</sub> ( $\mu$ W) |
| 1              | 0.190                | 190.000                     | 36.226                      | 0.285                | 284.800                     | 81.692                      |
| 5              | 0.382                | 76.333                      | 29.200                      | 0.644                | 128.840                     | 83.383                      |
| 10             | 0.660                | 66.033                      | 43.774                      | 1.143                | 114.300                     | 131.157                     |
| 25             | 1.481                | 59.253                      | 88.259                      | 2.402                | 96.080                      | 231.072                     |
| 33             | 1.903                | 57.677                      | 110.534                     | 3.003                | 91.000                      | 274.456                     |
| 50             | 2.754                | 55.080                      | 152.806                     | 3.485                | 69.700                      | 244.751                     |
| 75             | 3.569                | 47.582                      | 171.097                     | 4.112                | 54.827                      | 226.606                     |
| 100            | 4.367                | 43.667                      | 192.021                     | 4.499                | 44.990                      | 204.633                     |
| 220            | 6.112                | 27.782                      | 172.019                     | 5.948                | 27.036                      | 161.944                     |
| 440            | 7.214                | 16.395                      | 120.448                     | 6.208                | 14.109                      | 88.337                      |



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน



ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน

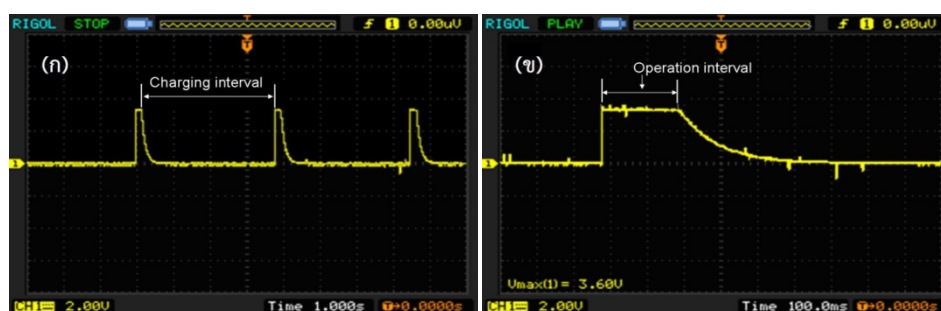


ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

จากกราฟในภาพที่ 4.10 – 4.12 สามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะโหลดที่มีค่าความต้านทานสูงจะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซบัสเซอร์ 3 ตัวมีค่าน้อยกว่าเพียโซบัสเซอร์ 1 ตัว ซึ่งคาดว่าเกิดจากเหตุผลที่เพียโซบัสเซอร์แต่ละตัวที่นำมาต่อขนานกันนั้นให้ความต่างศักย์ที่แตกต่างกันและเมื่อนำมาต่อขนานจึงได้ผลออกมาเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นจากเพียโซบัสเซอร์ที่ได้แรงดันต่ำที่สุด แต่ถึงกระนั้น เพียโซ 3 ตัวเมื่อนำมาต่อขนานกันแล้วสามารถทำให้กำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้มากขึ้นในสภาวะที่โหลดต้องการกระแสมาก (มากกว่าประมาณ 45  $\mu\text{A}$ )

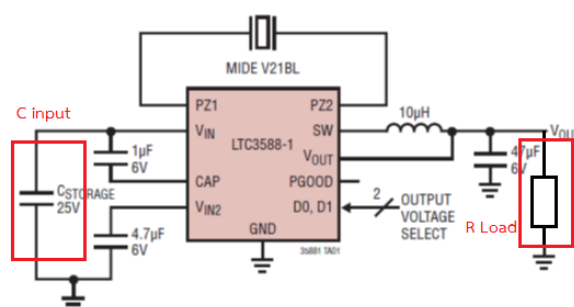
### 4.3 การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงาน

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบเกี่ยวกับช่วงเวลาที่ใช้ในการชาร์จ (Charging Interval) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.13 (ก) ก่อนที่จะปล่อยพัลส์ (Pulse) ที่มีช่วงเวลาในการทำงาน (Operation Interval) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.13 (ข) ออกมา และสามารถนำมาพลังงานมาใช้งานได้



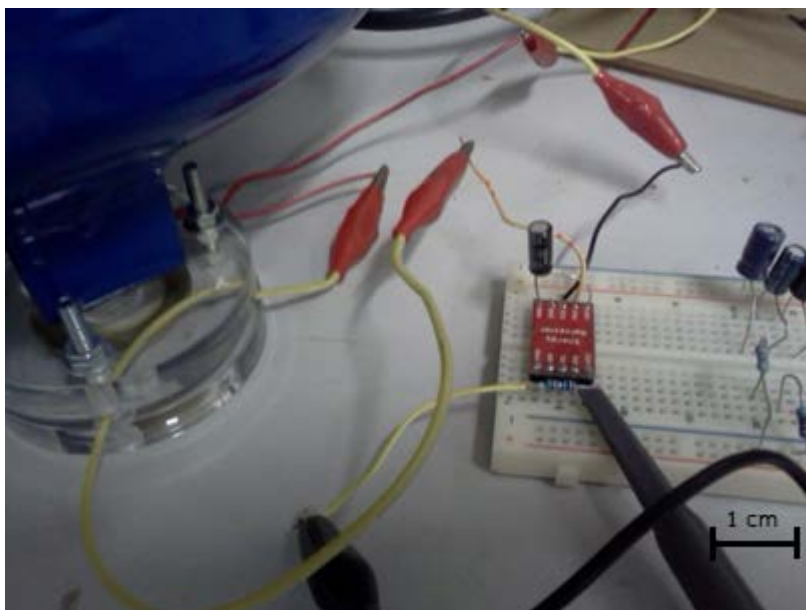
ภาพที่ 4.13 (ก) ช่วงเวลาที่ใช้ในการชาร์จ (ข) ช่วงเวลาที่เอาต์พุตสามารถทำงานได้

