



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักร

SELF-POWERED SYSTEM FOR
MACHINE CONDITION MONITORING APPLICATIONS

ดอน อิศรากร

สองเมือง นันทขว้าง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักร

SELF-POWERED SYSTEM FOR
MACHINE CONDITION MONITORING APPLICATIONS



ดอน อิศรากร

สองเมือง นันทขว้าง

b. 12๗๗:๐๐85
i.

สาขาวิชา.....
เลขทะเบียน 142201
วันเดือนปี 27 เม.ย. 2559

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ ระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักร
แหล่งเงิน โครงการงบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ต.ค. 55 ถึง ก.ย. 56

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ ดร. ดอนอิศรากร สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
ผู้ร่วมโครงการ นายสองเมือง นันทขว้าง สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองเรื่องการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมด้วยอุปกรณ์เก็บพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบรับแรงกระแทก จุดมุ่งหมายของโครงการนี้คือสามารถนำพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปแบบการสั่นจากการทำงานของเครื่องจักรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยในการทดลองมีขั้นตอนในการดำเนินการ โดยเริ่มจากทดสอบโครงสร้างของอุปกรณ์ต้นแบบที่จะประกอบด้วยเพียโซเซเซอร์เข้าไปเพื่อจะนำมาใช้เป็นตัวต้นแบบต่อไป เมื่อได้โครงสร้างของอุปกรณ์ต้นแบบที่เหมาะสมแล้วจึงทำการทดสอบการแปลงพลังงานของตัวเพียโซเซเซอร์ (Piezo Buzzer) เมื่อรับแรงกระแทกจากการสั่นของเครื่องจักร จากนั้นจึงทดสอบการเก็บพลังงานจากตัวเพียโซเซเซอร์โดยนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากตัวเพียโซเซเซอร์ผ่านวงจรจัดการพลังงานและนำไปสะสมพลังงานด้วยตัวเก็บประจุ สุดท้ายจึงนำพลังงานไปใช้ติดตามสภาพเครื่องจักรโดยในการทดสอบนี้จะติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยการวัดอุณหภูมิ โดยใช้เซ็นเซอร์ และอุปกรณ์รับส่งสัญญาณในการวัดอุณหภูมิ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

คำสำคัญ : การเก็บเกี่ยวพลังงาน, เพียโซอิเล็กทริก, อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบกระแทก, วงจรจัดการพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Self-Powered System for Machine Condition Monitoring Applications

Researcher: Dr.Don Isarakorn, Mr.Songmoung Nundrakwang

Faculty:Engineering..... **Department:**Instrumentation and Control Engineering.....

ABSTRACT

This research presents energy harvesting using an impact type piezoelectric energy harvester to capture waste energy from machine vibrations and convert them into usable electrical energy for low power electronic devices. In this work, the concept of impact energy harvesting is proposed by utilizing a piezo buzzer as a power generator. Its electrical characteristics are evaluated when subjected to impact forces in order to examine the harvestable energy performance. Afterward, the power management circuit is investigated, which is one specific need to realize fully-functional energy harvesting systems.

Keyword : energy harvesting, piezo buzzer, impact type generator, power management circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ที่งานวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้นั้นเกิดจากการที่คณะที่มิวิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนโครงการงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2556 ทางทีมงานจึงต้องขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง

ดร.ดอน อิศรากร

นายสองเมือง นันทขว้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 หลักการออกแบบอุปกรณ์และระบบเก็บพลังงาน	12
3.1 การเลือกเครื่องจักร.....	12
3.2 โครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์.....	14
3.3 ระบบเก็บพลังงาน.....	16
3.4 ระบบติดตามสภาพเครื่องจักร.....	17
บทที่ 4 ผลการวิจัย	19
4.1 การทดสอบวัดความถี่สั่นพ้องเครื่องจักร.....	19
4.2 การทดสอบโครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์.....	21
4.3 การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงาน.....	26
4.4 การทดสอบการทำงานของระบบติดตามสภาพเครื่องจักร.....	29
4.5 การทดสอบระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	41
ภาคผนวก ก.....	42
ภาคผนวก ข.....	63
ประวัตินักวิจัย	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พลังงานเอาต์พุตของตัวเก็บพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (Energy Harvester)	7
3.1 ตารางแสดงคุณสมบัติเพียโซบัสเซอร์รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139	14
4.1 ผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสอง กระแสเฉลี่ยของรอกกำลังสองและกำลังเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าสูงสุด	22
4.2 แสดงผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสอง กระแสเฉลี่ยของรอกกำลังสองและกำลังเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน	24
4.3 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานกับเวลา	27
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุ ช่วงเวลาการทำงานและกระแสไฟที่สามารถจ่ายได้	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนการสั่นเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	1
2.1 แสดงภาพการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรต่างๆขณะทำงาน.....	4
2.2 แสดงภาพชิ้นส่วนเกิดความหลวม.....	4
2.3 การทำงานของการติดตามสภาพพึ่งพาตนเอง.....	5
2.4 แสดงแผนภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมแบบคร่าวๆ.....	6
2.5 แสดงแผนภาพตัวอย่างการใช้งานEHในเซนเซอร์.....	7
2.6 ผลทางตรงและผลทางอ้อมของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	8
2.7 แสดงภาพวงจร PMICs แบบหนึ่ง.....	9
2.8 แสดงภาพอินพุตและเอาต์พุตหลังผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์.....	10
2.9 แสดงภาพบัคคอนเวอร์เตอร์อย่างง่าย.....	10
3.1 แผนผังภาพรวมของระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร.....	11
3.2 เครื่องปั๊มลมขนาดเล็ก รุ่น OL-1204.....	12
3.3 เพียโซโซลเซอร์แบบกลม รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139.....	14
3.4 แบบร่างโครงสร้างรับแรง.....	15
3.5 โครงสร้างรับแรงที่ประกอบกับเพียโซโซลเซอร์ หรือ อุปกรณ์ต้นแบบ.....	15
3.6 วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1.....	16
3.7 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ขนาดความจุต่างๆ.....	17
3.8 แผนผังภาพรวมของระบบติดตามสภาพเครื่องจักร.....	17
4.1 ข้อมูลความเร่งของเครื่องปั๊มลมเมื่อเทียบกับเวลา.....	20
4.2 การวิเคราะห์โดยวิธีฟาสต์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fast Fourier Transform) ของแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากเครื่องปั๊มลม.....	20
4.3 ภาพแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซโซลเซอร์.....	21
4.4 แผนภาพแสดงการต่อตัวต้านทานขนานกับเพียโซโซลเซอร์.....	21
4.5 ภาพอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบเพียโซโซลเซอร์ 1 ตัว.....	22
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากลำแสงสองกับค่าความต้านทาน.....	23
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเฉลี่ยของรากลำแสงสองกับค่าความต้านทาน.....	23
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน.....	23
4.9 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบต่อแบบคอนโด.....	24
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากลำแสงสองกับค่าความต้านทาน.....	25
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเฉลี่ยของรากลำแสงสองกับค่าความต้านทาน.....	25
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน.....	25
4.13 ผลตอบสนองจากวงจรจัดการพลังงาน.....	26
4.14 รูปแสดงตำแหน่งค่าขนาดตัวเก็บประจุและค่าการระคายความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในการทดลอง.....	26
4.15 รูปขณะทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงาน.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.16 กราฟแสดงช่วงเวลาที่ใช้ในการชาร์จ.....	28
4.17 กราฟแสดงช่วงเวลาในการทำงาน.....	28
4.18 รูปสัญญาณเอาต์พุตเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF	29
4.19 รูปสัญญาณจากเอาต์พุตเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณตัวเก็บประจุขนาด 1 μF และตัวต้านทานขนาด 200 Ω	30
4.20 รูปสัญญาณเมื่อจ่ายพลังงานแบบสแต็ปให้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ติดตัวกรองสัญญาณ.....	30
4.21 รูปขณะทำการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณ.....	31
4.22 แผนผังการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณขั้นแรก.....	31
4.23 รูปสัญญาณที่ได้จากตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อทำการทดสอบการทำงานขั้นแรก.....	31
4.24 แผนผังการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อตัวรับสัญญาณใช้พลังงานจากส่วนแสดงผล.....	32
4.25 รูปสัญญาณจากตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อตัวรับสัญญาณใช้พลังงานจากส่วนแสดงผล.....	32
4.26 แผนผังแสดงการทดสอบระบบติดตามสภาพด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	33
4.27 รูปแสดงสัญญาณที่ได้รับบนหน้าจอแสดงผลเมื่อใช้ 9,600 BAUDRATE.....	33
4.28 รูปแสดงสัญญาณที่ได้รับบนหน้าจอแสดงผลเมื่อใช้ 2,400 BAUDRATE.....	34
4.29 รูปแสดงการคำนวณช่วงเวลาในระบบจำเป็นต้องใช้ในการทำงาน.....	35
4.30 รูปแสดงการคำนวณกระแสไฟในระบบจำเป็นต้องใช้ในการทำงาน.....	35
4.31 รูปแสดงการทดสอบระบบฯเมื่อจ่ายไฟให้ส่วนส่งสัญญาณ.....	36
4.32 รูปแสดงการทดสอบระบบฯส่วนรับสัญญาณและส่วนแสดงผล.....	36
4.33 รูปแสดงผลการวัดอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง (25 $^{\circ}\text{C}$).....	37
4.34 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิระหว่างระบบฯและเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

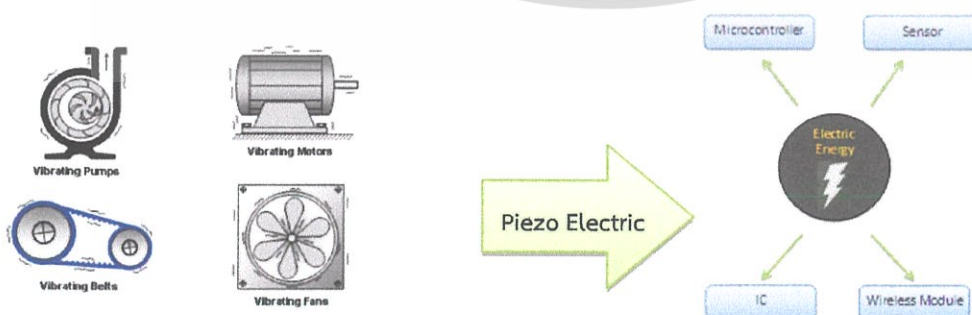
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆในปัจจุบัน เครื่องจักรเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในขบวนการผลิต หากเครื่องจักรไม่ได้รับการซ่อมบำรุง(Maintenance) ที่ดีพอ จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง จึงต้องมีการกำหนดการซ่อมบำรุงเป็นระยะๆเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิต แต่การซ่อมบำรุงในแต่ละครั้งจำเป็นต้องหยุดขบวนการผลิต เพื่อตรวจสอบสภาพเครื่องจักร หรือต้องสั่งซื้ออุปกรณ์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรมาติดตั้งใหม่หากเกิดความเสียหายมาก ทำให้ขบวนการผลิตต้องหยุดชะงัก ธุรกิจเสียหายและที่สำคัญคือเครื่องจักรเหล่านี้มักมีราคาแพงและใช้เวลาในการซ่อมแซมค่อนข้างนาน ทำให้งานผลิตที่รับมานั้นไม่สามารถส่งงานตามกำหนดได้ หรือบางครั้งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือเครื่องจักรอื่น ๆ ตลอดจนสภาพแวดล้อมใกล้เคียงด้วย การใช้ระบบตรวจสอบสภาพเครื่องจักร (Machine Monitoring System) จึงเป็นคำตอบสำหรับปัญหาข้างต้น [1]

ระบบตรวจสอบสภาพเครื่องจักรในปัจจุบันนั้นจำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก เช่น แบตเตอรี่ ในการทำงานของระบบ ซึ่งเป็นทั้งการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาในการเปลี่ยนแหล่งพลังงาน เป็นการเพิ่มภาระแฝงในขบวนการผลิต จึงเกิดแนวคิดในการทำระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรขึ้น เครื่องจักรไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็กจนหรือไปจนถึงขนาดใหญ่เมื่อเครื่องจักรทำงานแล้วจะเกิดการสูญเสียพลังงาน (Energy loss) ในหลายรูปแบบ หนึ่งในนั้นก็คือการสั่นสะเทือน (Vibration) ระบบตรวจสอบที่ออกแบบจะอาศัยพลังงานที่สูญเสียในรูปแบบนี้ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ระบบตรวจสอบสภาพเครื่องจักรเพื่อใช้พลังงานที่สูญเสียให้เป็นประโยชน์ โดยอาศัยการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting) [2,3] จากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) [4-6] ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยจะติดตั้งตัวเพียโซโซบเซอร์ (Piezo Buzzer) ไว้ที่ตัวโครงสร้าง (Structure) ก่อนที่จะนำตัวโครงสร้างที่ประกอบกับตัวเพียโซโซบเซอร์ไปติดกับเครื่องจักร เมื่อเครื่องจักรเดินเครื่องจะเกิดการสั่น [7,8] จนเกิดแรงกระแทก (Impact) ไปที่ตัวเพียโซโซบเซอร์ พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บสะสมด้วยวงจร จัดการพลังงาน LTC3588-1 แล้วจึงนำพลังงานที่เก็บสะสมได้ไปใช้กับตัวเซ็นเซอร์และตัวรับส่งสัญญาณเพื่อตรวจสอบสภาพเครื่องจักร ดังแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนการสั่นเป็นพลังงานไฟฟ้า [9]

ที่มา : Commtest Instrument Ltd. “Beginner Guide to Machine Vibration”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการทำการวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และการนำระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยออกแบบตัวเครื่องที่เอื้อให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก [10] เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกและคุ้มค่างับประสิทธิภาพเพื่อลดค่าใช้จ่าย โดยระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรที่นำเสนอในการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1. เพื่อศึกษา และออกแบบระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักร โดยการนำพลังงานที่สูญเสียจากเครื่องจักรเมื่อเดินเครื่องมาใช้ เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากระบบตรวจสอบสภาพเครื่องจักรที่ใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอก

1.2.2. เพื่อพัฒนาระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และสามารถพัฒนาต่อยอดได้ในอนาคต

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการทดลองระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรนั้น จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ โครงประกอบเพียโซโซลาร์ วงจรเก็บพลังงาน LTC3588-1 และตัวรับส่งสัญญาณ ในการวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักร เพื่อนำพลังงานที่สูญเสียในการเดินเครื่องจักรในรูปแบบการสั่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการตรวจสอบสภาพ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้การศึกษาเชิงปฏิบัติการ โดยเริ่มแรกได้ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร บทความ งานวิจัย รายงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักร เมื่อเห็นถึงข้อจำกัดของเครื่องติดตามสภาพเครื่องจักรในปัจจุบันแล้วจึงนำมาออกแบบให้สามารถแก้ไขข้อจำกัดนั้น เพื่อลดต้นทุนในการสร้างระบบจึงเลือกใช้เพียโซโซลาร์ที่มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพและราคา และใช้แนวทางเดียวกันในการเลือกวงจรเก็บพลังงาน [11,12] อีกทั้งยังใช้โครงฐานที่ทำจากอะคริลิกเนื่องด้วยเหตุผลในด้านความคงทนและราคาเช่นเดียวกัน แล้วจึงนำไปติดตั้งกับชุดการทดลองจริง เก็บผลและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ในการเลือกใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่เหมาะสม แล้วจึงนำทุกส่วนมาทดสอบการใช้งานร่วมกันทั้งหมดอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ ปรับเปลี่ยน แก้ไข เพื่อให้ได้ระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตัวเองสำหรับการตรวจติดตามสภาพของเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานแก่ระบบติดตามสภาพเครื่องจักรเพื่อใช้แก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดจากแบตเตอรี่ซึ่งปัจจุบันเป็นแหล่งพลังงานของระบบติดตามสภาพเครื่องจักรได้ เช่น ลดการเสียดเวลาและแรงงานในการเปลี่ยนแบตเตอรี่รักษาสิ่งแวดล้อมและลดขยะที่เป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เครื่องจักร

เครื่องจักร(Machine) หมายถึง สิ่งที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้น สำหรับ ก่อกำเนิดพลังงาน เปลี่ยนหรือแปรสภาพพลังงาน หรือส่งพลังงาน ทั้งนี้ ด้วยกำลังน้ำ ไอน้ำ พลังลม แก๊ส ไฟฟ้า หรือพลังงานอื่น อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกัน และหมายความถึง เครื่องอุปกรณ์ ฟิล์ม ฟิล ปุเล่ สายพาน เพลา เกียร์ หรือสิ่งอื่นที่ทำงานสัมพันธ์กันและรวมถึงเครื่องมือกลด้วย

2.1.2 ประเภทของเครื่องจักร

จากคำนิยามของเครื่องจักรจะเห็นว่า ได้รวบรวมเอาคุณสมบัติ รูปลักษณ์ และ ลักษณะการทำงานหลายประเภทซึ่งจะเห็นได้จากการนำเข้าไปใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงาน อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานปั๊มโลหะ โรงสีข้าว โรงงานน้ำตาล โรงงานประกอบรถยนต์ เป็นต้น เพื่อให้ เห็นลักษณะการทำงานที่ชัดเจนของเครื่องจักรที่ใช้ในโรงงาน สามารถจำแนกประเภทของเครื่องจักรออกได้ เป็น 3 ประเภท คือ

1. เครื่องต้นกำลัง เป็นเครื่องจักรที่ใช้ผลิตหรือเปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล นอกจากนั้นก็ยังมีเครื่องต้นกำลังอื่นๆ เช่น หม้อไอน้ำเครื่องยนต์ เป็นต้น

2. เครื่องส่งกำลัง คือ อุปกรณ์ที่ใช้ส่งผ่านกำลังจากเครื่องต้นกำลังไปใช้งานอื่นต่อไป เช่น เพลา สายพาน โซ เฟือง ท่อลมอัดต่างๆ เป็นต้น

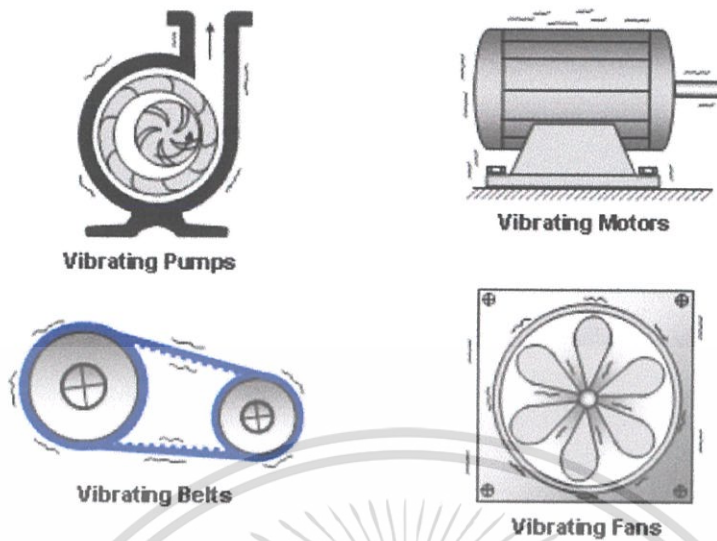
3. เครื่องจักรทำการผลิต เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตต่างๆ ประกอบด้วยเครื่องจักรที่แยกทำงาน เฉพาะในแต่ละเครื่อง เช่น เครื่องเจาะ เครื่องอัด เครื่องตัด เครื่องกลึง เครื่องไส เป็นต้น และเครื่องจักรที่ ออกแบบพิเศษเป็นลักษณะสายการผลิตที่ทำงานต่อเนื่อง เช่น เครื่องรีดโลหะ เครื่องผลิตท่อ น้ำ เครื่องผลิต ขวดแก้ว เครื่องผลิตภาชนะพลาสติก เครื่องบรรจุอาหาร เป็นต้น เครื่องจักรเหล่านี้ล้วนทำการผลิตต่างๆ จากวัตถุดิบหรือชิ้นงานให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์

2.1.3 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

การสั่นสะเทือน(Vibration) เป็นการเคลื่อนที่ทางไดนามิก ซึ่งเป็นผลมาจากการส่ง แรงกระตุ้นไปยังมวล โดยสามารถบอกได้ว่าวัตถุเกิดการสั่นได้จากหลากหลายวิธี เช่น สัมผัสวัตถุนั้น จากการ สังเกตการเคลื่อนไหวไปกลับของวัตถุ (Back-and-forth movement) หรือบางครั้งสามารถได้ยินได้ว่าวัตถุ เกิดการสั่นได้ ตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆก็มีการสั่นประเภทหนึ่งนั่นก็คือ การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร (Machine vibration) ดังแสดงในภาพที่ 2.1

การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหากกล่าวง่าย ๆ มันก็คือ การเคลื่อนที่เข้าไปเข้ามาหรือการสั่นของ เครื่องจักรนั่นเอง การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเกิดขึ้นได้หลากหลายแบบ อาจเกิดการสั่นสะเทือนมาก น้อยต่างกัน ความเร็วในการสั่นอาจสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ ในการสั่นสะเทือนอาจเกิดหรือไม่เกิดเสียง หรือความร้อนก็ได้ การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นนี้ก็สามารถออกแบบได้ว่าจะให้เกิดขึ้นมากน้อย เพียงใด หรือต้องการแรงสั่นไม่เกินเท่าใด ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 แสดงภาพการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรต่างๆขณะทำงาน [9]
ที่มา : Commtest Instrument Ltd. “Beginner Guide to Machine Vibration”

การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเกิดได้จากหลายๆสาเหตุโดยสามารถแบ่งได้กว้างๆ 3 ประเภท ดังนี้

1. แรงกระทำซ้ำ การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรส่วนมากเกิดจากแรงกระทำซ้ำ หรือก็คือมีแรงมากระทำซ้ำไปซ้ำมาในรูปแบบเดิมๆอย่างต่อเนื่องนั่นเอง แรงกระทำซ้ำที่ทำให้เครื่องจักรเกิดการสั่นสะเทือนนั้นส่วนมากมาจากการหมุนอย่างไม่สมดุล ความผิดพลาดในการวางตามแนว ความเสื่อมของเครื่องจักร การที่เครื่องจักรขัดข้อง หรือสภาพเครื่องจักรไม่สมบูรณ์

2. ความหลวม การสั่นสะเทือนจากการหลวม (ภาพที่ 2.2) เกิดจากชิ้นส่วนมากมายหลายชิ้นประกอบกันเป็นเครื่องจักรเพียงหนึ่งเครื่อง แต่หากชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งเกิดอาการหลวม เครื่องจักรนั้นก็ จะเกิดการขัดข้องหรือทำงานได้ไม่สมบูรณ์ บางครั้งอาจทำให้เกิดการชำรุดตามมาได้หากไม่ตรวจสอบและแก้ไขโดยเร็ว



ภาพที่ 2.2 แสดงภาพชิ้นส่วนเกิดความหลวม [9]
ที่มา : Commtest Instrument Ltd. “Beginner Guide to Machine Vibration”

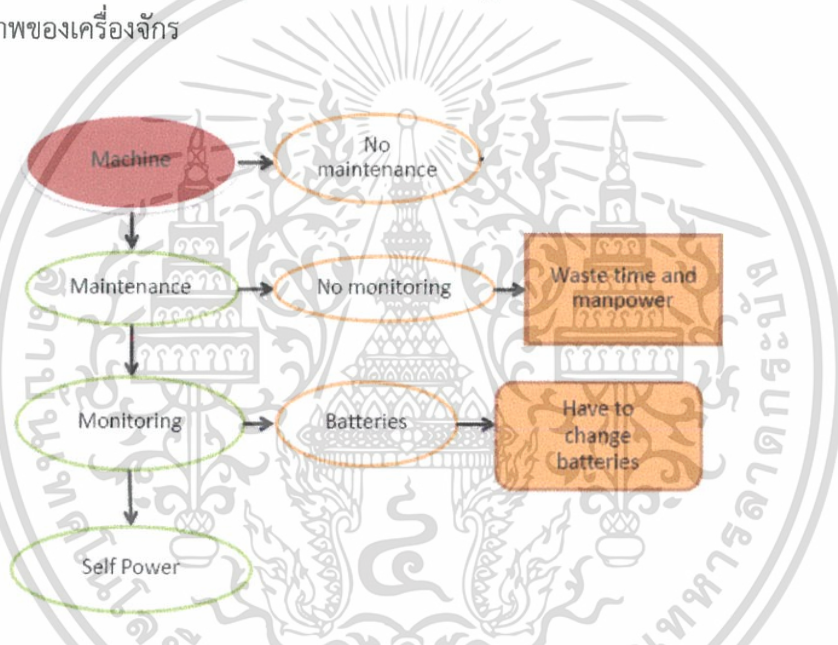
3. เรโซแนนซ์ คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุโดยความถี่ของแรงที่กระทำแก่วัตถุมีความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่นตามธรรมชาติของวัตถุนั้น จะทำให้วัตถุสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลทำให้วัตถุนั้นสั้นด้วยแอมพลิจูดที่สูงที่สุด การสั้นที่เกิดขึ้นสามารถรุนแรงได้ถึงขั้นทำให้โครงสร้างที่สั้นเกิดความเสียหายได้

2.1.4 การติดตามสภาพพึ่งพาตนเอง

การติดตามสภาพ (Monitoring) คือ กระบวนการของการวัดหรือการตรวจสอบที่ทำเป็นประจำเป็นช่วงๆ การวัดและการตรวจสอบดังกล่าวได้แก่ การวัดปัจจัยนำเข้า (Inputs) กระบวนการ (Process) และผลผลิต (Outputs) ที่เกิดขึ้นในช่วงการดำเนินงานตามแผน โดยทั่วไปมักติดตามใน ด้านการจัดหา การเคลื่อนย้าย และการนำทรัพยากรของโครงการมาใช้ว่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแผนและกำหนดการหรือไม่ โดยทั่วไปแล้วระบบติดตามสภาพจะใช้พลังงานจากภายนอกจำพวกแบตเตอรี่ ไม่สามารถสร้างพลังงานด้วยตนเองได้ การทำให้สร้างพลังงานด้วยตนเองได้จะต้องใช้วงจรจัดการพลังงาน Power Management ICs (PMICs) และการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาช่วยให้การติดตามสภาพสามารถสร้างพลังงานด้วยตนเองได้ (Self-powered monitoring) ภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการติดตามสภาพของเครื่องจักร



ภาพที่ 2.3 การทำงานของการติดตามสภาพพึ่งพาตนเอง

2.1.5 การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม

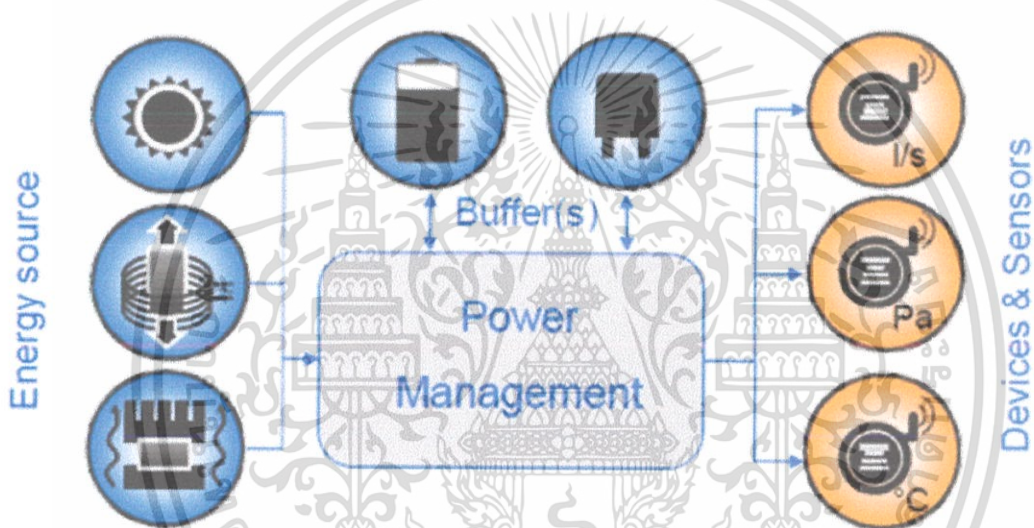
การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม(Energy harvesting : EH) หรือที่รู้จักกันในชื่ออื่น เช่น Power harvesting, energy scavenging โดยเป็นกระบวนการที่เก็บสะสมพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานความร้อน, พลังงานลม, ค่าความเค็ม และพลังงานจลน์ เป็นต้น) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป พลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมโดยมากแล้วจะเป็นพลังงานที่มีค่าไม่สูงมากจึงจำเป็นต้องมีการใช้วงจรจัดการพลังงานเพื่อเก็บสะสมพลังงานและปรับระดับของพลังงานให้เหมาะสมกับการนำมาใช้งานโดยการสะสมพลังงานนั้นอาจสะสมในตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่โดยการเลือกใช้แหล่งสะสมพลังงานนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้พลังงานที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บเกี่ยวพลังงานดังกล่าวสามารถใช้เปลี่ยนพลังงานต่างๆ เช่น พลังงานจากร่างกายมนุษย์, ของไหล, ค่าความต่างของอุณหภูมิ, การสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนไหว, แพลงสภาพดิน, พีซีพี, แสง UV, แสงในย่านที่ตามองเห็น และแสงอินฟราเรด ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้

2.1.6 หลักการทำงานของ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์ EH จะแปลงพลังงานจากสิ่งแวดล้อมให้เป็นพลังงานไฟฟ้า บางระบบจะแปลงจากการเคลื่อนไหว เช่น แพลงคลื่นในมหาสมุทรให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับเซนเซอร์ที่ทำการติดตามสภาพ ด้านสมุทรศาสตร์ที่สามารถทำงานด้วยตัวเองได้อย่างอิสระ (autonomous) การประยุกต์ใช้งานในอนาคตอาจรวมถึงอุปกรณ์ที่มีเอาร์ทพุตทาวเวอร์ในระดับสูง (หรืออาจจะเป็น array ของอุปกรณ์ดังกล่าว) ที่ใช้งานในพื้นที่ห่างไกลเพื่อป้อนพลังงานให้โรงไฟฟ้าสำหรับระบบใหม่ๆ ภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นภาพรวมในเรื่องการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.4 แสดงแผนภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมแบบคร่าวๆ[13]

ที่มา : J. Carpenter and Y. Ramadass. "Fundamentals of ambient energy transducers in energy harvesting systems."

การประยุกต์ใช้งานแบบหนึ่งที่พบกัน คือ ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา โดยที่ EH จะเป็นตัวป้อนพลังงานหรือทำการชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์, อุปกรณ์วิทยุสื่อสาร ฯลฯ โดยที่อุปกรณ์เหล่านี้ต้องมีความทนทานและสามารถทำงานได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ยากแก่การเข้าถึงหรือโหดร้ายโดยที่จะมีค่า dynamic sensitivity ในขอบเขตที่กว้าง

ในการสะสมพลังงานนั้น เราสามารถทำการเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อนำมาป้อนให้อุปกรณ์เซนเซอร์ขนาดเล็กที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง เช่น เซนเซอร์ที่ใช้เทคโนโลยี MEMS (MicroElectroMechanical systems) ระบบที่กล่าวนี้จะมีขนาดเล็กมากและต้องการพลังงานเพียงเล็กน้อย แต่ระบบนี้จะมีข้อจำกัดตรงที่ต้องใช้แบตเตอรี่ในการใช้งาน หากเราสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น การสั่น ลม ความร้อน หรือแสง เราจะสามารถทำให้การเซนเซอร์เหล่านี้ทำงานได้แบบไร้ขีดจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

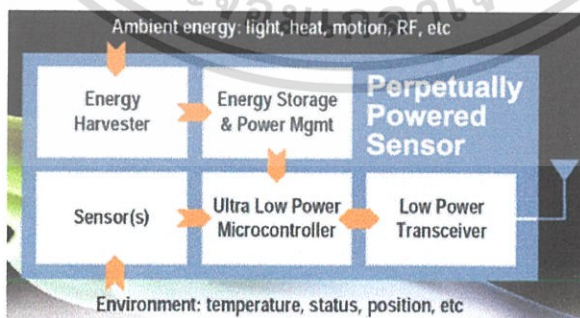
การเก็บเกี่ยวพลังงานแต่ละอย่างนั้นจะมีระดับค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Power Density) หลักการเก็บเกี่ยวพลังงาน และวงจรจัดการพลังงานที่ใช้แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว อุปกรณ์ที่เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวจะมีค่าอยู่ในระดับ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

ตารางที่ 2.1 พลังงานเอาต์พุตของตัวเก็บพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (Energy Harvesters)

Energy Harvesting Source		Power Density	Harvester Consideration	Circuit consideration
Light	Indoor	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Light intensity and wavelength	Low power efficiency MPPT
	Outdoor	10 mW/cm ²		
Vibration Piezoelectric	Human	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Amplitude of the vibration and resonant frequency	AC/DC Conversion, Impedance matching
	Machine	250 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$		
Vibration Electromagnetic	Human	50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Thermal gradient, Heat flux	Low-voltage startup
	Machine	2 mW/cm ²		
Thermal	Human	25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Distance from source and resonance of antenna	High efficiency low-voltage rectification
	Machine	10 mW/cm ²		
Radio Waves	Background	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$		
	Direct	1 mW/cm ²		

การเก็บพลังงาน โดยทั่วไปแล้วพลังงานที่ได้จะเก็บอยู่ในตัวเก็บประจุ หรือแบตเตอรี่ เราจะใช้ตัวเก็บประจุในกรณีที่ใช้งานนั้นๆ ต้องใช้พลังงานเป็นแบบ Energy spike ที่มีปริมาณมาก ส่วนแบตเตอรี่จะมีการรั่วไหลของพลังงานน้อยกว่าและนิยมใช้ในงานที่อุปกรณ์ต้องการพลังงานที่ค่อนข้างคงที่

การใช้พลังงาน ความสนใจในเทคโนโลยี EH ในปัจจุบันนั้นอยู่ที่การใช้งานกับเครือข่ายเซนเซอร์ที่ทำงานอย่างอิสระ (ภาพที่ 2.5) ในการประยุกต์ใช้แบบนี้ EH จะเก็บพลังงานในตัว capacitor จากนั้นจะทำการ boost/regulate ไปยังตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ชั้นที่ 2 เพื่อนำมาทำงานของเซนเซอร์ในการเก็บข้อมูลและการส่งข้อมูล



ภาพที่ 2.5 แสดงแผนภาพตัวอย่างการใช้งานEHในเซนเซอร์ [14]

ที่มา : ABB. “Energy Harvesting: Positive adoption trends expected to double the market within 5 years”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค

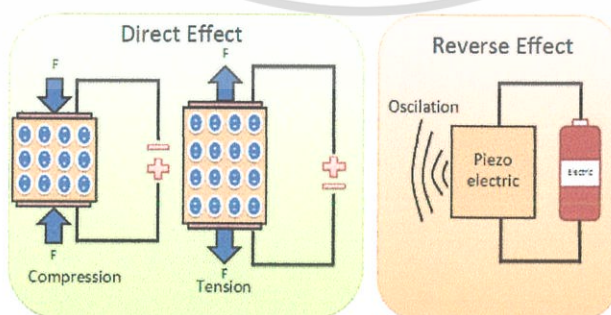
ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Microelectromechanical Systems or MEMS) เป็นคำที่ใช้เรียกในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นๆ ส่วนประเทศในทวีปยุโรปจะเรียกว่า ระบบจุลภาค (Microsystems) ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค คือ อุปกรณ์ที่มีขนาดอยู่ในช่วงระดับไมโครเมตร (10^{-6} เมตร หรือ หนึ่งในหนึ่งล้านเมตร) และมิลลิเมตร (10^{-3} หรือ หนึ่งในหนึ่งพันเมตร) หรือระหว่าง 1 ไมโครเมตร และ 1 มิลลิเมตร ซึ่งรวมส่วนประกอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมเครื่องกลเข้าไว้ด้วยกัน โดยอุปกรณ์อาจมีความสามารถในการรับรู้ ค่าอุณหภูมิผลตอบสนอง ควบคุม สื่อสาร และมีแหล่งพลังงานรวมอยู่ในตัวเอง

ปัจจุบันมีการพัฒนาในด้านเทคโนโลยี MEMS มากขึ้นทำให้ขนาดวัสดุที่ใช้ใน MEMS นั้นมีหลายแบบ โดยมีทั้งแบบซิลิกอน พอลิเมอร์ เซรามิก และโลหะ แล้วแต่ลักษณะการใช้งาน พื้นที่ สภาพแวดล้อม ความคงทน และต้นทุนสำหรับการใช้งาน

2.1.8 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1880 โดย Pierre Curies ได้ศึกษาผลของความดันต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกควอตซ์ (Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) อัญมณี (Tourmaline) ว่าสามารถให้กำเนิดไฟฟ้าได้เมื่อมีแรงกดกระทำต่อผลึก เขาให้ชื่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่าปรากฏการณ์ “เพียโซอิเล็กทริก” ต่อมาในปี ค.ศ. 1881 Gabriel Lippmann ได้ศึกษาค้นพบปรากฏการณ์ย้อนกลับได้ โดยพิจารณาจากหลักเทอร์โมไดนามิกส์ คือถ้าให้ไฟฟ้าเข้าไปในผลึกผลึกก็จะสั่นได้ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้รับแรงเค้น (Mechanical Stress) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการประจุไฟฟ้า (Electric Charge) หรือการจัดเรียงตัวทางแสง (Polarization) เรียกว่า “ผลทางตรง” (Direct Effect) เมื่อนำวงจรต่อเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงอัดจะมีกระแสไหลเข้าวงจรและหากเปลี่ยนเป็นแรงดึงจะเกิดกระแสไหลในทิศทางตรงข้าม การประยุกต์จากผลทางตรง เช่น ไมโครโฟน และสัญญาณโซนาร์ เป็นต้น

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าจะเกิดแรงเครียดอัดภายในผลึก (Compression Strain) ทำให้วัสดุเกิดการบิดรูปไปจากเดิม และหากกลับทิศทางของสนามจะเกิดแรงเครียดดึง (Tensile Strain) ปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า “ผลทางอ้อม” (Indirect Effect, Reverse Effect) งานประยุกต์ผลทางอ้อม เช่น เต้าจุดแก๊ส, ทรานสดิวเซอร์โซนิก (Ultrasonic Transducers), แอคชูเอเตอร์ (Actuators) เป็นต้น ภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก



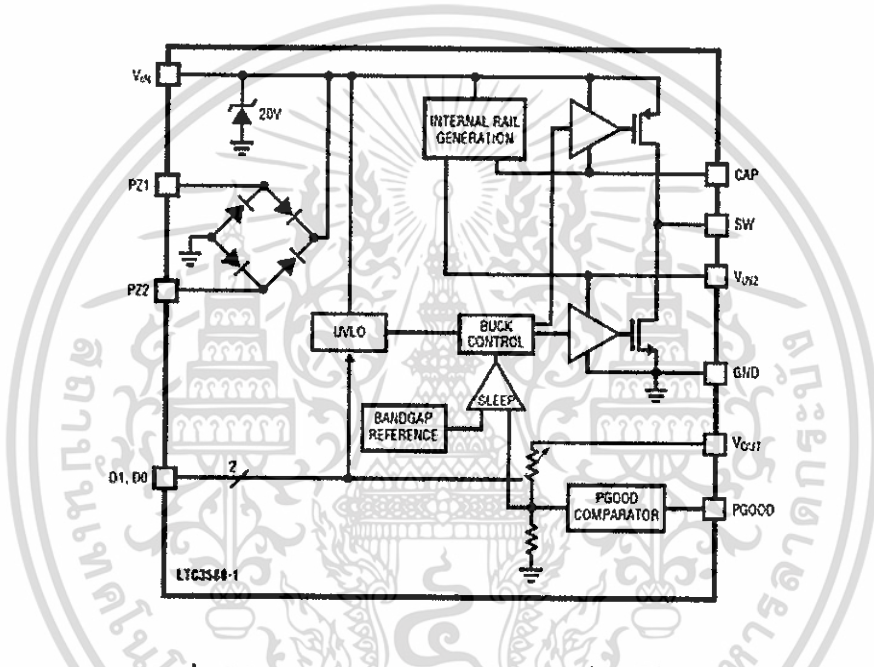
ภาพที่ 2.6 ผลทางตรงและผลทางอ้อมของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9 วงจรจัดการพลังงาน

วงจรถัดการพลังงาน (Power Management ICs : PMIC) คือ วงจรอินทิเกรต (หรือวงจรรวมในอุปกรณ์ชิพ) ที่มีไว้สำหรับจัดการพลังงานที่จำเป็นต่อตัวระบบหลัก บ่อยครั้งที่ตัว PMIC ถูกใช้ในอุปกรณ์สะสมพลังงานจำพวกแบตเตอรี่ในโทรศัพท์มือถือหรืออุปกรณ์พกพา

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันต่างก็มีความต้องการในการใช้แรงดันไฟฟ้าเฉพาะค่าของตน คือมีการใช้แรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากันและยังมีความต้องการจากแหล่งจ่ายที่ไม่เหมือนกันอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วแรงดันไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จะมีตั้งแต่ 5V, 3.3V, 1.8V เป็นต้น แหล่งจ่ายกระแสก็เป็นอีกอย่างหนึ่งซึ่งมีความสำคัญโดยอุปกรณ์ใหม่นี้ใช้แหล่งจ่ายได้แม้กระทั่งกับ USB ฉะนั้นตัว PMIC จึงอาจมีฟังก์ชันที่หลากหลายเพื่อให้ครอบคลุมถึงความต้องการของอุปกรณ์ใหม่ๆ ด้วย ภาพที่ 2.7 แสดงถึงตัวอย่างวงจรถัดการพลังงาน LTC3588-1 ที่ใช้งานในการทดลองนี้



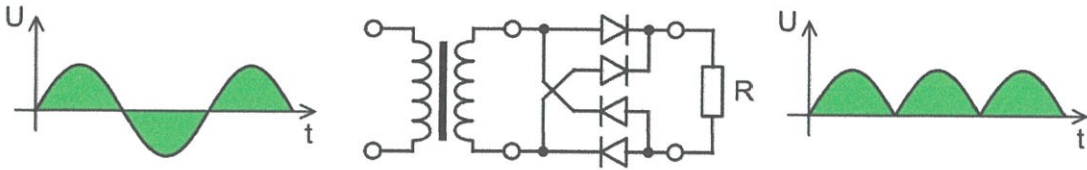
ภาพที่ 2.7 แสดงภาพวงจร PMICs แบบหนึ่ง [15]

ที่มา : Datasheet LTC3588-1

วงจรถัดเก็บพลังงานหนึ่งตัวนั้นอาจจะมิตั้งระบบจัดการแบตเตอรี่ ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้า และฟังก์ชันชาร์จพลังงาน หรือรวมทั้งอาจจะมิตั้งระบบแปลงไฟแบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับและเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่ภาวระต้องการ

2.1.9.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรรเรียงกระแส (Rectifier Circuits) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงที่โดยสำหรับวงจรรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์จะทำให้กระแสถูกกลับให้เป็นแรงดันไฟทางด้านบวกทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงภาพอินพุตและเอาต์พุตหลังผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

2.1.9.2 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรทอนระดับแรงดันหรือ บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) เป็นวงจรที่ใช้เพื่อปรับระดับแรงดันโดยลดแรงดันขาออกให้มีระดับคงที่ ซึ่งจะตรงข้ามกับสแต็ปอัพคอนเวอร์เตอร์ (Step-up boost converter) ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้เพื่อเพิ่มระดับแรงดันขาออกให้มีค่าสูงขึ้น วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพดีสามารถลดระดับแรงดันลงโดยที่มีพลังงานสูญเสียที่ตัววงจรน้อยมากเนื่องจากใช้หลักการการทำงานของสวิตช์ ทำให้ตัวบัคคอนเวอร์เตอร์มีประโยชน์มากกับการแปลงแรงดันไฟในระบบที่ต้องการพลังงานสูญเสียต่ำ

การทำงานของตัวบัคคอนเวอร์เตอร์อย่างง่าย (ภาพที่ 2.9) ทำงานโดยใช้ตัวอินดักเตอร์ (Inductor) หนึ่งตัวและสวิตช์สองตัว (ส่วนมากจะใช้ทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตและไดโอดอย่างละตัว) ในการควบคุมตัวอินดักเตอร์ โดยที่จะเชื่อมต่อระหว่างตัวอินดักเตอร์และแหล่งจ่ายไฟเพื่อเก็บพลังงานในตัวอินดักเตอร์ และจะจ่ายไฟจากตัวอินดักเตอร์ไปสู่โหลด



ภาพที่ 2.9 แสดงภาพบัคคอนเวอร์เตอร์อย่างง่าย [16]

ที่มา : TylzaeL. "Buck circuit diagram.svg."

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาได้มีการวิจัยในด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานจากหลายๆแหล่งพลังงาน โดยใน [17] และ [18] จะเป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยสร้างโครงสร้างโมเดลเพียโซอิเล็กทริกประเภท PZT ในลักษณะของคาน (Cantilever Beam) ซึ่งต้องทำการใส่มวลเพิ่มลงไปตรงปลายของคานเพื่อปรับจูนความถี่สั่นพ้องของคานเพียโซอิเล็กทริกให้ตรงกับความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ต้องการจะเก็บเกี่ยวเพื่อให้เกิดการสั่นพ้องและทำให้คานเพียโซอิเล็กทริกเกิดการโก่งงอและเกิดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ใน [19] ได้มีการวิจัยเพื่อศึกษาความถี่ในการสั่นจากแหล่งต่างๆ เพื่อมาใช้ออกแบบโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของคานที่มี Bandwidth กว้างและอยู่ในช่วงความถี่เหล่านี้เพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้จากแหล่งความถี่ต่างๆแหล่ง ใน [20] ที่ MIT Media Lab ได้วิจัยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินโดยใส่ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเข้าไปในรองเท้า ซึ่งในการทดลองได้ทดลอง 3 แบบโดยแบบแรกกับแบบที่สองเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภท PVDF และ PZT ตามลำดับ และแบบสุดท้ายเป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ Electromagnetic Generator ติดที่ส้นของรองเท้า ใน [21] ได้มีการศึกษาถึงการเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกที่มีชนิดแตกต่างกัน เพื่อศึกษาคุณลักษณะพลังงานที่ออกมาจากเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิด ใน [22] ได้มีการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพื้นเมื่อมีรถวิ่งผ่านโดยอาศัยหลักการ Linear Electromagnetic Generator ซึ่งเมื่อมีรถวิ่งผ่านจะทำให้โครงสร้างที่เป็นพื้นเกิดการยุบตัวและทำให้เกิดการตัดผ่านของสนามแม่เหล็กและขดลวด โดยผลการทดลองพบว่าหากมีรถวิ่งผ่านโครงสร้างที่ทำการทดลองมาวันละ 10,000 คันจะสามารถสร้างพลังงานได้ 200 MWh ต่อปี ใน [23] ได้มีการวิจัยการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยอาศัยหลักการ Electrostatic โดยผลที่ได้พบว่าได้ความต่างศักย์ประมาณ 23.5 V และกำลังไฟฟ้าที่ประมาณ 8 μ W



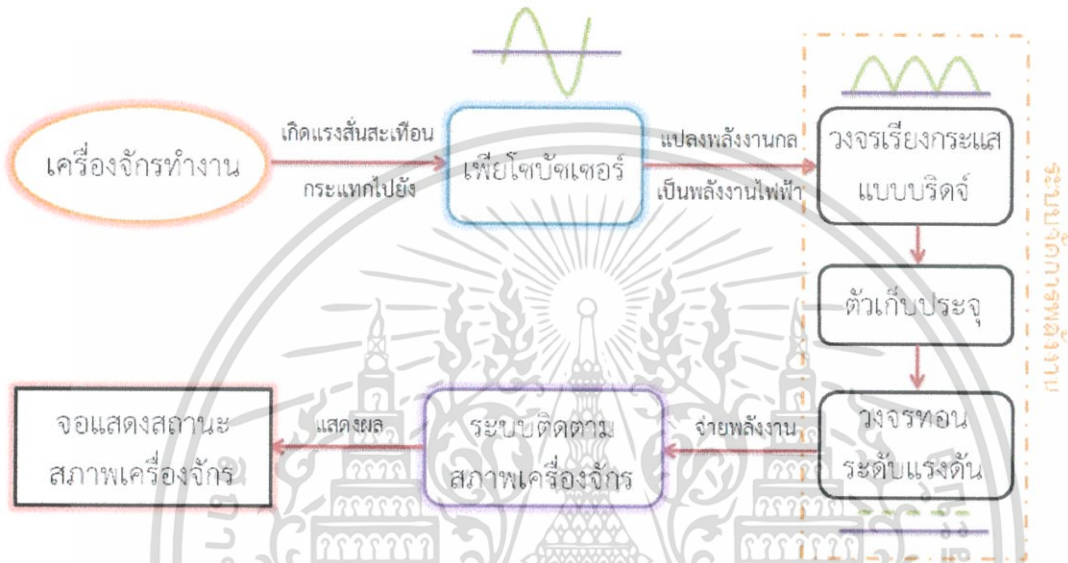
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการออกแบบอุปกรณ์และระบบเก็บพลังงาน

การออกแบบตัวต้นแบบอุปกรณ์เก็บพลังงานขั้นต้นนั้น ต้องเข้าใจหลักการทำงานในภาพรวมของทั้งระบบก่อนว่ามีหลักการทำงานอย่างไร แล้วจึงพิจารณาในส่วนย่อยอื่นๆ

หลักการทำงานในภาพรวมของระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร สามารถแสดงดังแผนผังใน ภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังภาพรวมของระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร

จาก ภาพที่ 3.1 ระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักรประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ ดังนี้

- เครื่องจักร
- โครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซอิเล็กทริก
- ระบบเก็บพลังงาน
- ระบบติดตามสภาพเครื่องจักร

3.1 การเลือกเครื่องจักร

เครื่องจักรที่ใช้ในการวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องปั๊มลมขนาดเล็ก รุ่น OL-1204 ดังแสดงใน ภาพที่ 3.2 ใช้ไฟบ้านในการจ่ายกระแส เป็นเครื่องจักรที่หาได้ทั่วไปตามท้องตลาด ขนาดกะทัดรัดเคลื่อนย้ายสะดวก และราคาเหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์เก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 เครื่องปั๊มลมขนาดเล็ก รุ่น OL-1204

จาก ภาพที่ 3.2 สังเกตว่าฐานของเครื่องปั๊มลมประกอบด้วยขา 3 ขา มีการยึดฐานยางไว้ด้วยสกรู (Screw) สามารถสวมเข้าหรือถอดออกได้ จึงทำการเปลี่ยนจากฐานยางเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานในการทดสอบ

3.1.1 สิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานเครื่องปั๊มลม

- แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
- กระแสไฟฟ้า 1.4 แอมแปร์

3.1.2 คุณสมบัติของเครื่องปั๊มลม

- น้ำหนัก (ไม่รวมสายท่อลมหากต่อเพิ่ม) 8 กิโลกรัม
- ขนาดความจุถึง 4 ลิตร
- แรงดันลม 115 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 8 บาร์
- ปริมาณลม 3.8 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่แรงดัน 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
2.4 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่แรงดัน 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- ขนาดท่อ $\frac{1}{4}$ นิ้ว มาตรฐานเกลียวท่อระบบอเมริกัน (National Pipe Thread Taper: NPT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

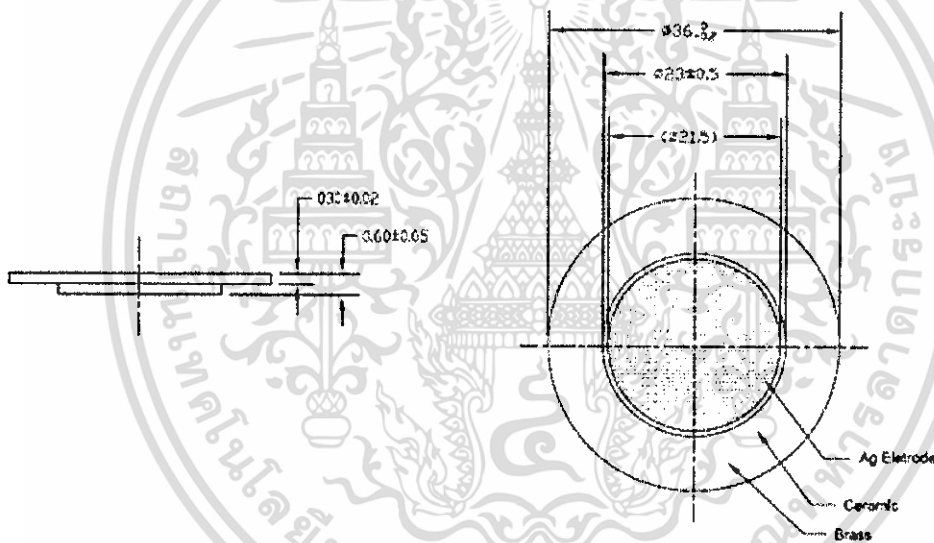
3.2 โครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์

โครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์แบ่งได้เป็น 2 ส่วนย่อย ดังนี้

- วัสดุเพียโซอิเล็กทริก
- โครงสร้างรับแรง

3.2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติสามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในการทดสอบนี้เลือกใช้เพียโซบัสเซอร์แบบกลมรุ่น MCFT-36T-2.6A1-139 จากบริษัท Multicomp ดังแสดงใน ภาพที่ 3.3 และคุณสมบัติต่างๆของเพียโซบัสเซอร์ รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139 ถูกแสดงในตารางที่ 3.1 ราคาคุ้มค่า เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพ รับแรงกระแทกได้ดี มีความทนทานสูง และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป



ภาพที่ 3.3 เพียโซบัสเซอร์แบบกลม รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139

ที่มา : Multicomp MCFT-36T-2.6A1-139 Datasheet

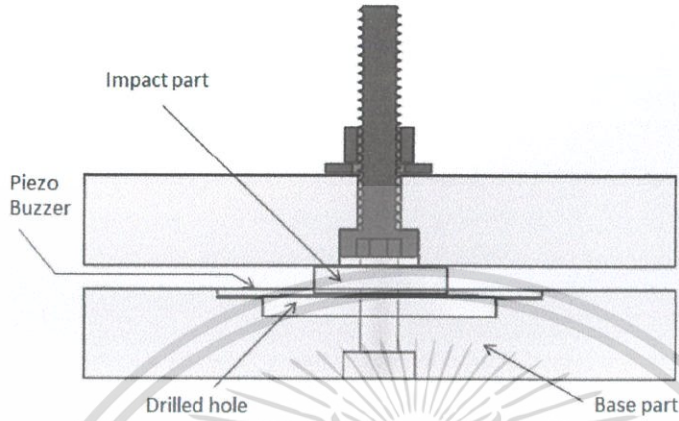
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเพียโซบัสเซอร์รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139

Resonant Frequency	2.6 ± 0.5Hz
Resonant Resistance	350 Ω max.
Capacitance	25000 pF ± 30% at 100Hz
Input Voltage	30 Vp-p max
Operating Temperature	-20 ~ +60°C
Storage Temperature	-20 ~ +70°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 โครงสร้างรับแรง

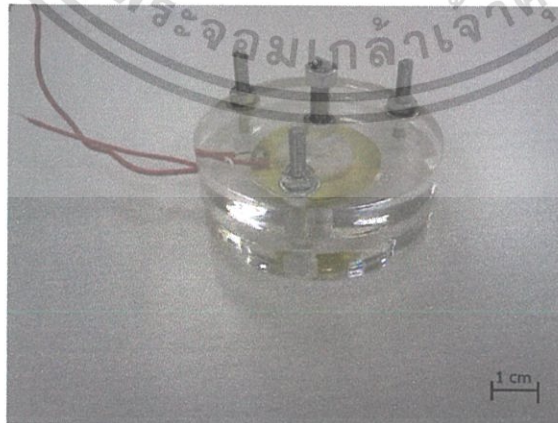
โครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์เลือกใช้พลาสติกอะคริลิกที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด มีความคงทนในระดับหนึ่ง และสามารถทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้ง่าย นำมาทำตามแบบร่างที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงใน ภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แบบร่างโครงสร้างรับแรง

จาก ภาพที่ 3.4 เห็นได้ว่าโครงสร้างรับแรงแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนส่งแรง (Impact part) และส่วนฐาน (Base part) โดยส่วนส่งแรงจะทำหน้าที่ส่งแรงกระแทกที่เกิดจากแรงสั่นเมื่อเครื่องจักรทำงานไปยังส่วนฐาน และส่วนฐานทำหน้าที่รองรับแรงกระแทกที่ส่วนส่งแรงได้ส่งมา อีกทั้งในส่วนฐานได้ทำการเจาะร่องให้พอดีกับขนาดของเพียโซบัสเซอร์เพื่อให้ตัวเพียโซบัสเซอร์ไม่เคลื่อนที่ และเจาะหลุม (Drilled hole) ใต้ร่องวางเพียโซบัสเซอร์เพื่อให้เพียโซบัสเซอร์เกิดการโค้งงอได้มากขึ้นและได้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นกว่าไม่มีการเจาะหลุม เพียโซบัสเซอร์ที่อยู่ในร่องจะไม่ยึดติดด้วยกาวเพื่อให้เพียโซบัสเซอร์สามารถโค้งงอได้ในทิศทางเดียวกัน (Uniform)

เมื่อนำเพียโซบัสเซอร์มาประกอบเข้ากับโครงสร้างรับแรงแล้วได้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบ ดังแสดงใน ภาพที่ 3.5 ซึ่งตัวต้นแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.6 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 2.3 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์ หรือ อุปกรณ์ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

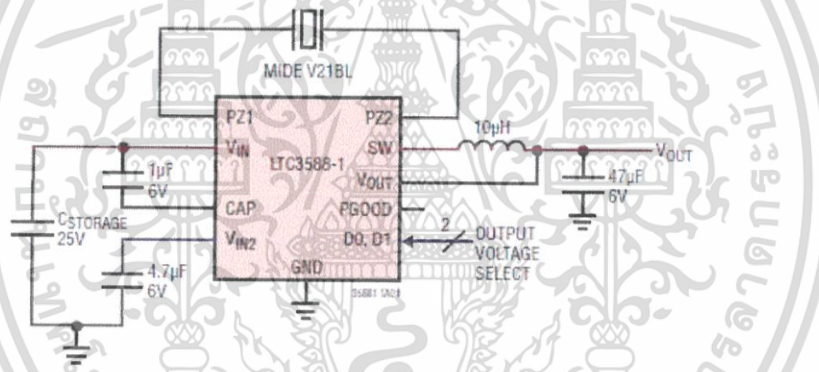
3.3 ระบบเก็บพลังงาน

ระบบเก็บพลังงานนี้เป็นส่วนถัดมาจากตัวอุปกรณ์ต้นแบบโดยจะทำการต่อเข้ากับตัวเพียโซโซลาร์เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ได้ เป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถสะสมและนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ในส่วนของระบบติดตามสภาพเครื่องจักรได้ โดยในการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- วงจรจัดการพลังงาน
- ตัวเก็บประจุ

3.3.1 วงจรจัดการพลังงาน

วงจรจัดการพลังงานที่ใช้ทดสอบนี้ ใช้วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 ดังแสดงใน ภาพที่ 3.6 ในวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 มีวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และวงจรทอนระดับแรงดันอยู่ภายใน ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าในการทำงานต่ำ แรงดันไฟฟ้าที่รับเข้าด้านอินพุตมีค่าครอบคลุมสามารถรองรับแรงดันที่เพียโซโซลาร์สามารถจ่ายมาได้



ภาพที่ 3.6 วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1

ที่มา : LTC3588-1 Datasheet

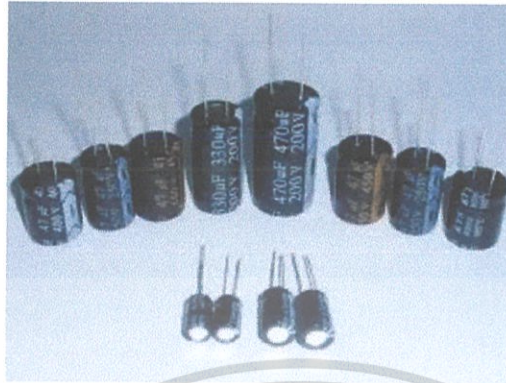
จาก ภาพที่ 3.6 เห็นได้ว่าวงจรจัดการพลังงานนี้ สามารถต่อตัวเก็บประจุ (C storage) เพื่อใช้เก็บแรงดันได้ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกแรงดันเอาท์พุทได้ด้วย โดยแรงดันที่สามารถเลือกได้มีค่า 1.8, 2.5, 3.3, และ 3.6 โวลต์ ทำให้มีความหลากหลายในการเลือกใช้เพื่อนำไปใช้งาน เมื่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซโซลาร์ผ่านวงจรจัดการพลังงานแล้วจะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้มีแรงดันคงที่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการไฟฟ้ากระแสตรงได้

3.3.2 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุใช้สำหรับสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปจ่ายให้กับระบบติดตามสภาพเครื่องจักร ในกาทดลองเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ดังแสดงใน ภาพที่ 3.7 ซึ่งมีความจุสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบกับขนาด ทำให้ใช้พื้นที่น้อย ราคาไม่แพง และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป โดยทดลองใช้ตัวเก็บประจุหลายๆค่า ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทถัดไป



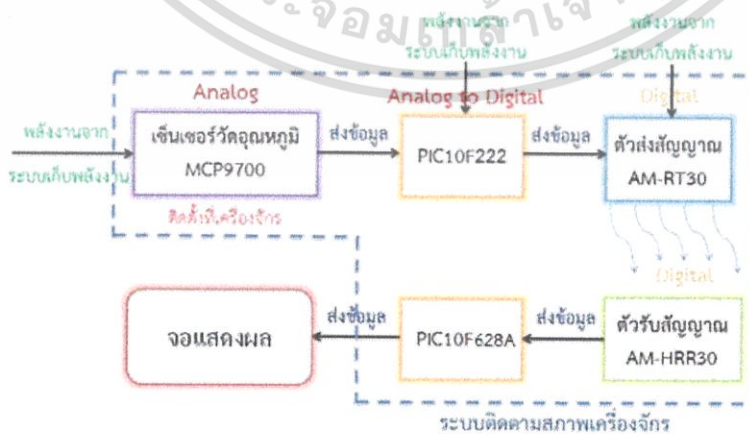
ภาพที่ 3.7 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ขนาดความจุต่างๆ

3.4 ระบบติดตามสภาพเครื่องจักร

ระบบติดตามสภาพเครื่องจักรมีไว้ทดสอบว่าพลังงานที่ได้จากเพียโซบัสเซอร์หลังจากผ่านระบบเก็บพลังงานแล้วสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้จริง ในการทดสอบนี้ระบบติดตามสภาพเครื่องจักรจะใช้วิธีการวัดอุณหภูมิ โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนี้

- เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700
- ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC10F222
- ตัวส่งสัญญาณ AM-RT4
- ตัวรับสัญญาณ AM-HRR30