ในการทดสอบ จะทดสอบโดยทดลองเปลี่ยนค่าขนาดตัวเก็บประจุด้านอินพุต (Capacitor Input) และค่าภาระความต้านทานด้านเอาต์พุต (Resistor Load) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.14 และ ภาพที่ 4.15 เพื่อทดสอบว่าการเปลี่ยนค่าทั้งสองค่ามีผลอย่างไรกับระบบจัดการพลังงาน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.3 และนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานกับเวลา ดังแสดงใน ภาพที่ 4.16 และ ภาพที่ 4.17 โดยในการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างใช้เพียโซบัสเซอร์ 3 ตัว ต่อแบบคอนโดและแบบใช้เพียโซบัสเซอร์ 1 ตัว ซึ่งเพียโซบัสเซอร์ที่เลือกใช้ในกรณีใช้เพียโซบัสเซอร์ 1 ตัว เป็นเพียโซบัสเซอร์ที่ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดจากการทดสอบที่ผ่านมา



ภาพที่ 4.14 รูปแสดงตำแหน่งค่าขนาดตัวเก็บประจุและค่าภาระความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในการทดลอง

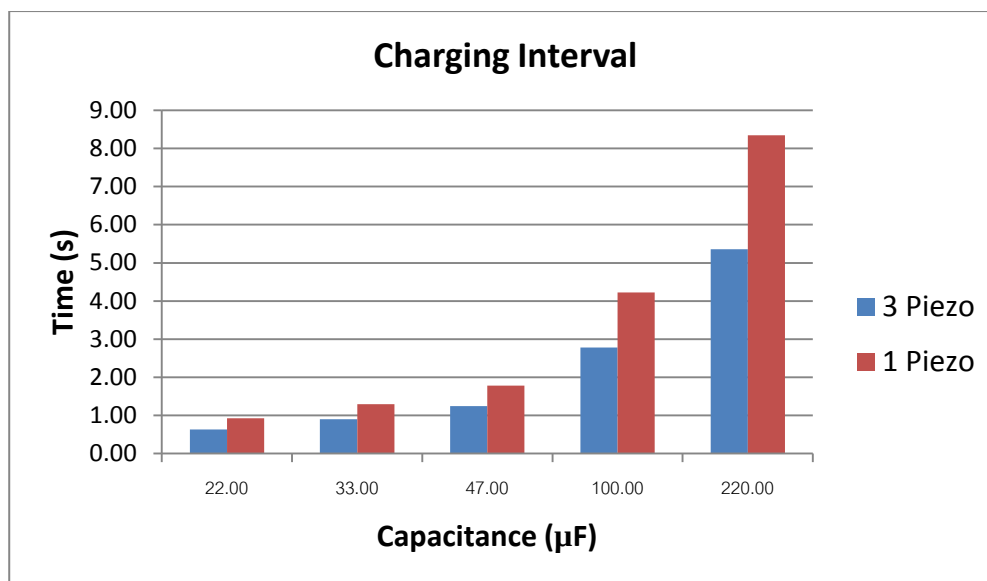




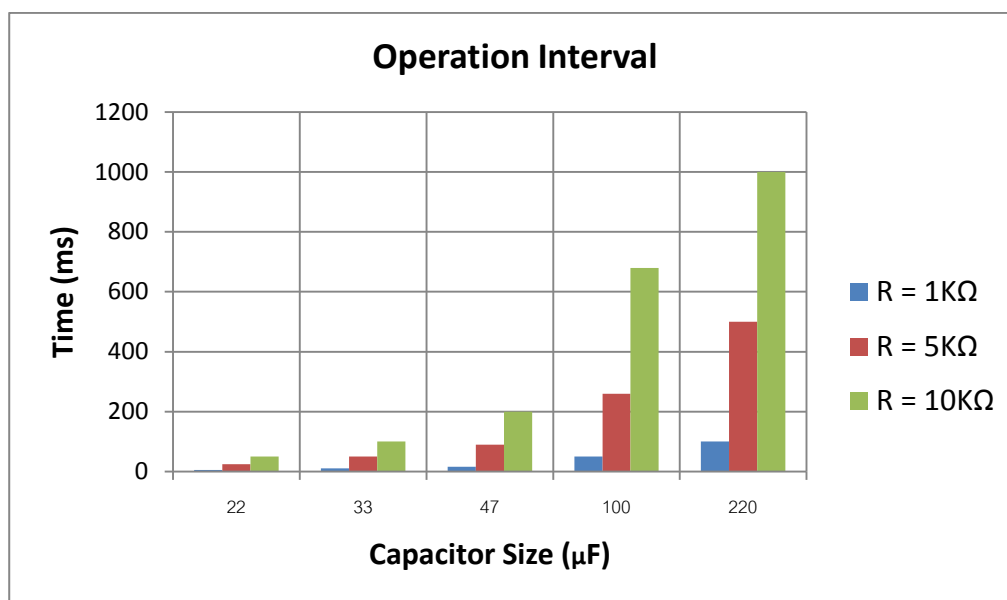
ภาพที่ 4.15 รูปขณะทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงาน

ตารางที่ 4.3 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานกับเวลา

| ค่าที่เปลี่ยน   |              | Operation interval (ms) | Charging Interval |             |
|-----------------|--------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| R (k $\Omega$ ) | C ( $\mu$ F) |                         | 1 Piezo (s)       | 3 Piezo (s) |
| 1               | 22           | 5                       | 0.89              | 0.63        |
|                 | 33           | 11                      | 1.23              | 0.90        |
|                 | 47           | 16                      | 1.60              | 1.24        |
|                 | 100          | 50                      | 3.98              | 2.79        |
|                 | 220          | 100                     | 7.56              | 5.36        |
| 5               | 22           | 25                      | 0.92              | 0.67        |
|                 | 33           | 50                      | 1.26              | 0.99        |
|                 | 47           | 90                      | 1.74              | 1.30        |
|                 | 100          | 260                     | 3.98              | 3.00        |
|                 | 220          | 500                     | 8.02              | 5.42        |
| 10              | 22           | 50                      | 0.98              | 0.74        |
|                 | 33           | 100                     | 1.38              | 1.01        |
|                 | 47           | 200                     | 2.02              | 1.44        |
|                 | 100          | 680                     | 4.72              | 3.03        |
|                 | 220          | 1,000                   | 9.45              | 5.53        |