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามสภาพเครื่องจักรโดยรวมได้ดังแสดงในแผนผัง ภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แผนผังภาพรวมของระบบติดตามสภาพเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ภาพที่ 3.8 อธิบายได้ว่าหลังจากพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซบัสเซอร์ได้ผ่านระบบจัดการพลังงานแล้ว ระบบจัดการพลังงานจะทำการจ่ายพลังงานให้แก่ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700, ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC10F222 และตัวส่งสัญญาณ AM-RT4 โดยมีขั้นตอนทำงานในส่วนแรก คือ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจะทำการวัดอุณหภูมิของเครื่องจักรและส่งข้อมูลเป็นแบบอนาล็อก (Analog) ไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแปลงข้อมูลที่ได้ออกไปเป็นแบบดิจิทัล (Digital) จากนั้นจึงส่งข้อมูลไปยังตัวส่งสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณไร้สายแบบดิจิทัลไปยังอีกส่วนหนึ่ง

ในส่วนถัดมาประกอบไปด้วย ตัวรับสัญญาณ AM-HRR30 และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC10F628A ซึ่งในส่วนนี้จะใช้ไฟเลี้ยงจากส่วนของจอแสดงผล (ในวิทยานิพนธ์นี้คือคอมพิวเตอร์) ในการทำงาน หลังจากตัวรับสัญญาณได้รับสัญญาณไร้สายแบบดิจิทัลที่ส่งมาจากตัวส่งสัญญาณแล้ว ก็จะมีการส่งข้อมูลที่ได้ออกไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่สองเพื่อเปลี่ยนทำการคำนวณค่าอุณหภูมิจากข้อมูลที่ถูกส่งมาสุดท้ายจึงส่งข้อมูลค่าอุณหภูมิที่ได้ออกไปยังจอแสดงผลเพื่อให้แสดงผลอุณหภูมิที่วัดได้เป็นตัวเลขให้ผู้อ่านค่าเข้าใจได้ทันที ทั้งนี้ในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้โปรแกรม MPLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภท IDE (Integrated Development Environment) เพื่อเขียนโปรแกรมลงไมโครคอนโทรลเลอร์



บทที่ 4

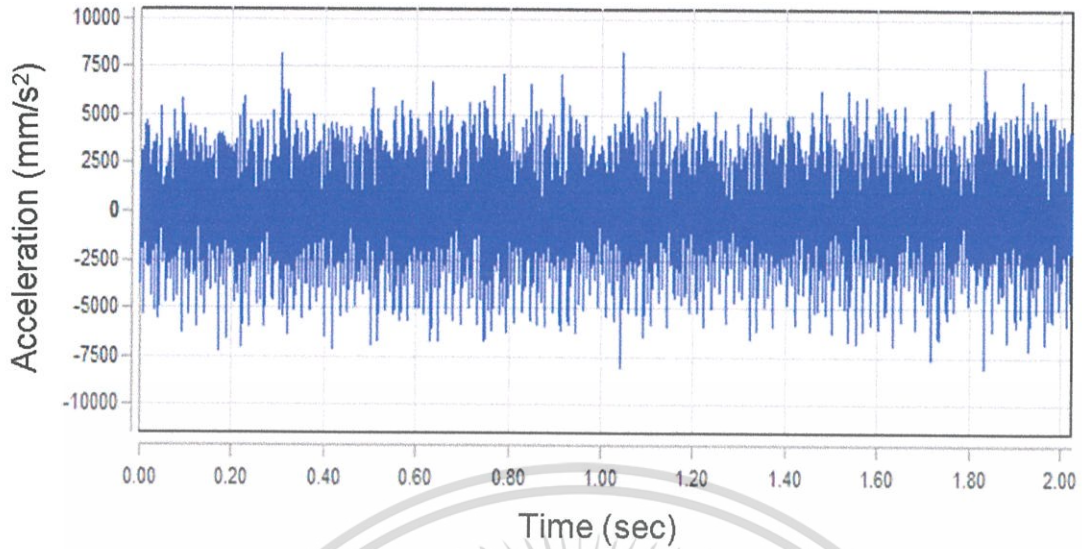
ผลการวิจัย

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

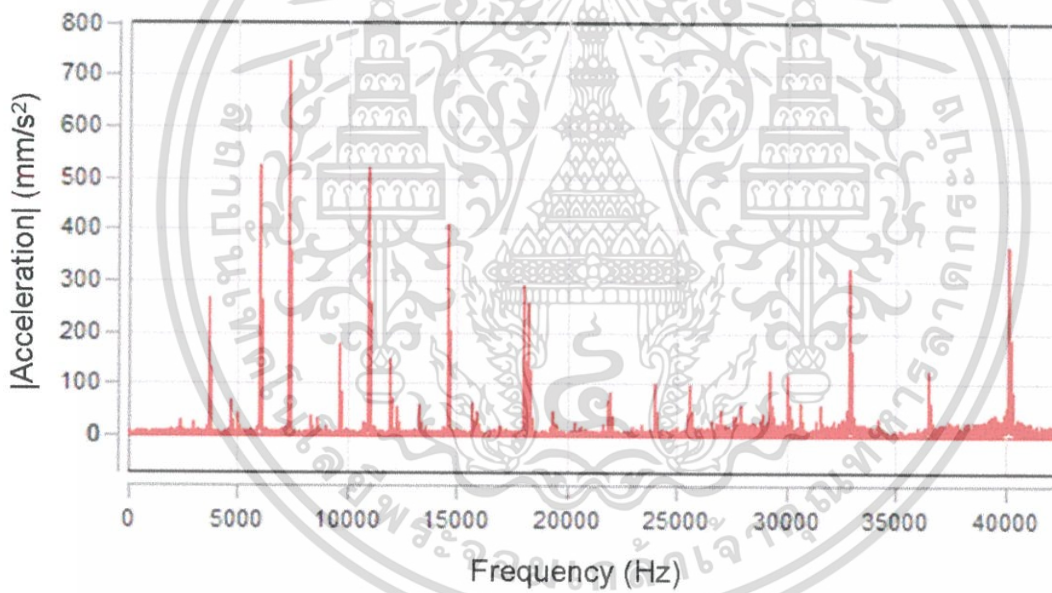
4.1 การทดสอบวัดความถี่สั่นพ้องเครื่องจักร

โดยปกติแล้วอุปกรณ์เก็บพลังงานที่เก็บพลังงานจากเครื่องจักรนั้นจะอาศัยความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรให้ตรงกับอุปกรณ์เก็บพลังงานจึงจะสามารถเก็บพลังงานได้ ปัญหาที่ยากจึงตามมา คือ ต้องทำการปรับความถี่ทุกครั้งหากเปลี่ยนเครื่องจักรตัวใหม่ เพราะเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีความถี่ในการสั่นไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร โดยตัวอุปกรณ์สามารถผลิตพลังงานได้ด้วยตนเอง จากการแปลงแรงสั่นสะเทือนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเพียโซบัสเซอร์ซึ่งไม่ต้องอาศัยความถี่สั่นพ้อง ในการทดสอบจึงเริ่มด้วยการทดสอบวัดค่าความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรที่จะใช้ร่วมกับตัวอุปกรณ์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรกับตัวเพียโซบัสเซอร์อุปกรณ์นั้นต่างหรือเหมือนกันอย่างไร โดยผลการทดสอบวัดค่าความถี่เครื่องบีมลขนาดเล็กด้วยเครื่องวัดความเร่งจากบริษัท El-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 ซึ่งมีค่ามากกว่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซบัสเซอร์ที่มีค่าความถี่สั่นพ้องอยู่ที่ 2.6 ± 0.5 กิโลเฮิร์ตซ์จากตารางข้อมูล (Data Sheet) ของเพียโซบัสเซอร์ที่นำมาใช้แต่ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงกระแทกก็ยังสามารถทำงานได้โดยไม่คำนึงถึงความถี่สั่นพ้องจึงไม่เป็นอุปสรรคในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเครื่องจักร ไม่ว่าจะเปลี่ยนไปใช้กับเครื่องจักรตัวอื่นๆก็ตาม



ภาพที่ 4.1 ข้อมูลความเร่งของเครื่องปั๊มลมเมื่อเทียบกับเวลา



ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์โดยวิธีฟาสต์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fast Fourier Transform) ของแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากเครื่องปั๊มลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบโครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์

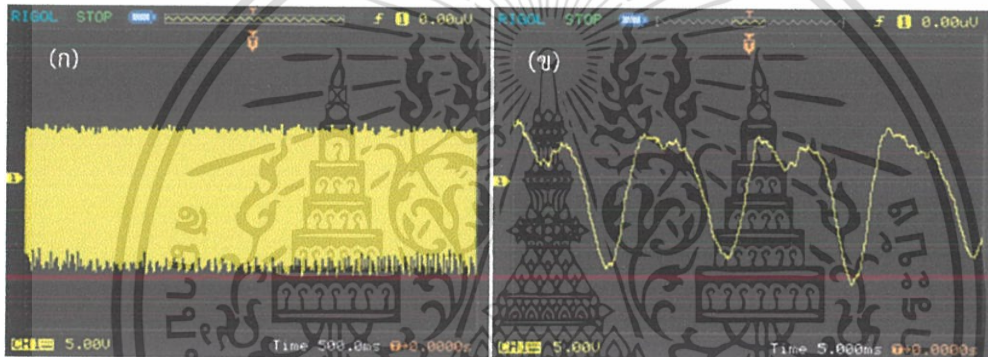
ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาผลตอบสนองจากเพียโซบัสเซอร์เมื่อเครื่องจักรทำงานซึ่งได้แสดงไว้ใน ภาพที่ 4.3 โดยในการทดลองได้ทดลองต่อตัวต้านทานขนาดต่างๆขนานกับเพียโซบัสเซอร์ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.4 แล้วใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) วัดค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสอง จากนั้น นำค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสองที่วัดได้ไปหากระแสเฉลี่ยของรอกกำลังสองโดยใช้สูตร

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

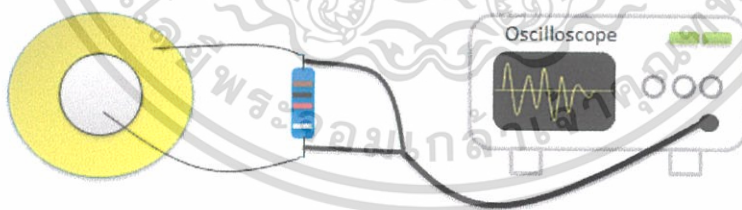
จากนั้นหาค่ากำลังเฉลี่ยโดยใช้สูตร

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

เพื่อนำไปพล็อต (Plot) กราฟระหว่างค่าความต้านทานกับกำลังเพื่อหาค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด



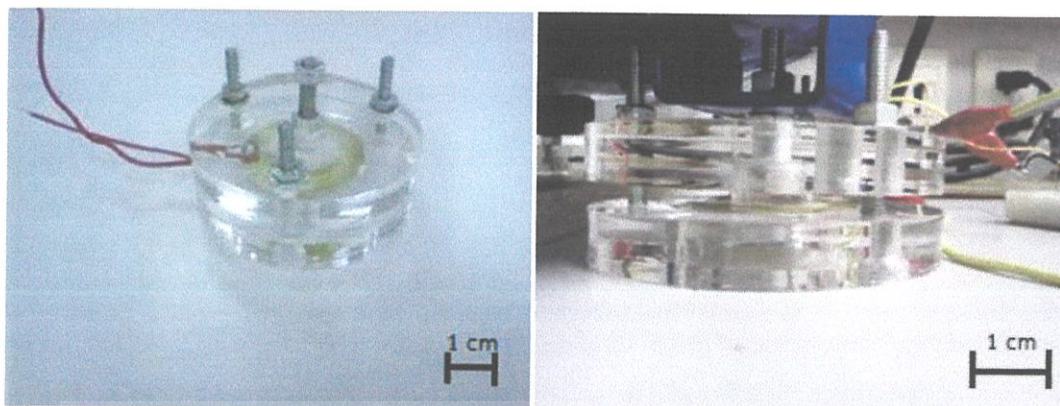
ภาพที่ 4.3 (ก) ภาพแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซบัสเซอร์ (ข) ภาพขยายแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซบัสเซอร์



ภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงการต่อตัวต้านทานขนานกับเพียโซบัสเซอร์

เนื่องจากเพียโซบัสเซอร์ที่นำมาใช้แต่ละตัวมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลี่ยของค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสองของเพียโซบัสเซอร์ทั้ง 3 ตัวเมื่อต่อ 1 ชั้น ดังแสดงใน ภาพที่ 4.5 ทีละตัว เมื่อเทียบกับตัวเพียโซบัสเซอร์ 1 ตัวที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดได้ผลออกมาแสดงใน ตารางที่ 4.1 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสองกับค่าความต้านทาน, ค่ากระแสเฉลี่ยของรอกกำลังสองกับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ดังแสดงใน ภาพที่ 4.6 - 4.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

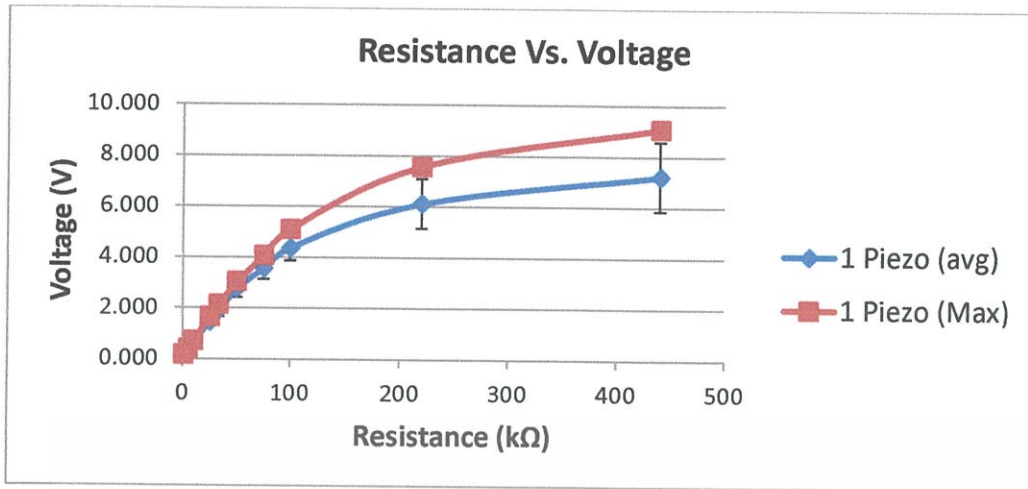


ภาพที่ 4.5 ภาพอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบเพียโซเซเซอร์ 1 ตัว

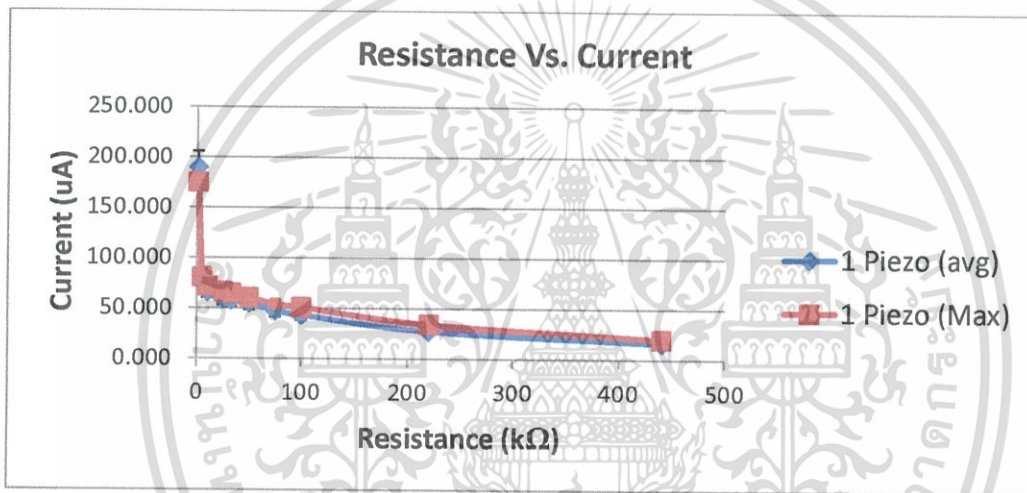
ตารางที่ 4.1 ผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกกำลังสอง กระแสเฉลี่ยของรอกกำลังสองและกำลังเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าสูงสุด

R(k Ω)	1 Piezo (Average)			1 Piezo (Max)		
	V _{rms} (V)	I _{rms} (uA)	P _{avg} (uW)	V _{rms} (V)	I _{rms} (uA)	P _{avg} (uW)
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

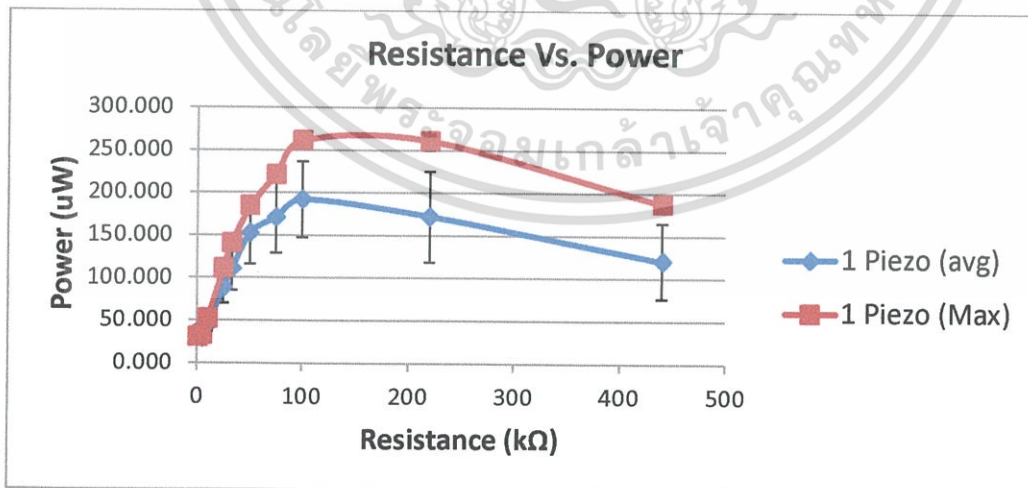
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน



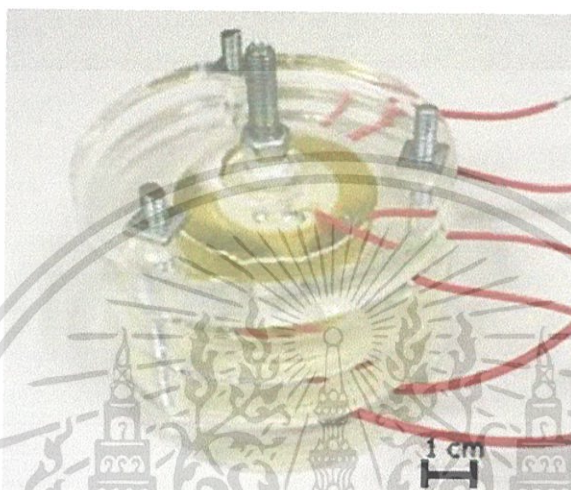
ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ภาพที่ 4.6 - 4.8 สังเกตได้ว่าค่ากำลังที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของเพียโซบัสเซอร์แต่ละตัวมีค่าต่ำกว่าการใช้เพียโซบัสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดตัวเดียว ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับการต่อขนาน 3 ชั้น หรือ ต่อแบบคอนโด (Condo) ดังภาพที่ 4.9 โดยใช้เพียโซบัสเซอร์ทั้ง 3 ตัวที่นำมาหาค่าเฉลี่ยในตอนแรก ซึ่งผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากลำดับสอง, กระแสเฉลี่ยของรากลำดับสอง และกำลังเฉลี่ยได้แสดงใน ตารางที่ 4.2 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากลำดับสองกับความต้านทาน, ค่ากระแสเฉลี่ยของรากลำดับสองกับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ได้แสดงในภาพที่ 4.10 - 4.12 ตามลำดับ

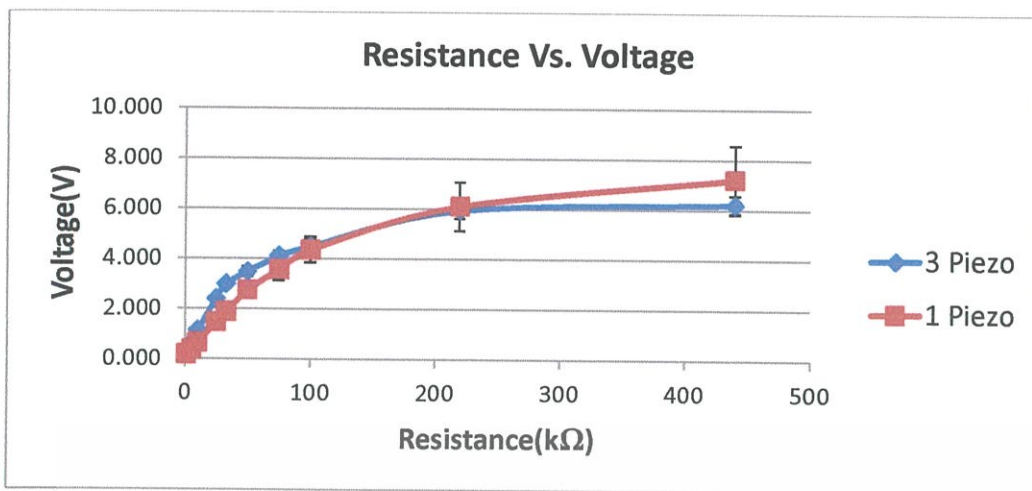


ภาพที่ 4.9 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบต่อแบบคอนโด

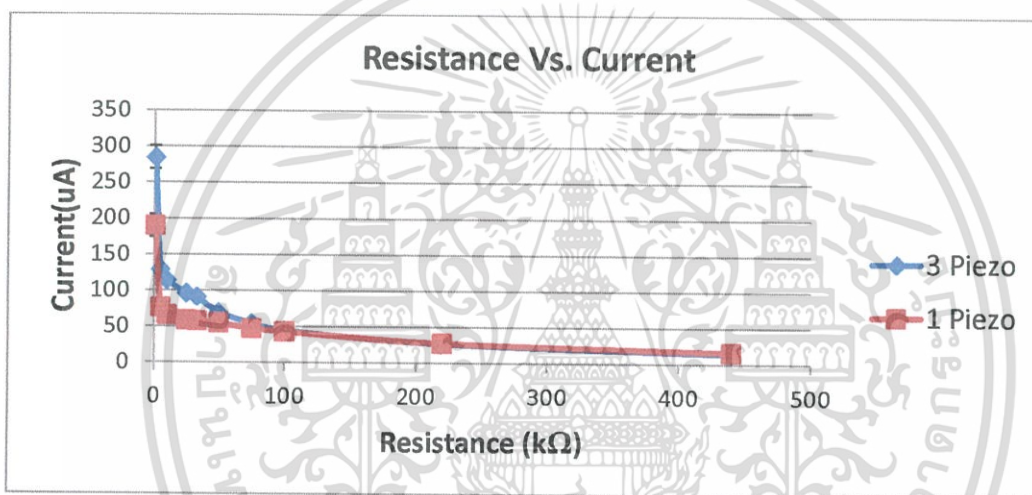
ตารางที่ 4.2 แสดงผลค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรากลำดับสอง กระแสเฉลี่ยของรากลำดับสองและกำลังเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน

R(k Ω)	1 Piezo (Avg)			3 Piezo (Condo)		
	V _{rms} (V)	I _{rms} (uA)	P _{avg} (uW)	V _{rms} (V)	I _{rms} (uA)	P _{avg} (uW)
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

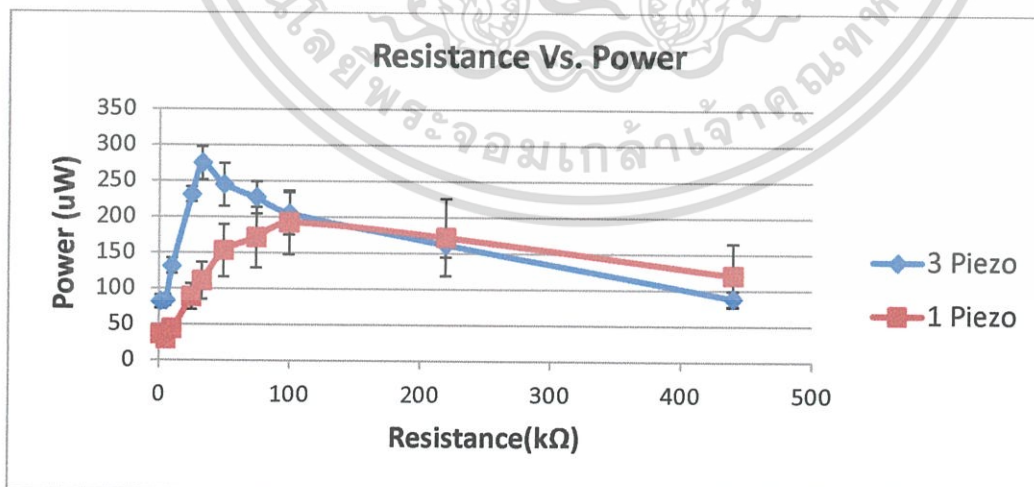
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน



ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน



ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในภาพที่ 4.10 – 4.12 สามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะโหลดที่มีค่าความต้านทานสูงจะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซบัสเซอร์ 3 ตัวมีค่าน้อยกว่าเพียโซบัสเซอร์ 1 ตัว ซึ่งคาดว่าเกิดจากเหตุผลที่เพียโซบัสเซอร์แต่ละตัวที่นำมาต่อขนานกันนั้นให้ความต่างศักย์ที่แตกต่างกันและเมื่อนำมาต่อขนานจึงได้ผลออกมาเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นจากเพียโซบัสเซอร์ที่ได้แรงดันต่ำที่สุด แต่ถึงกระนั้น เพียโซ 3 ตัวเมื่อนำมาต่อขนานกันแล้วสามารถทำให้กำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้มากขึ้นในสภาวะที่โหลดต้องการกระแสมาก (มากกว่าประมาณ 45 μA)

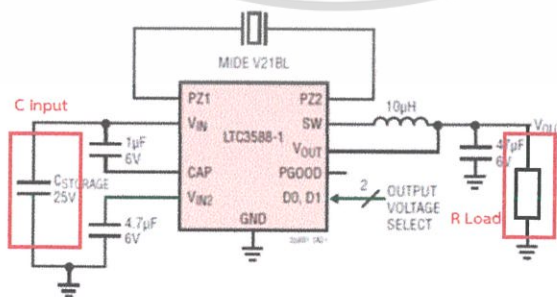
4.3 การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงาน

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



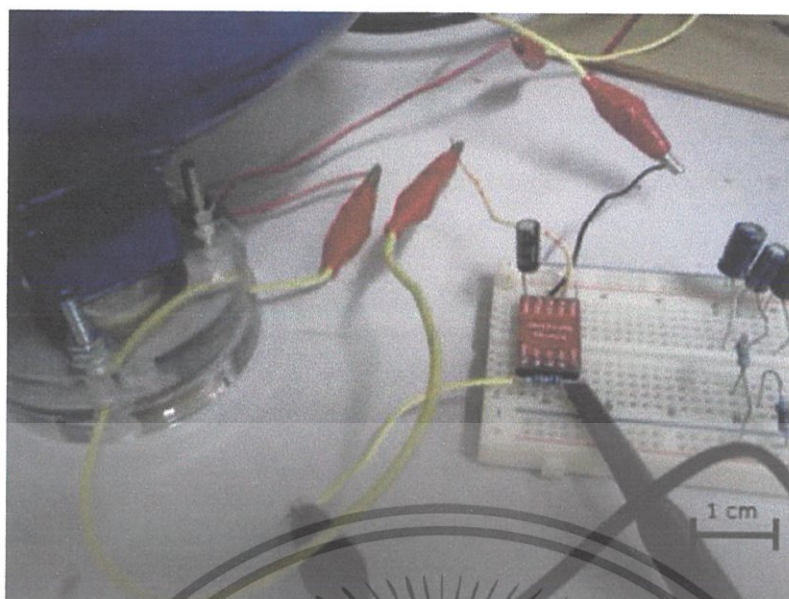
ภาพที่ 4.13 (ก) ช่วงเวลาที่ใช้ในการชาร์จ (ข) ช่วงเวลาที่เอาท์พุทสามารถทำงานได้

ในการทดสอบ จะทดสอบโดยทดลองเปลี่ยนค่าขนาดตัวเก็บประจุด้านอินพุต (Capacitor Input) และค่าภาระความต้านทานด้านเอาท์พุท (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

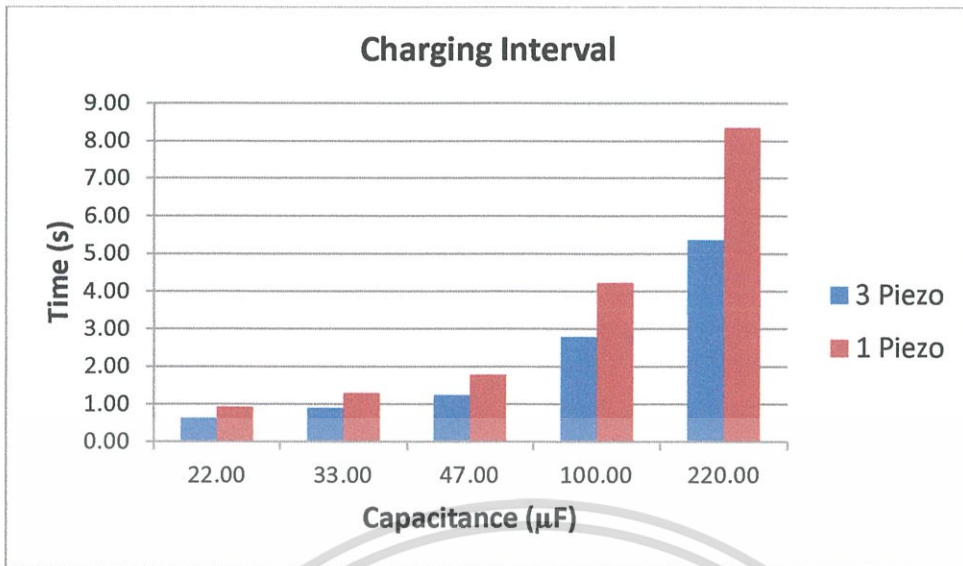


ภาพที่ 4.15 รูปขณะทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงาน

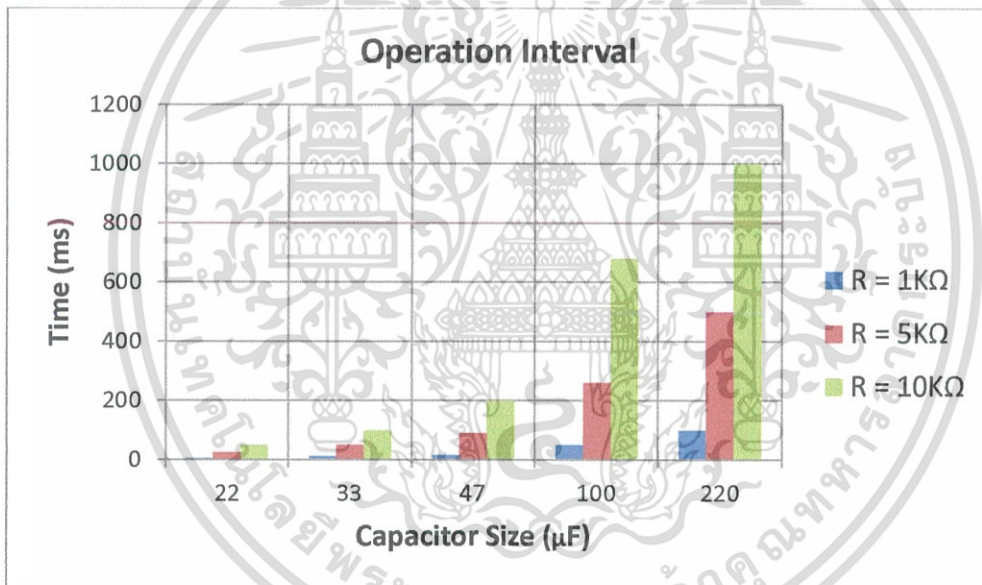
ตารางที่ 4.3 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานกับเวลา

ค่าที่เปลี่ยน		Operation interval (ms)	Charging Interval	
R (k Ω)	C (μ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงช่วงเวลาที่ใช้ในการชาร์จ



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงช่วงเวลาในการทำงาน

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.16 - 4.17 สามารถบอกได้ว่า การเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุด้านอินพุต ความต้านทานด้านเอาต์พุต และจำนวนเพียโซโซเซออร์ที่ใช้ มีผลกับระยะเวลาในการชาร์จและระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงาน โดยในเรื่องของเวลาในการชาร์จ การเพิ่มค่าตัวเก็บประจุด้านอินพุตจะมีผลให้เวลาในการชาร์จนานมากขึ้นส่วนการเพิ่มจำนวนเพียโซโซเซออร์ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นทำให้เวลาที่ใช้ในการชาร์จลดลง ในขณะที่การเพิ่มหรือลดค่าความต้านทานเอาต์พุตแทบจะไม่มีผลเลยกับเวลาที่ใช้ในการชาร์จ ในเรื่องของเวลาที่อุปกรณ์ทำงาน การเพิ่มค่าตัวเก็บประจุจะส่งผลให้เวลาในการทำงานเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มค่าความต้านทานเอาต์พุตซึ่งส่งผลให้กระแสที่ภาระต้องการลดลงจะทำให้เวลาในการทำงานเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในขณะที่จำนวนเพียโซโซเซออร์ที่ใช้แทบจะไม่มีผลกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาการทำงานนี้เลย จากผลที่ออกมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าการนำไปใช้งานสามารถเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับกระแสที่ภาระต้องการเพื่อให้ได้ช่วงเวลาชาร์จและเวลาการทำงานตามที่ต้องการ

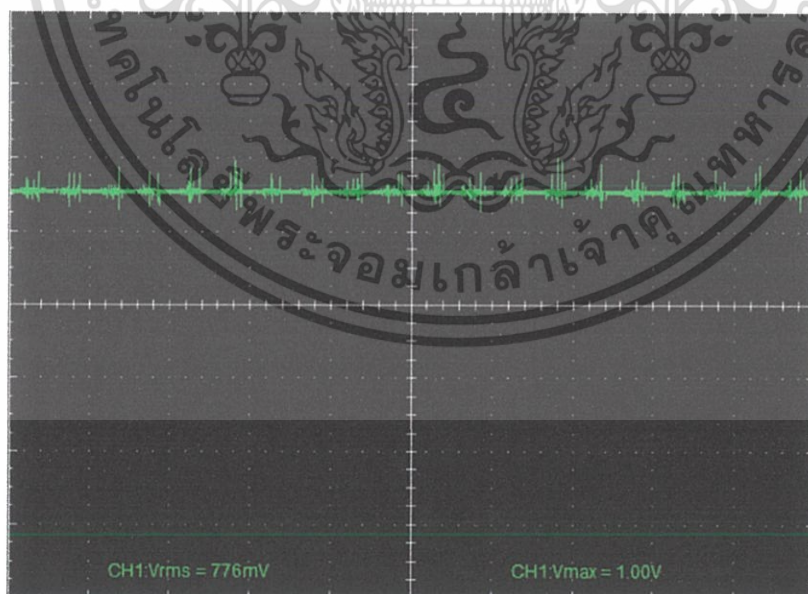
4.4 การทดสอบการทำงานของระบบติดตามสภาพเครื่องจักร

หลังจากทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบเมื่อต่อเข้ากับระบบจัดการพลังงานแล้ว ในขั้นตอนต่อไปก็คือ การทดสอบระบบติดตามสภาพเครื่องจักรว่าทำงานอย่างไร เพื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับระบบติดตามสภาพ โดยจะเริ่มทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และตัวรับ-ส่งสัญญาณตามลำดับ

4.4.1 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700

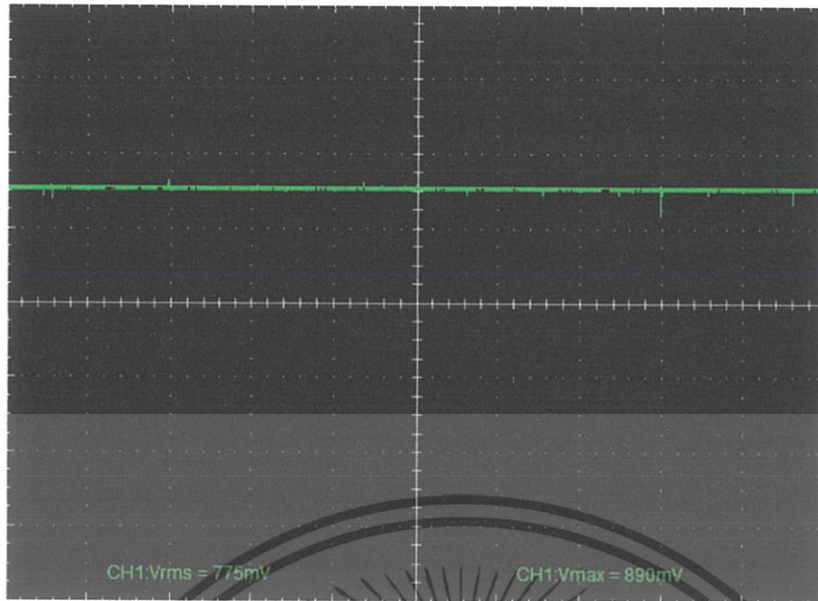
ในการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เริ่มจากการวัดสัญญาณที่เอาท์พุทของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยออสซิลโลสโคปขณะที่เครื่องปั๊มลมขนาดเล็กทำงาน เพื่อดูสัญญาณที่ออกจากตัวเซ็นเซอร์ พบว่ามีสัญญาณรบกวนมาก เป็นผลมาจากมอเตอร์ (Motor) ของเครื่องปั๊มลมทำงาน จึงทำการเพิ่มฟิลเตอร์ (Filter) หรือตัวกรองสัญญาณเข้าไปเพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยหลังจากเพิ่มตัวกรองสัญญาณเป็นตัวเก็บประจุขนาด $0.1 \mu\text{F}$ จะได้สัญญาณที่ออกมาจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 ซึ่งยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่ เมื่อทำการศึกษาดูในตาต้าชิทของตัวอุปกรณ์จึงทดลองใช้ตัวกรองสัญญาณที่ได้รับการแนะนำ คือ ตัวเก็บประจุขนาด $1 \mu\text{F}$ และตัวต้านทานขนาด 200Ω 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)

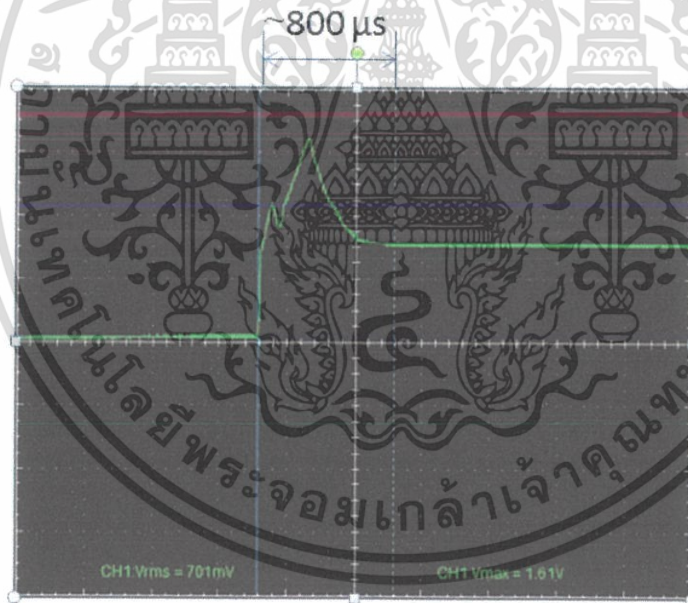


ภาพที่ 4.18 รูปสัญญาณเอาท์พุทเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณตัวเก็บประจุขนาด $0.1 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



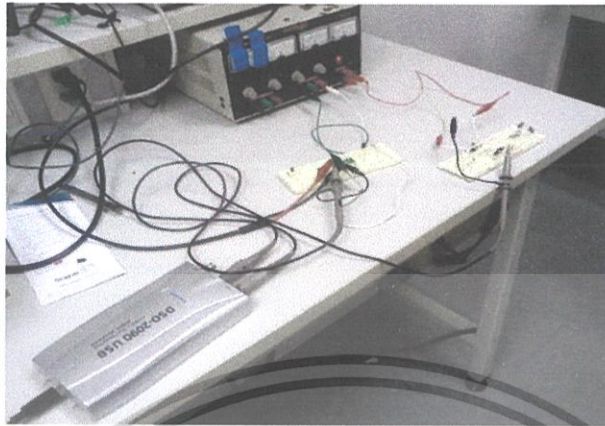
ภาพที่ 4.20 รูปสัญญาณเมื่อจ่ายพลังงานแบบสแต็ปให้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ติดตัวกรองสัญญาณ

4.4.2 การทดสอบการทำงานของตัวรับและตัวส่งสัญญาณ

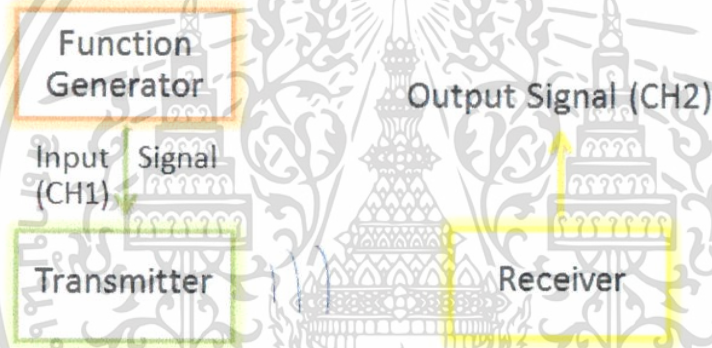
ในการทดสอบการทำงานของตัวรับสัญญาณ AM-RT4 และตัวส่งสัญญาณ AM-HRR30 ได้ทำการทดลองจ่ายพลังงานจากพาวเวอร์ซัพพลาย (Power Supply) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.21 และทำการใช้เครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator) ส่งสัญญาณผ่านตัวส่งสัญญาณ เพื่อให้ส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ หลังจากต่อออสซิลโลสโคป โดยช่องสัญญาณที่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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