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงช่วงเวลาที่ใช้ในการชาร์จ



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงช่วงเวลาในการทำงาน

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.16 - 4.17 สามารถบอกได้ว่า การเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุด้านอินพุต ความต้านทานด้านเอาต์พุต และจำนวนเพียโซบัสเซอร์ที่ใช้ มีผลกับระยะเวลาในการชาร์จและระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงาน โดยในเรื่องของเวลาในการชาร์จ การเพิ่มค่าตัวเก็บประจุด้านอินพุตจะมีผลให้เวลาในการชาร์จนานมากขึ้นส่วนการเพิ่มจำนวนเพียโซบัสเซอร์ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นทำให้เวลาที่ใช้ในการชาร์จลดลง ในขณะที่การเพิ่มหรือลดค่าความต้านทานเอาต์พุตแทบจะไม่มีผลเลยกับเวลาที่ใช้ในการชาร์จ ในเรื่องของเวลาที่อุปกรณ์ทำงาน การเพิ่มค่าตัวเก็บประจุจะส่งผลให้เวลาในการทำงานเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มค่าความต้านทานเอาต์พุตซึ่งส่งผลให้กระแสที่ภาระต้องการลดลงจะทำให้เวลาในการทำงานเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในขณะที่จำนวนเพียโซบัสเซอร์ที่ใช้แทบจะไม่มีผลกับ

ระยะเวลาการทำงานนี้เลย จากผลที่ออกมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าการนำไปใช้งานสามารถเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับกระแสที่ภาระต้องการเพื่อให้ได้ช่วงเวลาชาร์จและเวลาการทำงานตามที่ต้องการ

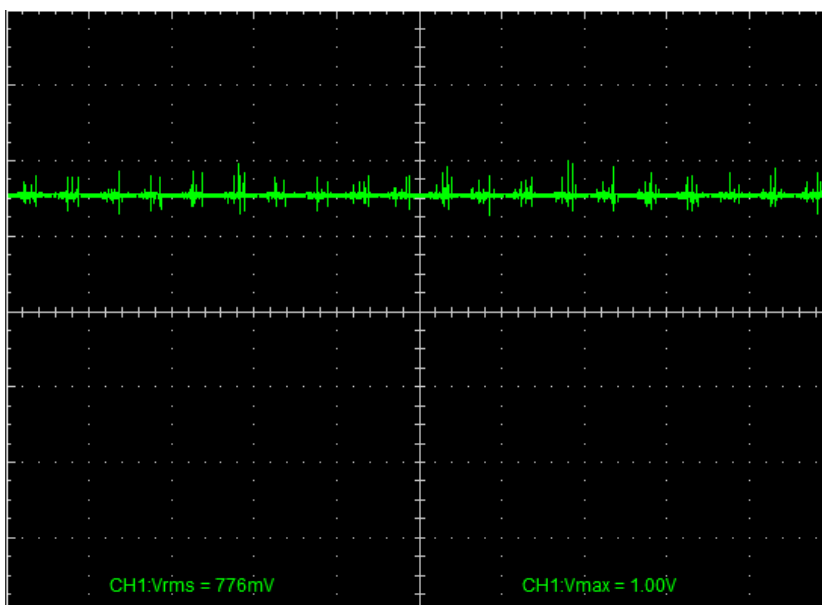
#### 4.4 การทดสอบการทำงานของระบบติดตามสภาพเครื่องจักร

หลังจากทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบเมื่อต่อเข้ากับระบบจัดการพลังงานแล้ว ในขั้นตอนต่อไปก็คือ การทดสอบระบบติดตามสภาพเครื่องจักรว่าทำงานอย่างไร เพื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับระบบติดตามสภาพ โดยจะเริ่มทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และตัวรับ-ส่งสัญญาณตามลำดับ

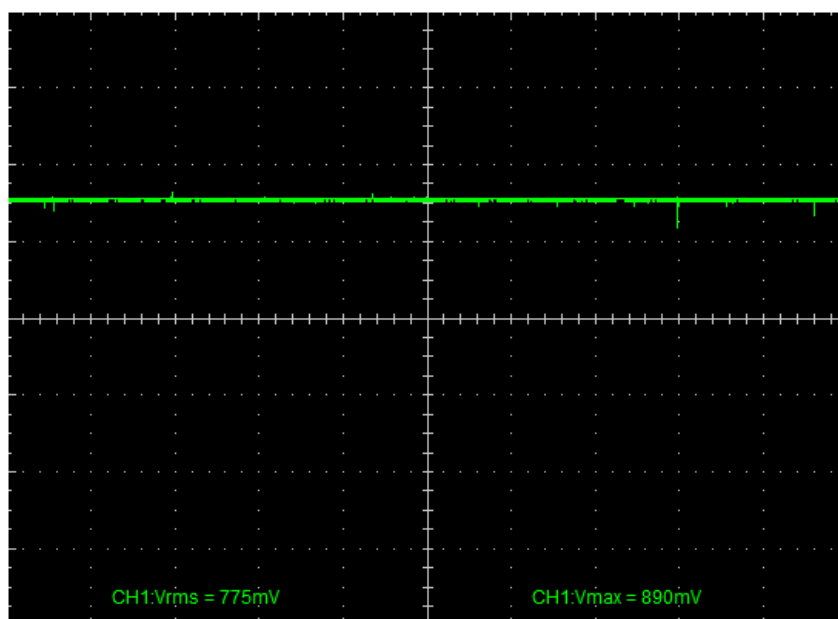
##### 4.4.1 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700

ในการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เริ่มจากการวัดสัญญาณที่เอาต์พุตของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยออสซิลโลสโคปขณะที่เครื่องปั๊มลมขนาดเล็กทำงาน เพื่อดูสัญญาณที่ออกจากตัวเซ็นเซอร์ พบว่ามีสัญญาณรบกวนมาก เป็นผลมาจากมอเตอร์ (Motor) ของเครื่องปั๊มลมทำงาน จึงทำการเพิ่มฟิลเตอร์ (Filter) หรือตัวกรองสัญญาณเข้าไปเพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยหลังจากเพิ่มตัวกรองสัญญาณเป็นตัวเก็บประจุขนาด  $0.1\ \mu\text{F}$  จะได้สัญญาณที่ออกมาจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 ซึ่งยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่ เมื่อทำการศึกษาดูในดาต้าชีทของตัวอุปกรณ์จึงทดลองใช้ตัวกรองสัญญาณที่ได้รับการแนะนำ คือ ตัวเก็บประจุขนาด  $1\ \mu\text{F}$  และตัวต้านทานขนาด  $200\ \Omega$  ได้สัญญาณที่ออกมา ดังแสดงใน ภาพที่ 4.19 สังเกตว่าสัญญาณที่ได้นั้นมีคลื่นรบกวนน้อยมาก จึงเลือกใช้ตัวกรองสัญญาณเป็นแบบที่สอง

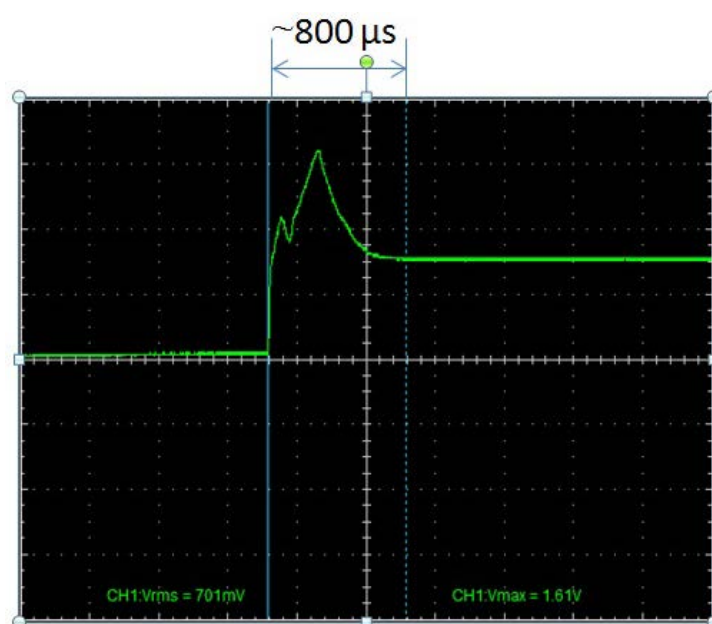
จากนั้นจึงทดลองจ่ายพลังงานให้ตัวเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ติดตัวกรองสัญญาณแบบที่สองแล้ว จ่ายพลังงานเป็นแบบสเต็ป (Step) ได้สัญญาณที่ออกมา ดังแสดงใน ภาพที่ 4.20 พบว่าเกิดผลตอบสนองชั่วขณะ (Transient Response) เกิดขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ  $800\ \mu\text{s}$  ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady-state Response)



ภาพที่ 4.18 รูปสัญญาณเอาต์พุตเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณตัวเก็บประจุขนาด  $0.1\ \mu\text{F}$



ภาพที่ 4.19 รูปสัญญาณจากเอาต์พุตเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณตัวเก็บประจุขนาด  $1\ \mu\text{F}$  และตัวต้านทานขนาด  $200\ \Omega$

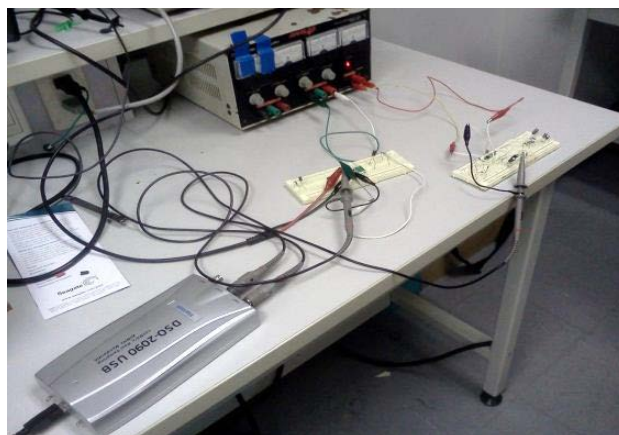


ภาพที่ 4.20 รูปสัญญาณเมื่อจ่ายพลังงานแบบสแต็ปให้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ติดตัวกรองสัญญาณ

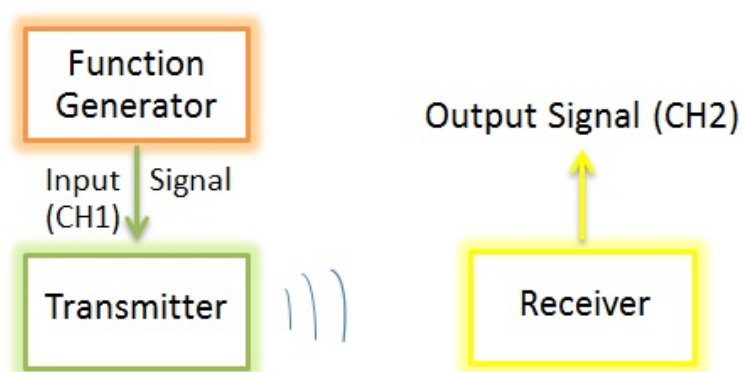
#### 4.4.2 การทดสอบการทำงานของตัวรับและตัวส่งสัญญาณ

ในการทดสอบการทำงานของตัวรับสัญญาณ AM-RT4 และตัวส่งสัญญาณ AM-HRR30 ได้ทำการทดลองจ่ายพลังงานจากพาวเวอร์ซัพพลาย (Power Supply) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.21 และทำการใช้เครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator) ส่งสัญญาณผ่านตัวส่งสัญญาณ เพื่อให้ส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ หลังจากต่อออสซิลโลสโคป โดยช่องสัญญาณที่ 1 (Channel 1) ต่อเข้ากับ

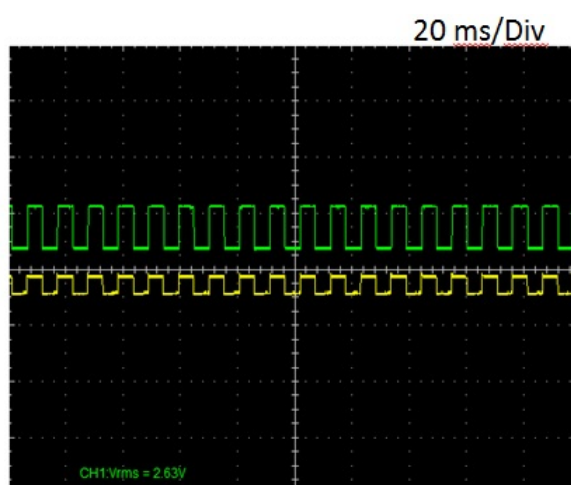
อินพุตของตัวส่งสัญญาณ และช่องสัญญาณที่ 2 (Channel 2) ต่อเข้ากับเอาต์พุตของตัวส่งสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.22 จะได้สัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.21 รูปขณะทำการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณ

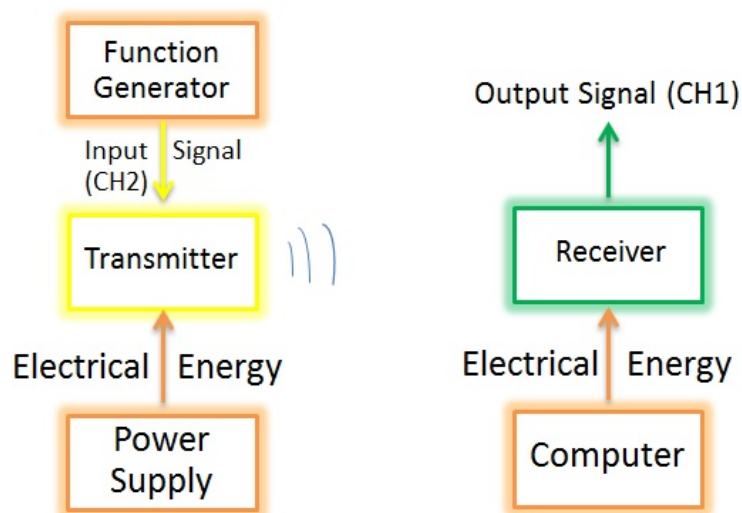


ภาพที่ 4.22 แผนผังการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณขั้นแรก

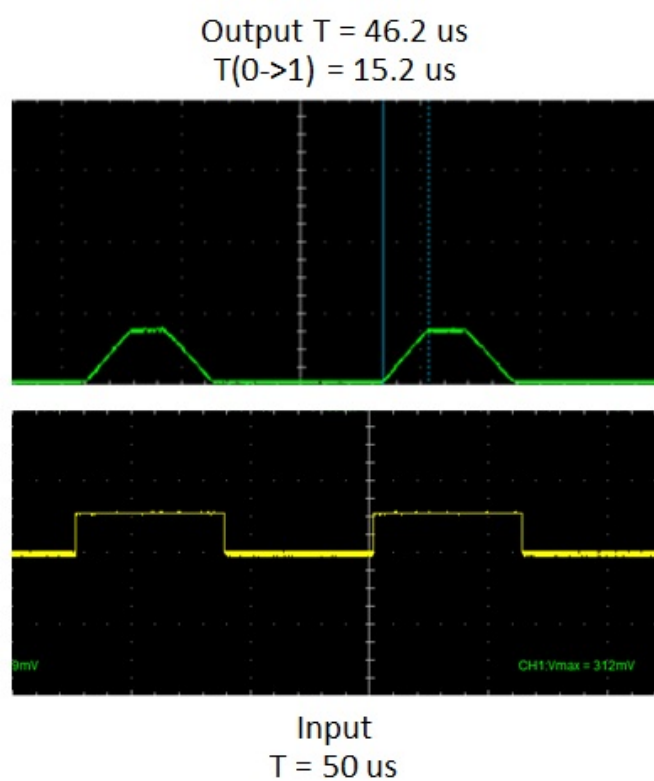


ภาพที่ 4.23 รูปสัญญาณที่ได้จากตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อทำการทดสอบการทำงานขั้นแรก

ขั้นตอนถัดมาจะทดสอบโดยการทดลองต่อตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณแยกกัน โดยตัวส่งสัญญาณจะใช้แหล่งพลังงานเป็นพาวเวอร์ซัพพลายและตัวรับใช้แหล่งพลังงานจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นส่วนแสดงผล ดังแสดงใน ภาพที่ 4.24 ได้สัญญาณที่ออกมา ดังแสดงใน ภาพที่ 4.25



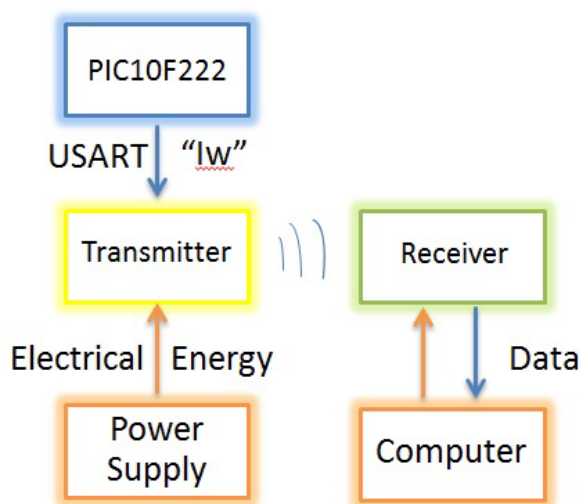
ภาพที่ 4.24 แผนผังการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อตัวรับสัญญาณใช้พลังงานจากส่วนแสดงผล