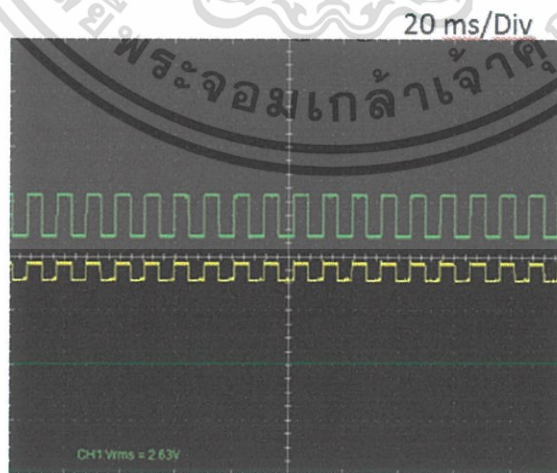
อินพุตของตัวส่งสัญญาณ และช่องสัญญาณที่ 2 (Channel 2) ต่อเข้ากับเอาต์พุตของตัวส่งสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.22 จะได้สัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.21 รูปขณะทำการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณ



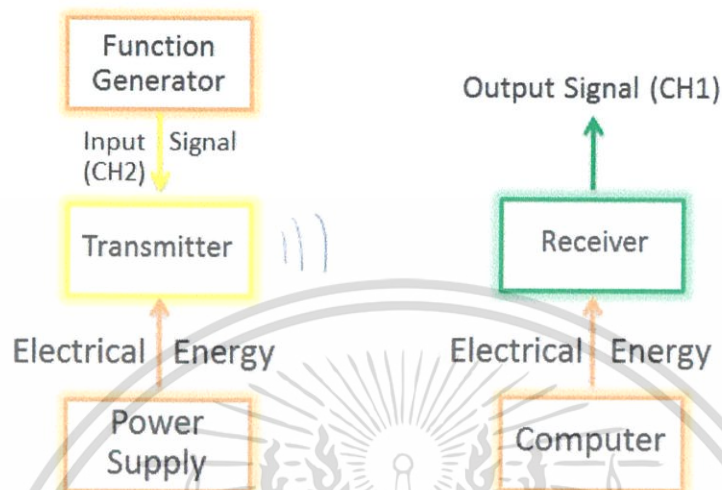
ภาพที่ 4.22 แผนผังการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณขั้นแรก



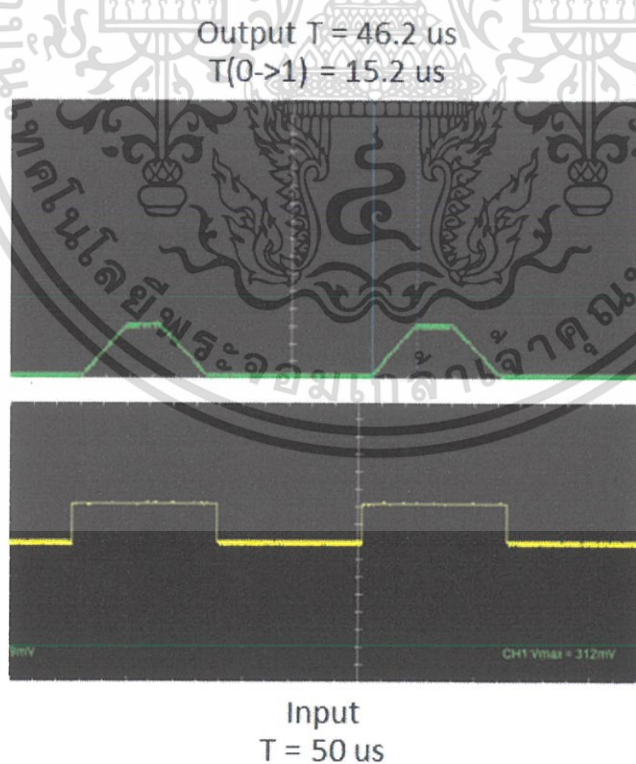
ภาพที่ 4.23 รูปสัญญาณที่ได้จากตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อทำการทดสอบการทำงานขั้นแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนถัดมาจะทดสอบโดยการทดลองต่อตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณแยกกัน โดยตัวส่งสัญญาณจะใช้แหล่งพลังงานเป็นพาวเวอร์ซัพพลายและตัวรับใช้แหล่งพลังงานจากคอมพิวเตอร์ที่จะใช้เป็น ส่วนแสดงผล ดังแสดงใน ภาพที่ 4.24 ได้สัญญาณที่ออกมา ดังแสดงใน ภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.24 แผนผังการทดสอบการทำงานของตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อตัวรับสัญญาณใช้พลังงานจากส่วนแสดงผล

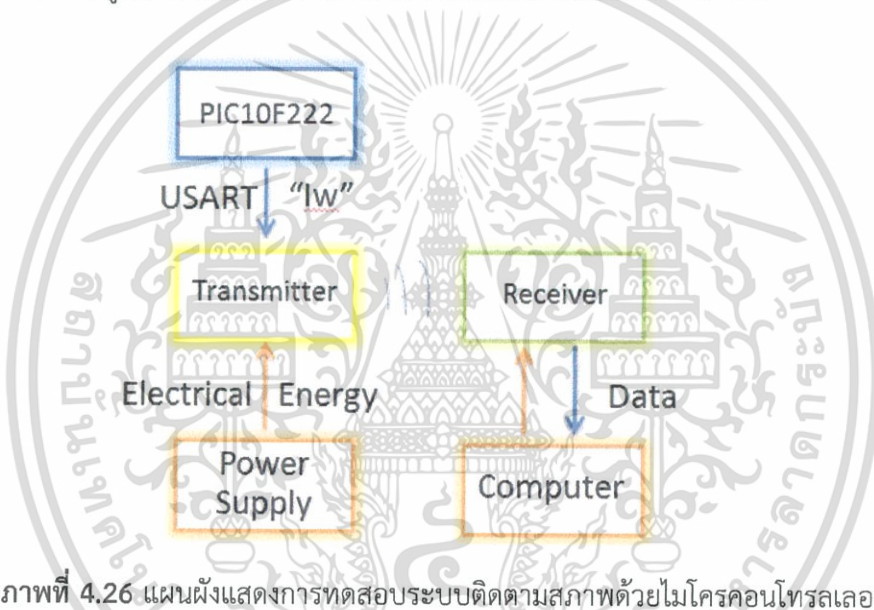


ภาพที่ 4.25 รูปสัญญาณจากตัวรับ-ส่งสัญญาณเมื่อตัวรับสัญญาณใช้พลังงานจากส่วนแสดงผล

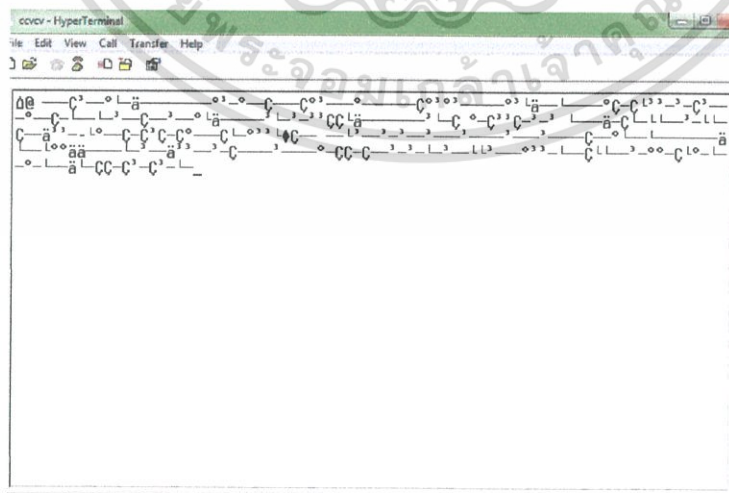
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



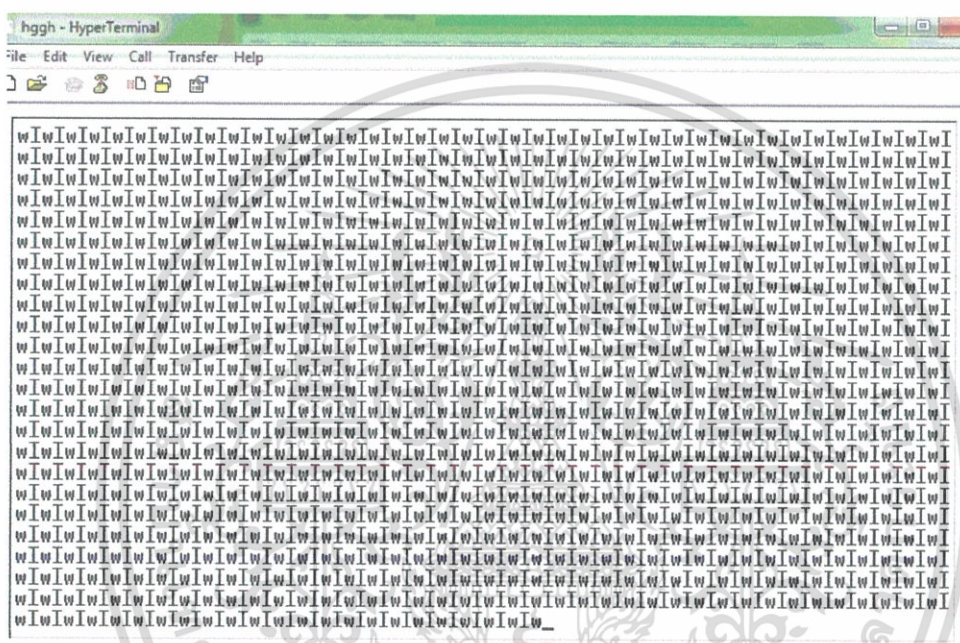
ภาพที่ 4.26 แผนผังแสดงการทดสอบระบบติดตามสภาพด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 4.27 รูปแสดงสัญญาณที่ได้รับบนหน้าจอแสดงผลเมื่อใช้ 9,600 BAUDRATE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.27 จะเห็นว่าการส่งสัญญาณโดยใช้ค่า BAUDRATE 9,600 นั้นทำให้การส่งสัญญาณผิดเพี้ยนไปอย่างมากเนื่องจากสัญญาณที่ส่งออกมีลักษณะเป็นสแควร์ที่มีคาบประมาณ 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



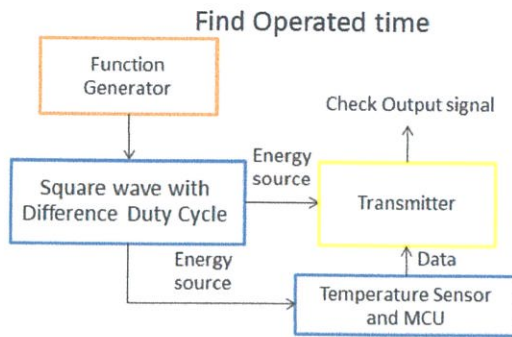
ภาพที่ 4.28 รูปแสดงสัญญาณที่ได้รับบนหน้าจอแสดงผลเมื่อใช้ 2,400 BAUDRATE

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

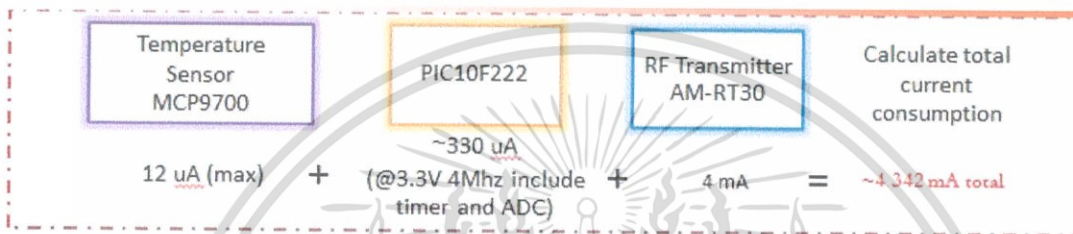
4.4.3 การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 รูปแสดงการคำนวณช่วงเวลาในระบบจำเป็นต้องใช้ในการทำงาน



ภาพที่ 4.30 รูปแสดงการคำนวณกระแสไฟที่ระบบจำเป็นต้องใช้ในการทำงาน

จากภาพที่ 4.30 จะทราบว่าระบบส่งสัญญาณต้องการกระแสไฟประมาณ 4.342 mA ในการทำงาน จึงได้ทำการเปรียบเทียบช่วงเวลาทำงานและกระแสไฟที่สามารถจ่ายได้จากการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบกับวงจรจัดการพลังงานที่ทดลองเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุและตัวต้านทานได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุ ช่วงเวลาการทำงาน และกระแสไฟที่สามารถจ่ายได้

ขนาดตัวเก็บประจุ (µF)	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

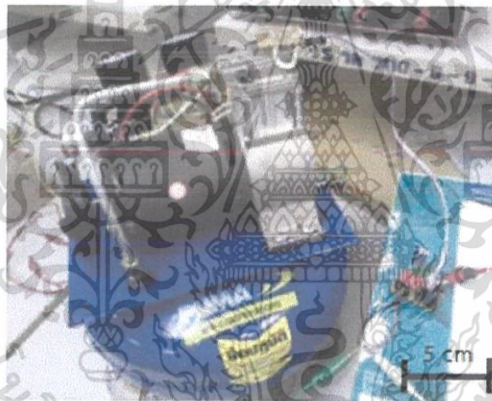
จาก ตารางที่ 4.4 เนื่องจากระบบส่งสัญญาณต้องการเวลาในการทำงานอย่างน้อย 60 us และต้องการกระแสประมาณ 4.342 mA ทำให้สามารถเลือกขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับระบบติดตามสภาพได้ คือ ตัวเก็บประจุขนาด 220 µF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร

หลังจากทดสอบอุปกรณ์แต่ละตัวในแต่ละระบบแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการนำทุกระบบมาประกอบร่วมกันจนเป็นระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักร โดยสมบูรณ์ เริ่มจากการเก็บพลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเมื่อเครื่องจักรทำงานด้วยโครงสร้างรับแรงที่ประกอบด้วยเพียโซบัสเซอร์ นำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ผ่านระบบจัดการพลังงาน และส่งพลังงานที่จัดการเรียบร้อยแล้วไปจ่ายระบบติดตามสภาพเครื่องจักรในส่วนส่งสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.31 และเมื่อส่วนรับสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.32 ได้รับสัญญาณแล้วสามารถส่งสัญญาณที่ได้รับไปแสดงในส่วนแสดงผล และแสดงผลการติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยการวัดอุณหภูมิ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มจากการทดลองวัดอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C) ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ส่วนแสดงผล ดังแสดงใน ภาพที่ 4.33

จาก ภาพที่ 4.33 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิที่สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้นสามารถวัดอุณหภูมิได้โดยมีค่าที่ผิดพลาดเป็นบางค่าซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นคาดว่าเกิดจากผลของการแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลมีค่าความละเอียดไม่เพียงพอ แต่ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ จากนั้นจึงทดสอบวัดอุณหภูมิเครื่องจักร โดยได้เปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด รุ่น GM300 ที่ได้ทำการวัดอุณหภูมิไปพร้อมๆกับระบบผลิตพลังงานแบบพึ่งพาตนเองสำหรับการติดตามสภาพเครื่องจักรด้วย ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.31 รูปแสดงการทดสอบระบบฯเมื่อจ่ายไฟให้ส่วนส่งสัญญาณ



ภาพที่ 4.32 รูปแสดงการทดสอบระบบฯส่วนรับสัญญาณและส่วนแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรเพื่อใช้ตรวจวัดอุณหภูมิขณะทำงานของเครื่องจักร สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในการเก็บเกี่ยวพลังงานสามารถเพิ่มพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้โดยการเพิ่มจำนวนเพียโซโซลาร์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานและนำมาต่อขนานกัน
2. พลังงานที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริงจำเป็นต้องมีการสะสมและปรับระดับพลังงานโดยใช้วงจรจัดการพลังงาน
3. การเลือกตัวเก็บประจุในวงจรจัดการพลังงานมีผลกับระยะเวลาชาตและระยะเวลาที่สามารถใช้พลังงานที่เก็บสะสมได้ ดังนั้นควรเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าที่เหมาะสมกับการใช้งาน
4. พลังงานที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานกับเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สายได้ แต่กระนั้นการส่งสัญญาณจะมีลักษณะการส่งเป็นช่วงๆ ไม่สามารถส่งสัญญาณอย่างต่อเนื่องได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบติดตามสภาพของเครื่องจักรได้ ซึ่งพลังงานเอาท์พุทที่ได้แม้มีลักษณะไม่ต่อเนื่องแต่คาดว่าจะสามารถนำไปใช้กับการตรวจสอบติดตามสภาพได้โดยใช้ส่งค่าเป็นระยะๆ ซึ่งการเลือกค่าตัวเก็บประจุเป็นสิ่งจำเป็นในการลดระยะเวลาที่ใช้ระหว่างส่งข้อมูล แต่หากต้องการติดตามผลข้อมูลอย่างต่อเนื่องอาจต้องใช้เพียโซที่มีคุณภาพที่สูงขึ้นหรืออาจต้องหาวิธีทางเก็บเกี่ยวพลังงานจากส่วนอื่นเพื่อมาใช้ในการที่พลังงานจากเพียโซอิเล็กทรอนิกส์กำลังขาพลังงานเข้าตัวเก็บประจุ

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Isarakorn, S.Nundrakwang, T. Sudhawiyangkul, B. Suksai, and C. Jongsintawee. "Energy Harvesting Using an Impact Type Piezoelectric Energy Harvester" **International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology**, 2012. pp.344-347.
- [2] A. Harb. "Energy harvesting: State-of-the-art" **Renewable Energy**, vol.36, 2011. pp. 2641-2654.
- [3] R. J. M. Vullers, R. Van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting" **Solid-state Electron**, vol.53, 2009. pp.684-693.
- [4] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White. "Energy harvesting vibration sources for microsystem applications" **Meas. Sci. Technol**, vol.17, 2006. pp.R175-R195.
- [5] S. R. Anton and H. A. Sodano. "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)" **Smart Mater. Struct**, vol.16, 2007. pp.R1-R21.
- [6] D. Shen, S. -Y. Choe, and D. -J. Kim. "Analysis of piezoelectric materials for energy harvesting devices under high-g vibration" **Jpn. J. Appl. Phys.**, vol.46, 2007. pp. 6755-6760.
- [7] E. K. Reilly, L. M. Miller, R. Fain, and P. Wright. "A study of ambient vibrations for piezoelectric energy conversion" **PowerMEMS 2009**, Washington DC, USA, December 1-4, 2009. pp.312-315.
- [8] P. Glynn-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White. "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems" **Sens. Actuators, A**, vol. 110, 2004. pp.344-349.
- [9] Commtest Instruments Ltd. "Beginner's Guide to Machine Vibration." [Online]. Available : http://commtest.com/media/downloads/beginners_guide_to_machine_vibrati on.pdf. 2006.
- [10] F. Peano and T. Tambosso. "Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger" **J. Microelectromech, Syst.**, vol.14, 2005. pp.435-529.
- [11] S. Roundy and P. K. Wright. "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics" **Smart. Mater. Struct.**, vol.13, 2004. pp. 1131-1142.
- [12] P. Muralt, R. G. Polcawich, and S. Trolier-McKinstry. "Piezoelectric thin films for sensors, actuators, and energy harvesting," **MRS bull**, vol.35, 2009. pp.658- 664.
- [13] J. Carpenter and Y. Ramadass. "Fundamentals of ambient energy transducers in energy harvesting systems." [Online]. Available : <http://www.ecnmag.com/articles/2012/03/fundamentals-ambient-energy-transducers-energy-harvesting-systems>. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] ABB. “Energy Harvesting: Positive adoption trends expected to double the market within 5 years” [Online]. Available : http://www.ti.com/ww/en/apps/energy-harvesting/graphics/chart_pps.gif. 2012.
- [15] Linear Technology Corporation. “LTC3588-1 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply.” [Online]. Available : www.linear.com/docs/28909. 2010.
- [16] Tylzael. “Buck circuit diagram.svg.” [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Buck_circuit_diagram.svg#filehistory. 2009
- [17] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, “Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting,” *Strain*, vol. 40, pp. 49–58, 2004.
- [18] S Roundy and P KWright, “A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics”, *Smart Mater. Struct.* 13 (2004) 1131–1142.
- [19] Swee-Leong, Kok, Mohd Fauzi Ab Rahman, David Fook Weng, Yap, Yih Hwa, Ho, ” Bandwidth Widening Strategies for Piezoelectric Based Energy Harvesting from Ambient Vibration Sources”, (ICCAIE 2011)
- [20] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, N. Gershenfeld, “Parasitic Power Harvesting in Shoes”, Physics and Media Group, MIT Media Laboratory E15-410
- [21] Arpita Mukherjee and Uma Datta, “Comparative Study of Piezoelectric Materials Properties for Green Energy Harvesting from Vibration”, 2010 Annual IEEE India Conference (INDICON)
- [22] F. Grimaccia, M. Mussetta, R.E. Zich, “An Evolutionary Optimized Device for Energy Harvesting from Traffic”, WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence June, 10-15, 2012 - Brisbane, Australia.
- [23] Michail. E. Kiziroglou, Cairan He and Eric M. Yeatman, “Non-Resonant Electrostatic Energy Harvesting from a Rolling Mass”, The 5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors The Chinese University of Hong Kong, HKSAR, China. Jun 1-3, 2008



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply

FEATURES

- 950nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load)
- 450nA Input Quiescent Current in UVLO
- 2.7V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- Up to 100mA of Output Current
- Selectable Output Voltages of 1.8V, 2.5V, 3.3V, 3.6V
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Wide Input Undervoltage Lockout (UVLO) Range
- Available in 10-Lead MSE and 3mm \times 3mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Piezoelectric Energy Harvesting
- Electro-Mechanical Energy Harvesting
- Wireless HVAC Sensors
- Mobile Asset Tracking
- Tire Pressure Sensors
- Battery Replacement for Industrial Sensors
- Remote Light Switches
- Standalone Nanopower Buck Regulator

DESCRIPTION

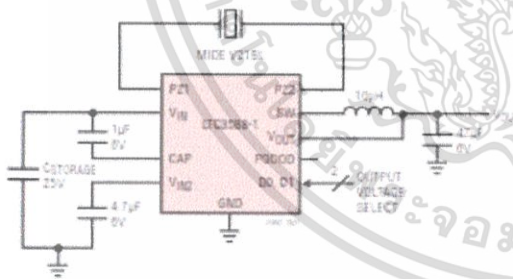
The LTC[®]3588-1 integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric transducers. An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) mode with a wide hysteresis window allows charge to accumulate on an input capacitor until the buck converter can efficiently transfer a portion of the stored charge to the output. In regulation, the LTC3588-1 enters a sleep state in which both input and output quiescent currents are minimal. The buck converter turns on and off as needed to maintain regulation.