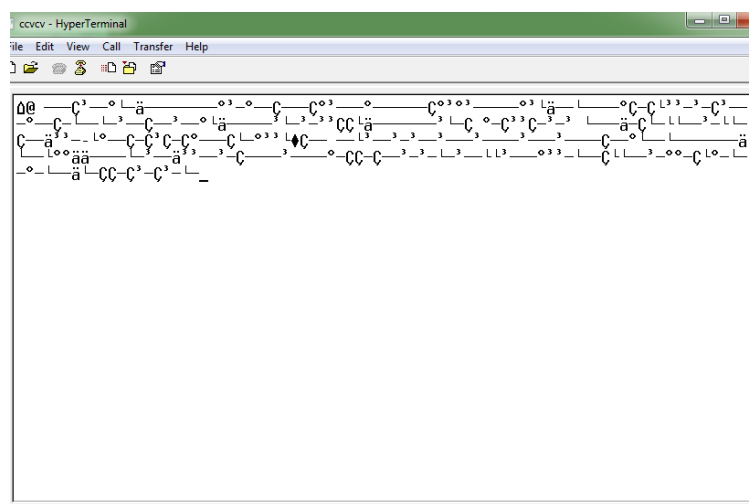
ภาพที่ 4.25 รูปสัญญาณจากตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อตัวรับสัญญาณใช้พลังงานจากส่วนแสดงผล

จาก ภาพที่ 4.25 ทำให้ทราบว่าเมื่อตัวส่งสัญญาณส่งสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) ซึ่งมีคาบเท่ากับ  $50\ \mu\text{s}$  ให้ตัวรับสัญญาณแล้ว พบว่าตัวรับสัญญาณรับสัญญาณได้แต่ไม่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมเหมือนที่ตัวส่งสัญญาณได้ส่งมาในตอนแรก สัญญาณที่ได้รับมานั้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีคาบประมาณ  $46.2\ \mu\text{s}$  และคาบของส่วนลาดชัน (Slope) ระหว่างการเปลี่ยนสัญญาณจากศูนย์ไปหนึ่งของสัญญาณที่รับได้อยู่ที่ประมาณ  $15.2\ \mu\text{s}$

หลังจากนั้นจึงทดสอบด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC10F222 ทำการส่งสัญญาณด้วย USART โดยให้ส่งสัญญาณเป็นตัวอักษร “lw” ไปยังตัวส่งสัญญาณแทนฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ และให้ตัวรับสัญญาณรับและส่งสัญญาณไปแสดงที่ส่วนแสดงผล (ในการทดลองนี้คือคอมพิวเตอร์) โดยใช้โปรแกรมไฮเปอร์เทอร์มินอล (Hyperterminal Program) ในการเชื่อมต่อ ดังแสดงในแผนภาพ ภาพที่ 4.26 ในโปรแกรมไฮเปอร์เทอร์มินอลสามารถกำหนดค่า BAUDRATE ได้หลายค่าแต่ตัวรับส่งสัญญาณไร้สายสามารถรับส่งสัญญาณที่มีความถี่ได้ในช่วง  $50 - 9600$  ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกค่า BAUDRATE 9600 มาใช้งานเพื่อให้การส่งข้อมูลสามารถส่งได้อย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้แสดงใน ภาพที่ 4.27



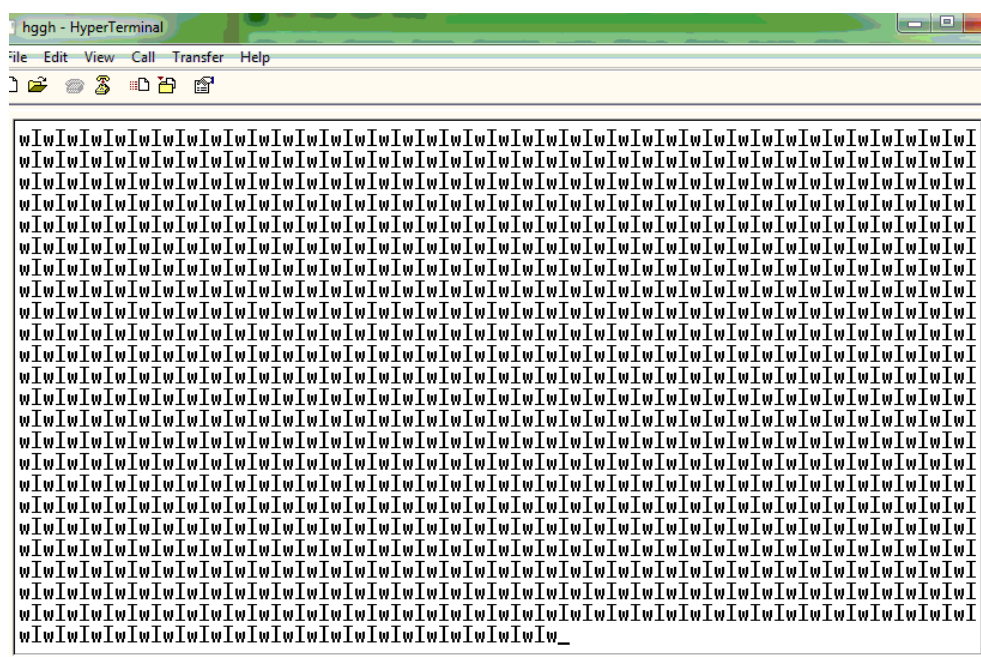
ภาพที่ 4.26 แผนผังแสดงการทดสอบระบบติดตามสภาพด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 4.27 รูปแสดงสัญญาณที่ได้รับบนหน้าจอแสดงผลเมื่อใช้ 9,600 BAUDRATE



จากภาพที่ 4.27 จะเห็นว่าการส่งสัญญาณโดยใช้ค่า BAUDRATE 9,600 นั้นทำให้การส่งสัญญาณผิดเพี้ยนไปอย่างมากเนื่องจากสัญญาณที่ส่งออกมีลักษณะเป็นสแต็ปที่มีคาบประมาณ 100 us แต่สัญญาณที่รับได้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณ “0” ไปเป็นสัญญาณ “1” ประมาณ 15.2 us ซึ่งคิดได้เป็นประมาณ 15% ของคาบที่ส่งออกไป จึงทำให้ตัวรับสัญญาณอ่านค่าที่รับได้ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องทำการลดค่า BAUDRATE ลงเพื่อให้คาบของสัญญาณที่ส่งไปมีค่ามากขึ้นเพื่อให้ส่วนที่เป็นการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณ “0” ไปเป็นสัญญาณ “1” มีผลกับการรับค่าน้อยลง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทดลองโดยลดค่า BAUDRATE ลงมาเป็น 2,400 ซึ่งจะทำให้คาบมีค่าประมาณ 416 us ซึ่งจะได้ผลออกมาดังแสดงในภาพที่ 4.28



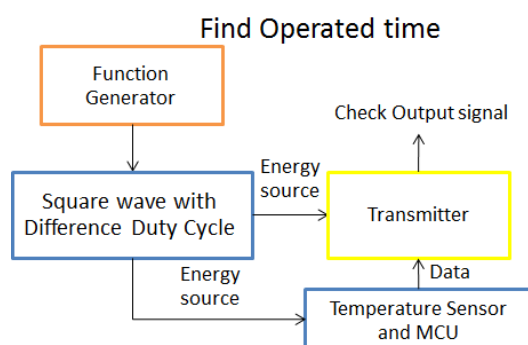
ภาพที่ 4.28 รูปแสดงสัญญาณที่ได้รับบนหน้าจอแสดงผลเมื่อใช้ 2,400 BAUDRATE

จากภาพที่ 4.28 พบว่าการส่งสัญญาณด้วย BAUDRATE 2,400 ตัวรับสัญญาณสามารถรับสัญญาณได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ค่า BAUDRATE 2,400 ในการทดลอง

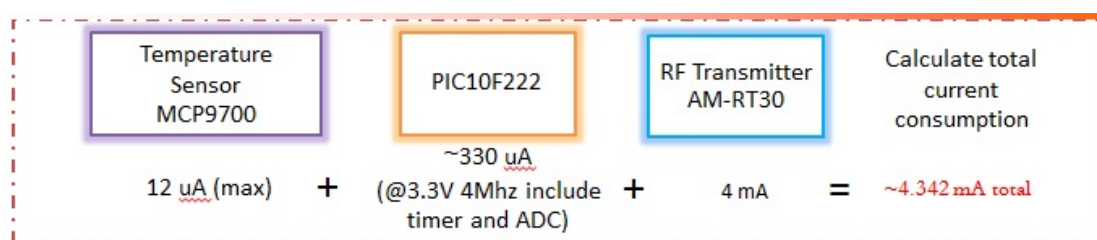
#### 4.4.3 การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

หลังจากที่ได้ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ในระบบติดตามสัญญาณและเลือกใช้ BAUDRATE ที่ 2,400 ได้แล้ว จึงหาช่วงเวลาที่ระบบจะใช้ในการทำงานได้โดยใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์แทนแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์สามารถปรับค่า Duty cycle ได้ซึ่งการทดลองจะทำโดยค่อยๆปรับ Duty cycle เพิ่มไปเรื่อย แล้วสังเกตสัญญาณเอาท์พุทว่าระบบส่งสัญญาณสามารถส่งสัญญาณออกมาได้ถูกต้องหรือไม่ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.29 ซึ่งในการทดลองพบว่าระบบส่งสัญญาณต้องการเวลาทำงานอย่างน้อย 60 ms จึงจะสามารถส่งข้อมูลออกมาได้โดยไม่ต้องมีข้อผิดพลาด จากนั้นจึงคำนวณกระแสที่ระบบต้องการจากค่าตัวเก็บประจุของอุปกรณ์แต่ละตัว ดังแสดงใน ภาพที่ 4.30





ภาพที่ 4.29 รูปแสดงการคำนวณช่วงเวลาที่ระบบจำเป็นต้องใช้ในการทำงาน



ภาพที่ 4.30 รูปแสดงการคำนวณกระแสไฟที่ระบบจำเป็นต้องใช้ในการทำงาน

จากภาพที่ 4.30 จะทราบว่าระบบส่งสัญญาณต้องการกระแสไฟประมาณ 4.342 mA ในการทำงาน จึงได้ทำการเปรียบเทียบช่วงเวลาทำงานและกระแสไฟที่สามารถจ่ายได้จากการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงานที่ทดลองเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุและตัวต้านทานได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุ ช่วงเวลาการทำงาน และกระแสไฟที่สามารถจ่ายได้

| ขนาดตัวเก็บประจุ ( $\mu\text{F}$ ) | ช่วงเวลาการทำงาน (ms) |            |             |             |
|------------------------------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|
|                                    | I = 4.342 mA          | I = 3.3 mA | I = 0.66 mA | I = 0.33 mA |
| 22                                 | 3.80                  | 5          | 25          | 50          |
| 33                                 | 8.36                  | 11         | 50          | 100         |
| 47                                 | 12.16                 | 16         | 90          | 200         |
| 100                                | 38                    | 50         | 260         | 680         |
| 220                                | 76                    | 100        | 500         | 1000        |

จาก ตารางที่ 4.4 เนื่องจากระบบส่งสัญญาณต้องการเวลาในการทำงานอย่างน้อย 60  $\mu\text{s}$  และต้องการกระแสประมาณ 4.342 mA ทำให้สามารถเลือกขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับระบบติดตามสภาพได้ คือ ตัวเก็บประจุขนาด 220  $\mu\text{F}$