Four output voltages, 1.8V, 2.5V, 3.3V, and 3.6V, are pin selectable with up to 100mA of continuous output current; however, the output capacitor may be sized to service a higher output current burst. An input protective shunt set at 20V enables greater energy storage for a given amount of input capacitance.

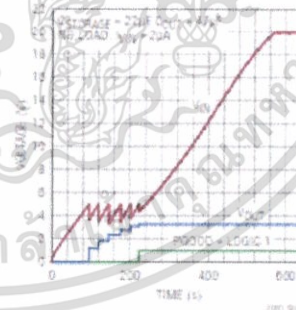
© 2011 Linear Technology. All rights reserved. Linear Technology and the Linear Technology logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



358811b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

V_{IN}	V_{OUT}	-0.3V to Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V
Low Impedance Source	PGOOD	-0.3V to Lesser of ($V_{OUT} + 0.3V$) or 6V
Current Fed. $I_{SW} = 0A$	I_{PZ1}, I_{PZ2}	$\pm 50mA$
PZ1, PZ2	I_{SW}	350mA
DO, D1	Operating Junction Temperature Range	(Notes 2, 3) -40 to 125°C
CAP	Storage Temperature Range	-65 to 150°C
V_{IN2}	Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	MSE Only 300°C

* V_{IN} has an internal 20V clamp

† For $t < 1ms$ and Duty Cycle $< 1\%$
Absolute Maximum Continuous Current = 5mA

PIN CONFIGURATION**ORDER INFORMATION**

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
LTC3588EDD-1#PBF	LTC3588EDD-1#TRPBF	LTKY	10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3588IDD-1#PBF	LTC3588IDD-1#TRPBF	LTKY	10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3588EMSE-1#PBF	LTC3588EMSE-1#TRPBF	LTKX	10-Lead Plastic eMSOP	-40°C to 125°C
LTC3588IMSE-1#PBF	LTC3588IMSE-1#TRPBF	LTKX	10-Lead Plastic eMSOP	-40°C to 125°C

Consult LTC Marketing for parts specified with wider operating temperature ranges. * The temperature grade is identified by a label on the shipping container.

For more information on lead free part marking, go to: <http://www.linear.com/leadfree>

This product is only offered in trays. For more information go to: <http://www.linear.com/packaging>

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for T_A = 25°C. (Note 2) V_{IN} = 5.5V unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
V _{IN}	Input Voltage Range	Low Impedance Source on V _{IN}	●		18.0	V	
I _{VIN}	V _{IN} Quiescent Current UVLO	V _{IN} = 2.5V Not PGOOD		450	700	nA	
	Buck Enabled, Sleeping	V _{IN} = 4.5V		950	1500	nA	
	Buck Enabled, Sleeping	V _{IN} = 18V		1.7	2.5	μA	
	Buck Enabled, Not Sleeping	I _{SW} = 0A (Note 4)		150	250	μA	
V _{UVLO}	V _{IN} Undervoltage Lockout Threshold	V _{IN} Rising					
		1.8V Output Selected, D1 = 0, D0 = 0	●	3.77	4.04	4.30	V
		2.5V Output Selected, D1 = 0, D0 = 1	●	3.77	4.04	4.30	V
		3.3V Output Selected, D1 = 1, D0 = 0	●	4.73	5.05	5.37	V
		3.6V Output Selected, D1 = 1, D0 = 1	●	4.73	5.05	5.37	V
		V _{IN} Falling					
		1.8V Output Selected, D1 = 0, D0 = 0	●	2.66	2.87	3.08	V
		2.5V Output Selected, D1 = 0, D0 = 1	●	2.66	2.87	3.08	V
		3.3V Output Selected, D1 = 1, D0 = 0	●	3.82	3.91	4.00	V
		3.6V Output Selected, D1 = 1, D0 = 1	●	3.75	4.02	4.28	V
V _{SHUNT}	V _{IN} Shunt Regulator Voltage	I _{SHUNT} = 1mA		19.0	20.0	21.0	V
I _{SHUNT}	Maximum Protective Shunt Current	Time Duration		25		mA	
	Internal Bridge Rectifier Loss (V _{PE21} - V _{PE22}) × I _{VIN}	I _{BRIDGE} = 10μA		350	400	450	mV
	Internal Bridge Rectifier Reverse Leakage Current	V _{REVERSE} = 18V			20	nA	
	Internal Bridge Rectifier Reverse Breakdown Voltage	I _{REVERSE} = 1μA		V _{SHUNT}	30	V	
V _{OUT}	Regulated Output Voltage	1.8V Output Selected					
		Sleep Threshold	●	1.812	1.890	V	
		Wake-Up Threshold	●	1.710	1.788	V	
		2.5V Output Selected					
		Sleep Threshold	●	2.542	2.575	V	
		Wake-Up Threshold	●	2.425	2.498	V	
		3.3V Output Selected					
		Sleep Threshold	●	3.312	3.399	V	
		Wake-Up Threshold	●	3.211	3.268	V	
		3.6V Output Selected					
		Sleep Threshold	●	3.612	3.708	V	
		Wake-Up Threshold	●	3.492	3.568	V	
	PGOOD Falling Threshold	As a Percentage of the Selected V _{OUT}		83	92	%	
I _{OUT}	Output Quiescent Current	V _{OUT} = 3.0V		89	150	nA	
I _{PEAK}	Buck Peak Switch Current			200	260	350	mA
I _{BUCK}	Available Buck Output Current			150		mA	
R _{PF}	Buck PMOS Switch On-Resistance			1.0		Ω	
R _N	Buck NMOS Switch On-Resistance			0.3		Ω	
	Max Buck Duty Cycle		●	100		%	
V _{H(D0, D1)}	D0/D1 Input High Voltage		●	1.2		V	
V _{L(D0, D1)}	D0/D1 Input Low Voltage				0.4	V	
I _{H(D0, D1)}	D0/D1 Input High Current				10	nA	
I _{L(D0, D1)}	D0/D1 Input Low Current				10	nA	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

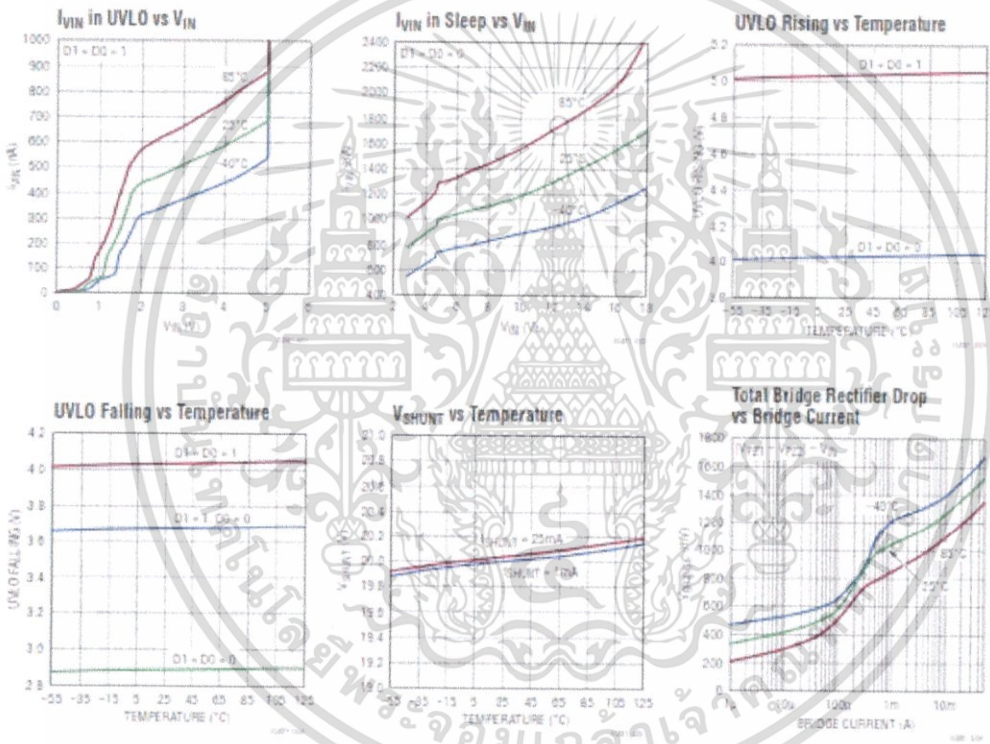
Note 2: The LTC3588-1 is tested under pulsed load conditions such that $T_J = T_A$. The LTC3588E-1 is guaranteed to meet specifications from 0°C to 85°C junction temperature. Specifications over the -40°C to 125°C operating junction temperature range are assured by design, characterization, and correlation with statistical process controls. The LTC3588E-1 is guaranteed over the full -40°C to 125°C operating

junction temperature range. Note that the maximum ambient temperature consistent with these specifications is determined by specific operating conditions in conjunction with board layout, the rated package thermal impedance and other environmental factors.

Note 3: The junction temperature (T_J , in °C) is calculated from the ambient temperature (T_A , in °C) and power dissipation (P_D , in Watts) according to the formula: $T_J = T_A + (P_D \cdot \theta_{JA})$, where θ_{JA} (in °C/W) is the package thermal impedance.

Note 4: Dynamic supply current is higher due to gate charge being delivered at the switching frequency.

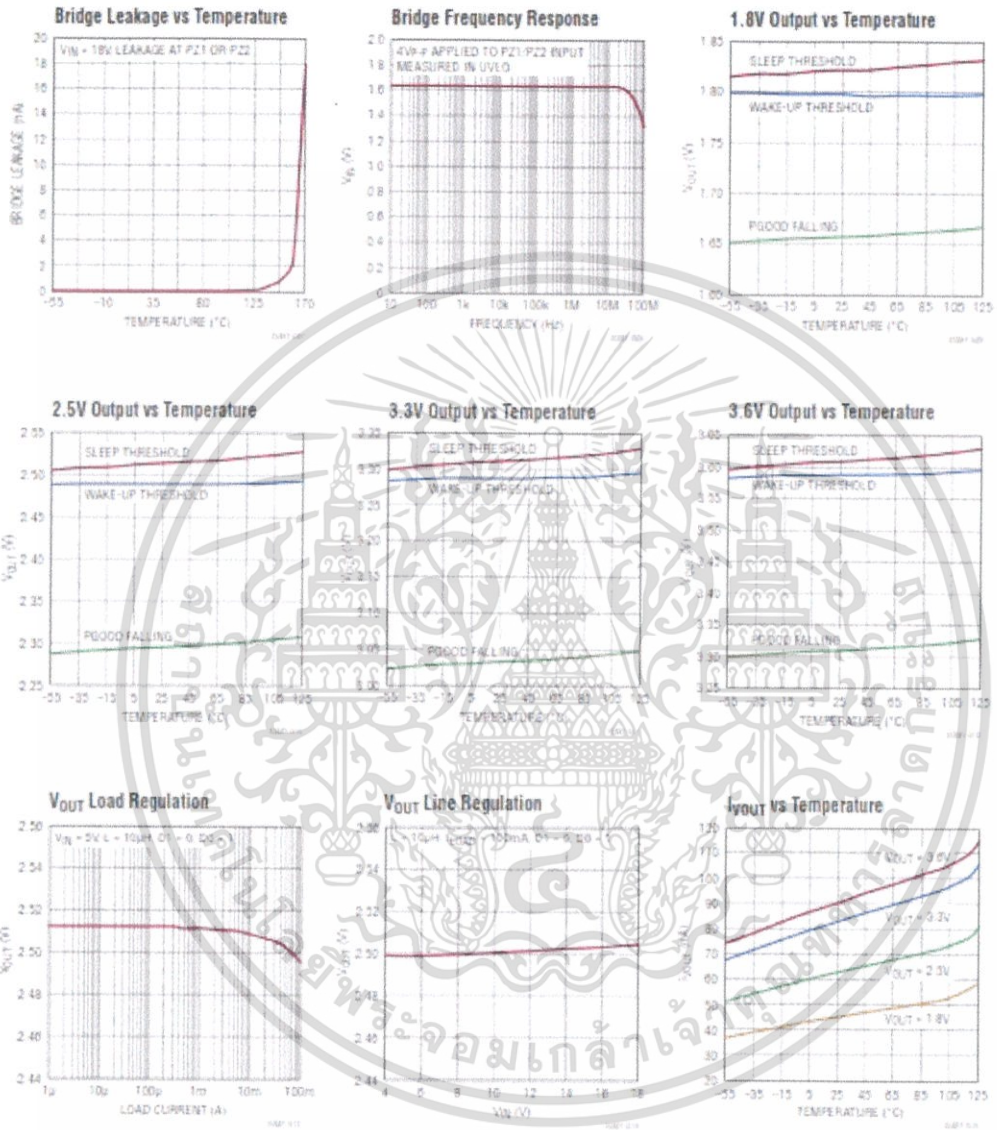
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



35881b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



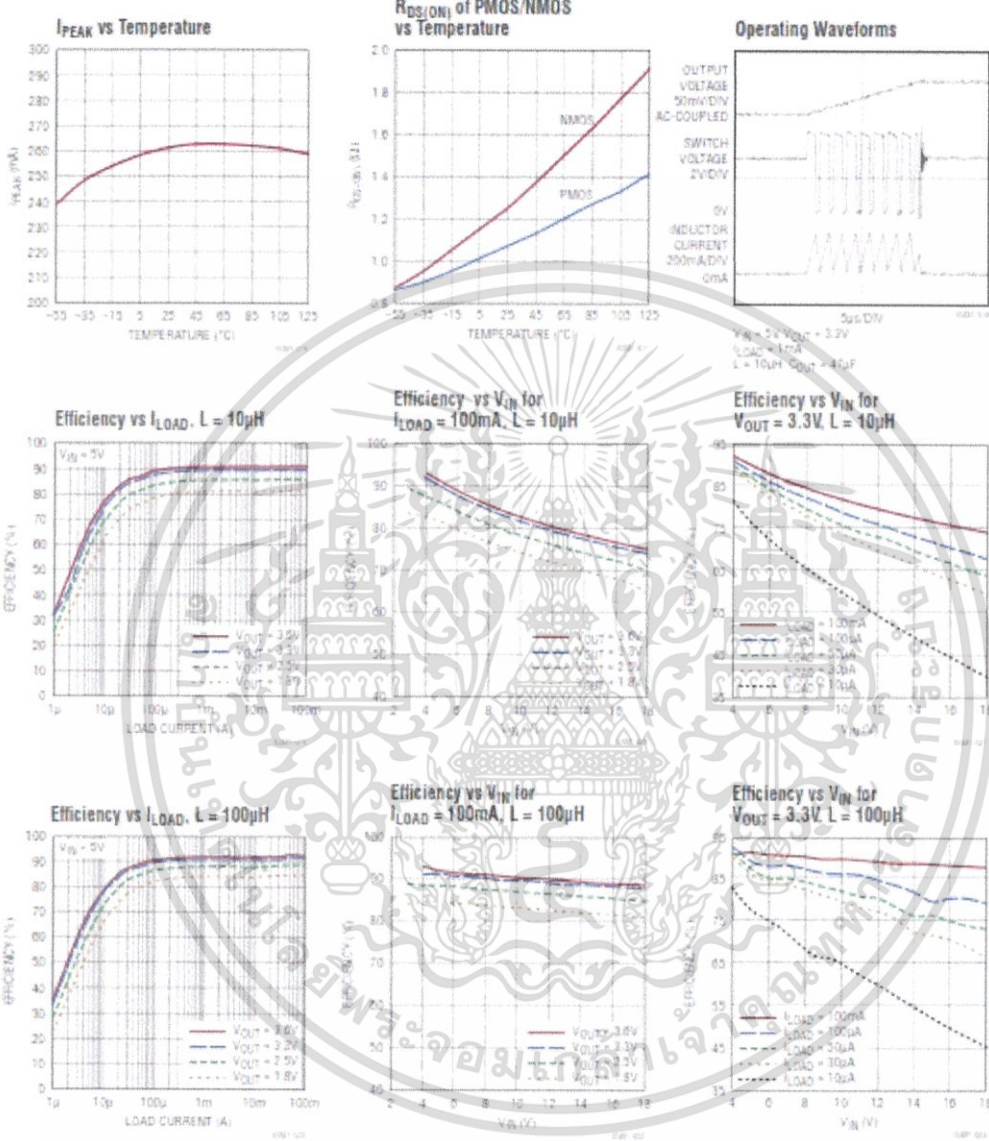
338811a



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN FUNCTIONS

PZ1 (Pin 1): Input connection for piezoelectric element or other AC source (used in conjunction with PZ2).

PZ2 (Pin 2): Input connection for piezoelectric element or other AC source (used in conjunction with PZ1).

CAP (Pin 3): Internal rail referenced to V_{IN} to serve as gate drive for buck PMOS switch. A $1\mu\text{F}$ capacitor should be connected between CAP and V_{IN} . This pin is not intended for use as an external system rail.

V_{IN} (Pin 4): Rectified Input Voltage. A capacitor on this pin serves as an energy reservoir and input supply for the buck regulator. The V_{IN} voltage is internally clamped to a maximum of 20V (typical).

SW (Pin 5): Switch Pin for the Buck Switching Regulator. A $10\mu\text{H}$ or larger inductor should be connected from SW to V_{OUT} .

V_{OUT} (Pin 6): Sense pin used to monitor the output voltage and adjust it through internal feedback.

V_{IN2} (Pin 7): Internal low voltage rail to serve as gate drive for buck NMOS switch. Also serves as a logic high rail for output voltage select bits D0 and D1. A $4.7\mu\text{F}$ capacitor should be connected from V_{IN2} to GND. This pin is not intended for use as an external system rail.

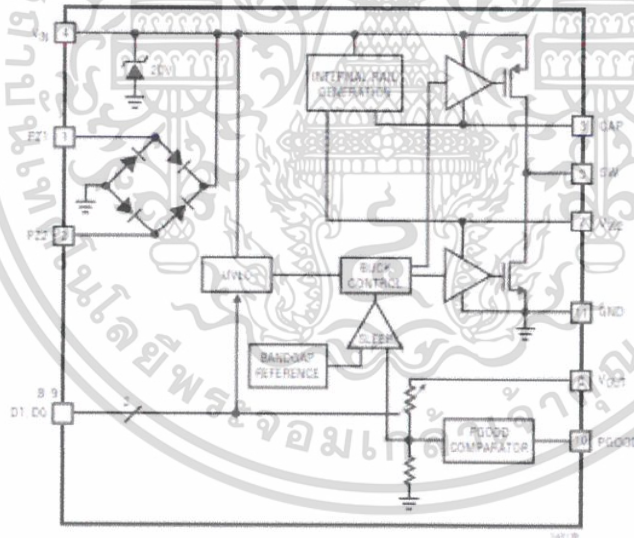
D1 (Pin 8): Output Voltage Select Bit. D1 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

D0 (Pin 9): Output Voltage Select Bit. D0 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

PGOOD (Pin 10): Power good output is logic high when V_{OUT} is above 92% of the target value. The logic high is referenced to the V_{OUT} rail.

GND (Exposed Pad Pin 11): Ground. The Exposed Pad should be connected to a continuous ground plane on the second layer of the printed circuit board by several vias directly under the LTC3588-1.

BLOCK DIAGRAM



35881b

LTC3588-1

OPERATION

The LTC3588-1 is an ultralow quiescent current power supply designed specifically for energy harvesting and/or low current step-down applications. The part is designed to interface directly to a piezoelectric or alternative A/C power source, rectify a voltage waveform and store harvested energy on an external capacitor, bleed off any excess power via an internal shunt regulator, and maintain a regulated output voltage by means of a nanopower high efficiency synchronous buck regulator.

Internal Bridge Rectifier

The LTC3588-1 has an internal full-wave bridge rectifier accessible via the differential PZ1 and PZ2 inputs that rectifies AC inputs such as those from a piezoelectric element. The rectified output is stored on a capacitor at the V_{IN} pin and can be used as an energy reservoir for the buck converter. The low-loss bridge rectifier has a total drop of about 400mV with typical piezo generated currents (~10 μ A). The bridge is capable of carrying up to 50mA. One side of the bridge can be operated as a single-ended DC input. PZ1 and PZ2 should never be shorted together when the bridge is in use.