#### 4.5 การทดสอบระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร

หลังจากทดสอบอุปกรณ์แต่ละตัวในแต่ละระบบแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการนำทุกระบบมาประกอบร่วมกันจนเป็นระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร โดยสมบูรณ์ เริ่มจากการเก็บพลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเมื่อเครื่องจักรทำงานด้วยโครงสร้างรับแรงที่ประกอบกับเพียโซอิเล็กทริก นำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ผ่านระบบจัดการพลังงาน และส่งพลังงานที่จัดการเรียบร้อยแล้วไปจ่ายระบบติดตามสภาพเครื่องจักรในส่วนส่งสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.31 และเมื่อส่วนรับสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.32 ได้รับสัญญาณแล้วสามารถส่งสัญญาณที่ได้รับไปแสดงในส่วนแสดงผล และแสดงผลการติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยการวัดอุณหภูมิ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มจากการทดลองวัดอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ส่วนแสดงผล ดังแสดงใน ภาพที่ 4.33

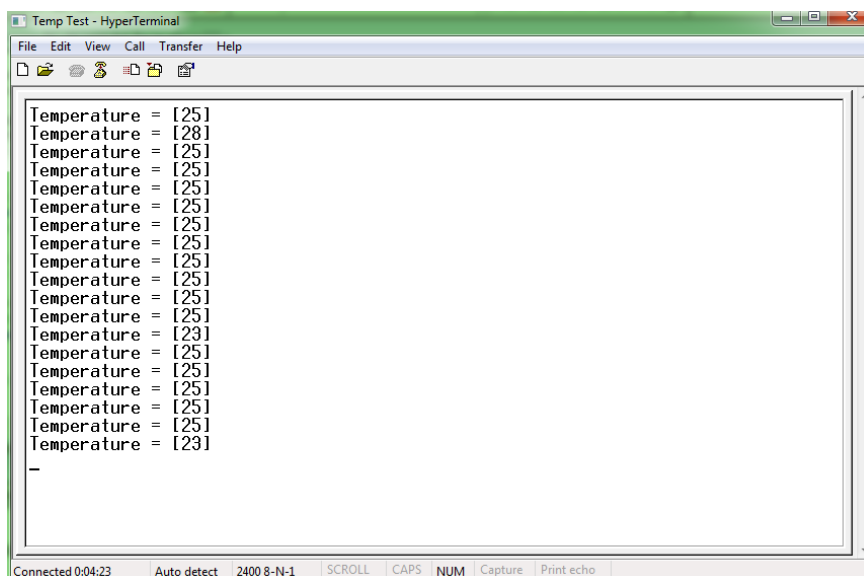
จาก ภาพที่ 4.33 จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น สามารถวัดอุณหภูมิได้โดยมีค่าที่ผิดพลาดเป็นบางค่าซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นคาดว่าเกิดจากผลของการแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลมีค่าความระเอียดไม่เพียงพอ แต่ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ จากนั้นจึงทดสอบวัดอุณหภูมิเครื่องจักร โดยได้เปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด รุ่น GM300 ที่ได้ทำการวัดอุณหภูมิไปพร้อมกับระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักรด้วย ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.34



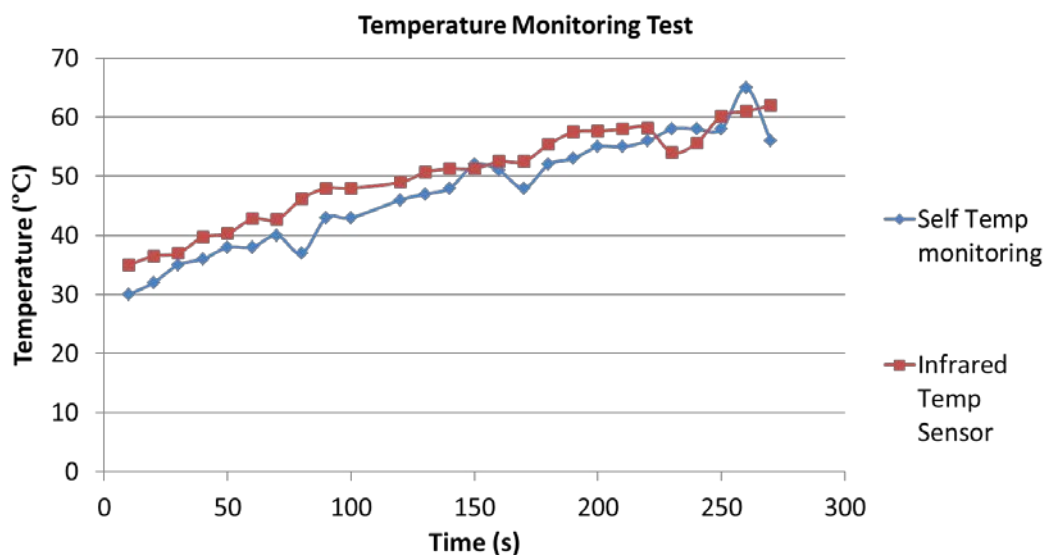
ภาพที่ 4.31 รูปแสดงการทดสอบระบบฯเมื่อจ่ายไฟให้ส่วนส่งสัญญาณ



ภาพที่ 4.32 รูปแสดงการทดสอบระบบฯส่วนรับสัญญาณและส่วนแสดงผล



ภาพที่ 4.33 รูปแสดงผลการวัดอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C)



ภาพที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิระหว่างระบบฯและเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

จาก ภาพที่ 4.34 เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้กันแล้ว พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าที่วัดได้จากอินฟราเรดจะมีค่ามากกว่าเล็กน้อยซึ่งคาดว่าเกิดจากการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700 ซึ่งถูกติดตั้งเพียงแค่วางไว้บนคอมพิวเตอร์ไม่ได้ใช้สารนำความร้อนจึงทำให้การนำความร้อนเกิดขึ้นได้ไม่ดีพอ