Undervoltage Lockout (UVLO)

When the voltage on V_{IN} rises above the UVLO rising threshold the buck converter is enabled and charge is transferred from the input capacitor to the output capacitor. A wide (~1V) UVLO-hysteresis window is employed with a lower threshold approximately 300mV above the selected regulated output voltage to prevent short cycling during buck power-up. When the input capacitor voltage is depleted below the UVLO falling threshold, the buck converter is disabled. Extremely low quiescent current (450nA typical) in UVLO allows energy to accumulate on the input capacitor in situations where energy must be harvested from low power sources.

Internal Rail Generation

Two internal rails, CAP and V_{IN2} , are generated from V_{IN} and are used to drive the high side PMOS and low side NMOS of the buck converter, respectively. Additionally the V_{IN2} rail serves as logic high for output voltage select bits D0 and D1. The V_{IN2} rail is regulated at 4.8V above GND while the CAP rail is regulated at 4.8V below V_{IN} . These are not intended to be used as external rails. Bypass capacitors are connected to the CAP and V_{IN2} pins to serve as energy reservoirs for driving the buck switches. When V_{IN} is below 4.8V, V_{IN2} is equal to V_{IN} and CAP is held at GND. Figure 1 shows the ideal V_{IN} , V_{IN2} and CAP relationship.

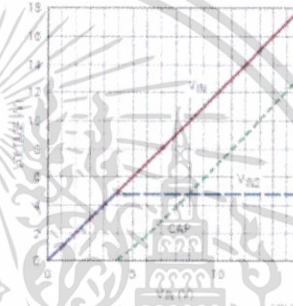


Figure 1. Ideal V_{IN} , V_{IN2} and CAP Relationship

Buck Operation

The buck regulator uses a hysteretic voltage algorithm to control the output through internal feedback from the V_{OUT} sense pin. The buck converter charges an output capacitor through an inductor to a value slightly higher than the regulation point. It does this by ramping the inductor current up to 260mA through an internal PMOS switch and then ramping it down to 0mA through an internal NMOS switch. This efficiently delivers energy to the output capacitor. The ramp rate is determined by V_{IN} , V_{OUT} , and the inductor value. If the input voltage falls below the

OPERATION

UVLO falling threshold before the output voltage reaches regulation, the buck converter will shut off and will not be turned on until the input voltage again rises above the UVLO rising threshold. During this time the output voltage will be loaded by less than 100nA. When the buck brings the output voltage into regulation the converter enters a low quiescent current sleep state that monitors the output voltage with a sleep comparator. During this operating mode load current is provided by the buck output capacitor. When the output voltage falls below the regulation point the buck regulator wakes up and the cycle repeats. This hysteretic method of providing a regulated output reduces losses associated with FET switching and maintains an output at light loads. The buck delivers a minimum of 100mA of average load current when it is switching.

When the sleep comparator signals that the output has reached the sleep threshold the buck converter may be in the middle of a cycle with current still flowing through the inductor. Normally both synchronous switches would turn off and the current in the inductor would freewheel to zero through the NMOS body diode. The LTC3588-1 keeps the NMOS switch on during this time to prevent the conduction loss that would occur in the diode if the NMOS were off. If the PMOS is on when the sleep comparator trips the NMOS will turn on immediately in order to ramp down the current. If the NMOS is on it will be kept on until the current reaches zero.

Though the quiescent current when the buck is switching is much greater than the sleep quiescent current, it is still a small percentage of the average inductor current which results in high efficiency over most load conditions. The buck operates only when sufficient energy has been accumulated in the input capacitor and the length of time the converter needs to transfer energy to the output is much less than the time it takes to accumulate energy. Thus, the buck operating quiescent current is averaged over a long period of time so that the total average quiescent current is low. This feature accommodates sources that harvest small amounts of ambient energy.

Four selectable voltages are available by tying the output select bits, D0 and D1, to GND or V_{IN2} . Table 1 shows the four D0/D1 codes and their corresponding output voltages.

Table 1. Output Voltage Selection

D1	D0	V _{OUT}	V _{OUT} QUIESCENT CURRENT (I _{QOUT})
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	62nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

The internal feedback network draws a small amount of current from V_{OUT} as listed in Table 1.

Power Good Comparator

A power good comparator produces a logic high referenced to V_{OUT} on the PGOOD pin the first time the converter reaches the sleep threshold of the programmed V_{OUT} , signaling that the output is in regulation. The PGOOD pin will remain high until V_{OUT} falls to 92% of the desired regulation voltage. Several sleep cycles may occur during this time. Additionally, if PGOOD is high and V_{IN} falls below the UVLO falling threshold, PGOOD will remain high until V_{OUT} falls to 92% of the desired regulation point. This allows output energy to be used even if the input is lost. Figure 2 shows the behavior for $V_{OUT} = 3.6V$ and no load. At $t = 75s$ V_{IN} becomes high impedance and is discharged by the quiescent current of the LTC3588-1 and through servicing V_{OUT} which is discharged by its own leakage current. V_{IN} crosses UVLO falling but PGOOD remains high until V_{OUT} decreases to 92% of the desired regulation point. The PGOOD pin is designed to drive a microprocessor or other chip I/O and is not intended to drive higher current loads such as an LED.

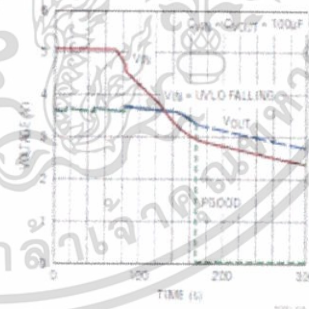


Figure 2. PGOOD Operation During Transition to UVLO

LTC3588-1

OPERATION

The D0/D1 inputs can be switched while in regulation as shown in Figure 3. If V_{OUT} is programmed to a voltage with a PGOOD falling threshold above the old V_{OUT} , PGOOD will transition low until the new regulation point is reached. When V_{OUT} is programmed to a lower voltage, PGOOD will remain high through the transition.

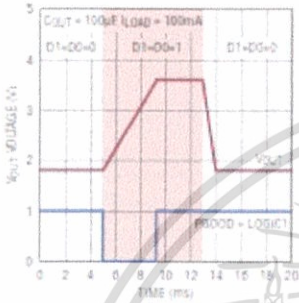


Figure 3. PGOOD Operation During D0/D1 Transition

Energy Storage

Harvested energy can be stored on the input capacitor or the output capacitor. The wide input range takes advantage of the fact that energy storage on a capacitor is proportional to the square of the capacitor voltage. After the output voltage is brought into regulation any excess energy is stored on the input capacitor and its voltage increases. When a load exists at the output the buck can efficiently transfer energy stored at a high voltage to the regulated output. While energy storage at the input utilizes the high voltage at the input, the load current is limited to what the buck converter can supply. If larger loads need to be serviced the output capacitor can be sized to support a larger current for some duration. For example, a current burst could begin when PGOOD goes high and would continuously deplete the output capacitor until PGOOD went low.

APPLICATIONS INFORMATION

Introduction

The LTC3588-1 harvests ambient vibrational energy through a piezoelectric element in its primary application. Common piezoelectric elements are PZT (lead zirconate titanate) ceramics, PVDF (polyvinylidene fluoride) polymers, or other composites. Ceramic piezoelectric elements exhibit a piezoelectric effect when the crystal structure of the ceramic is compressed and internal dipole movement produces a voltage. Polymer elements comprised of long-chain molecules produce a voltage when flexed as molecules repel each other. Ceramics are often used under direct pressure while a polymer can be flexed more readily. A wide range of piezoelectric elements are available and produce a variety of open-circuit voltages and short-circuit currents. Typically the open-circuit voltage and short-circuit currents increase with available vibrational energy as shown in Figure 4. Piezoelectric elements can be placed in series or in parallel to achieve desired open-circuit voltages.

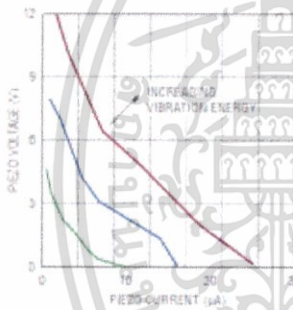


Figure 4. Typical Piezoelectric Load Lines for Piezo Systems T220-A4-503X

The LTC3588-1 is well-suited to a piezoelectric energy harvesting application. The 20V input protective shunt can accommodate a variety of piezoelectric elements. The low quiescent current of the LTC3588-1 enables efficient energy accumulation from piezoelectric elements which can have short-circuit currents on the order of tens of microamps. Piezoelectric elements can be obtained from manufacturers listed in Table 2.

Table 2. Piezoelectric Element Manufacturers

Advanced Cerametrics	www.advancedcerametrics.com
Piezo Systems	www.piezo.com
Measurement Specialties	www.meas-spec.com
PI (Physik Instrumente)	www.pi-usa.us
MIDE Technology Corporation	www.mide.com
Morgan Technical Ceramics	www.morganelectroceramics.com

The LTC3588-1 will gather energy and convert it to a useable output voltage to power microprocessors, wireless sensors, and wireless transmission components. Such a wireless sensor application may require much more peak power than a piezoelectric element can produce. However, the LTC3588-1 accumulates energy over a long period of time to enable efficient use for short power bursts. For continuous operation, these bursts must occur with a low duty cycle such that the total output energy during the burst does not exceed the average source power integrated over an energy accumulation cycle. For piezoelectric inputs the time between cycles could be minutes, hours, or longer depending on the selected capacitor values and the nature of the vibration source.

LTC3588-1

APPLICATIONS INFORMATION

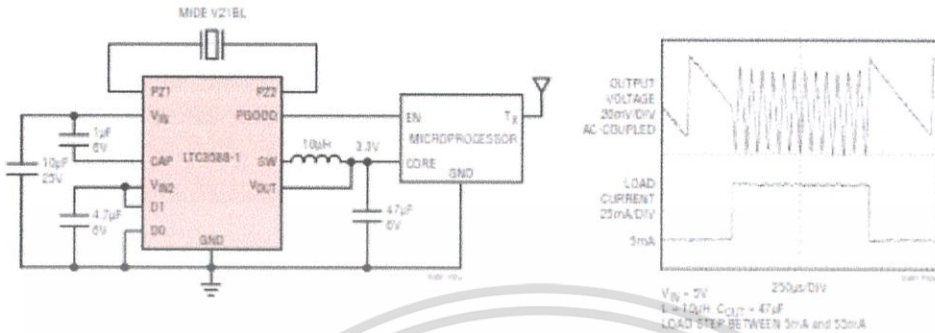


Figure 5. 3.3V Piezoelectric Energy Harvester Powering a Microprocessor with a Wireless Transmitter and 50mA Load Step Response

PGOOD Signal

The PGOOD signal can be used to enable a sleeping microprocessor or other circuitry when V_{OUT} reaches regulation, as shown in Figure 5. Typically V_{IN} will be somewhere between the UVLO thresholds at this time and a load could only be supported by the output capacitor. Alternatively, waiting a period of time after PGOOD goes high would let the input capacitor accumulate more energy allowing load current to be maintained longer as the buck efficiently transfers that energy to the output. While active, a microprocessor may draw a small load when operating sensors, and then draw a large load to transmit data. Figure 5 shows the LTC3588-1 responding smoothly to such a load step.

Input and Output Capacitor Selection

The input and output capacitors should be selected based on the energy needs and load requirements of the application. In every case the V_{IN} capacitor should be rated to withstand the highest voltage ever present at V_{IN} . For 100mA or smaller loads, storing energy at the input takes advantage of the high voltage input since the buck can deliver 100mA average load current efficiently to the output. The input capacitor should then be sized to store enough energy to provide output power for the length of time required. This may involve using a large capacitor, letting V_{IN} charge to a high voltage, or both. Enough energy

should be stored on the input so that the buck does not reach the UVLO falling threshold which would halt energy transfer to the output. In general:

$$P_{LOAD} t_{LOAD} = \frac{1}{2} \eta C_{IN} (V_{IN}^2 - V_{UVLOFALLING}^2)$$

$$V_{UVLOFALLING} \leq V_{IN} \leq V_{SHUNT}$$

The above equation can be used to size the input capacitor to meet the power requirements of the output for the desired duration. Here η is the average efficiency of the buck converter over the input range and V_{IN} is the input voltage when the buck begins to switch. This equation may overestimate the input capacitor necessary since load current can deplete the output capacitor all the way to the lower PGOOD threshold. It also assumes that the input source charging has a negligible effect during this time.

The duration for which the regulator sleeps depends on the load current and the size of the output capacitor. The sleep time decreases as the load current increases and/or as the output capacitor decreases. The DC sleep hysteresis window is $\pm 12mV$ around the programmed output voltage. Ideally this means that the sleep time is determined by the following equation:

$$t_{SLEEP} = C_{OUT} \frac{24mV}{I_{LOAD}}$$

APPLICATIONS INFORMATION

This is true for output capacitors on the order of 100µF or larger, but as the output capacitor decreases towards 10µF delays in the internal sleep comparator along with the load current may result in the V_{OUT} voltage slewing past the ±12mV thresholds. This will lengthen the sleep time and increase V_{OUT} ripple. A capacitor less than 10µF is not recommended as V_{OUT} ripple could increase to an undesirable level.

If transient load currents above 100mA are required then a larger capacitor can be used at the output. This capacitor will be continuously discharged during a load condition and the capacitor can be sized for an acceptable drop in V_{OUT}:

$$C_{OUT} = (V_{OUT+} - V_{OUT-}) \frac{I_{LOAD} - I_{BUCK}}{I_{LOAD}}$$

Here V_{OUT+} is the value of V_{OUT} when PGOOD goes high and V_{OUT-} is the desired lower limit of V_{OUT}. I_{BUCK} is the average current being delivered from the buck converter, typically I_{PEAK}/2.

A standard surface mount ceramic capacitor can be used for C_{OUT}, though some applications may be better suited to a low leakage aluminum electrolytic capacitor or a supercapacitor. These capacitors can be obtained from manufacturers such as Vishay, Illinois Capacitor, AVX, or CAP-XX.

Inductor

The buck is optimized to work with an inductor in the range of 10µH to 22µH, although inductor values outside this range may yield benefits in some applications. For typical applications, a value of 10µH is recommended. A larger inductor will benefit high voltage applications by increasing the on-time of the PMOS switch and improving efficiency by reducing gate charge loss. Choose an inductor with a DC current rating greater than 350mA. The DCR of the inductor can have an impact on efficiency as it is a source

of loss. Tradeoffs between price, size, and DCR should be evaluated. Table 3 lists several inductors that work well with the LTC3588-1.

Table 3. Recommended Inductors for LTC3588-1

INDUCTOR TYPE	L (µH)	MAX I _{DC} (mA)	MAX DCR (Ω)	SIZE in mm (L x W x H)	MANUFACTURER
CDRH2D18/LDNP	10	430	0.190	3 x 3 x 2	Sumida
107AS-100M	10	650	0.145	2.8 x 3 x 1.8	Toko
EPL3015-103ML	10	350	0.301	2.8 x 3 x 1.5	Coilcraft
MLP3225s100L	10	1000	0.130	3.2 x 2.5 x 1.0	TDK
XLP2010-103ML	10	490	0.611	2.0 x 1.9 x 1.0	Coilcraft
SLF7045T	100	500	0.250	7.0 x 7.0 x 4.5	TDK

V_{IN2} and CAP Capacitors

A 1µF capacitor should be connected between V_{IN} and CAP and a 4.7µF capacitor should be connected between V_{IN2} and GND. These capacitors hold up the internal rails during buck switching and compensate the internal rail generation circuits. In applications where the input source is limited to less than 6V the CAP pin can be tied to GND and the V_{IN2} pin can be tied to V_{IN} as shown in Figure 6. An optional 5.6V Zener diode can be connected to V_{IN} to clamp V_{IN} in this scenario. The leakage of the Zener diode below its Zener voltage should be considered as it may be comparable to the quiescent current of the LTC3588-1. This circuit does not require the capacitors on V_{IN2} and CAP, saving components and allowing a lower voltage rating for the single V_{IN} capacitor.

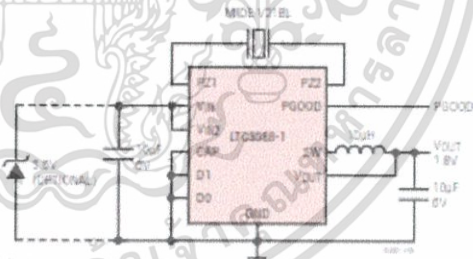


Figure 6. Smallest Solution Size 1.8V Low Voltage Input Piezoelectric Power Supply

LTC3588-1

APPLICATIONS INFORMATION

Additional Applications with Piezo Inputs

The versatile LTC3588-1 can be used in a variety of configurations. Figure 7 shows a single piezo source powering two LTC3588-1s simultaneously, providing capability for multiple rail systems. This setup features automatic supply sequencing as the LTC3588-1 with the lower voltage output (i.e. lower UVLO rising threshold) will come up first. As the piezo provides input power both V_{IN} rails will initially come up together, but when one output starts drawing power, only its corresponding V_{IN} will fall as the bridges of each LTC3588-1 provide isolation. Input piezo energy will then be directed to this lower voltage capacitor until both V_{IN} rails are again equal. This configuration is expandable to any number of LTC3588-1s powered by a single piezo as long as the piezo can support the sum total of the quiescent currents from each LTC3588-1.

A piezo powered LTC3588-1 can also be used in concert with a battery connected to V_{IN} to supplement the system if ambient vibrational energy ceases as shown in Figure 8. A blocking diode placed in series with the battery to V_{IN} prevents reverse current in the battery if the piezo source charges V_{IN} past the battery voltage. A 9V battery is shown, but any stack of batteries of a given chemistry can be used as long as the battery stack voltage does not exceed 18V. In this setup the presence of the piezo energy harvester can greatly increase the life of the battery. If the piezo source is removed the LTC3588-1 can serve as a standalone nanopower buck converter. In this case the bridge is unused and the blocking diode is unnecessary.

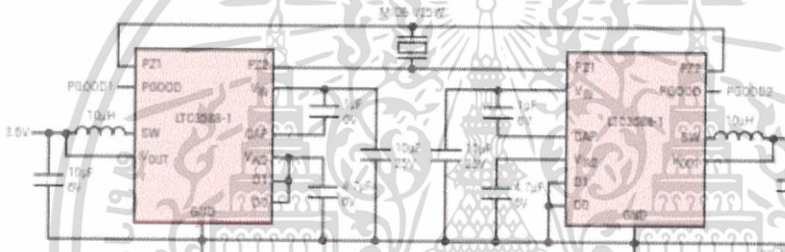


Figure 7. Dual Rail Power Supply with Single Piezo and Automatic Supply Sequencing

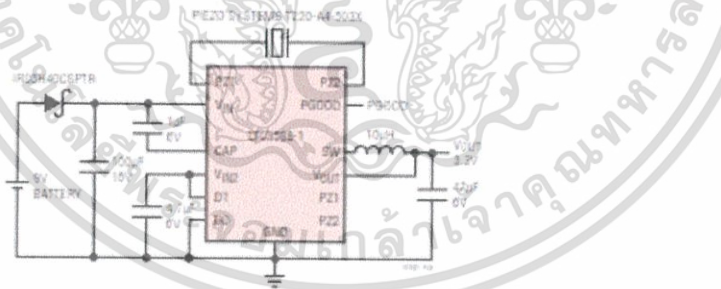
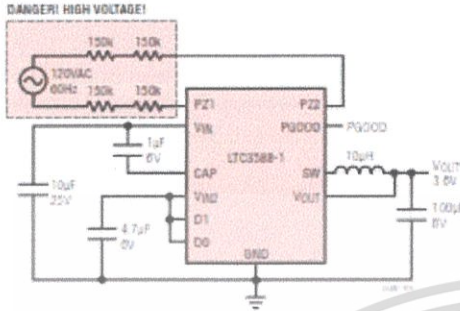


Figure 8. Piezo Energy Harvester with Battery Backup

APPLICATIONS INFORMATION



DANGEROUS AND LETHAL POTENTIALS ARE PRESENT IN OFFLINE CIRCUITS! BEFORE PROCEEDING ANY FURTHER, THE READER IS WARNED THAT CAUTION MUST BE USED IN THE CONSTRUCTION, TESTING AND USE OF OFFLINE CIRCUITS. EXTREME CAUTION MUST BE USED IN WORKING WITH AND MAKING CONNECTIONS TO THESE CIRCUITS. REPEAT: OFFLINE CIRCUITS CONTAIN DANGEROUS, AC LINE-CONNECTED HIGH VOLTAGE POTENTIALS. USE CAUTION. ALL TESTING PERFORMED ON AN OFFLINE CIRCUIT MUST BE DONE WITH AN ISOLATION TRANSFORMER CONNECTED BETWEEN THE OFFLINE CIRCUIT'S INPUT AND THE AC LINE. USERS AND CONSTRUCTORS OF OFFLINE CIRCUITS MUST OBSERVE THIS PRECAUTION WHEN CONNECTING TEST EQUIPMENT TO THE CIRCUIT TO AVOID ELECTRIC SHOCK. REPEAT: AN ISOLATION TRANSFORMER MUST BE CONNECTED BETWEEN THE CIRCUIT INPUT AND THE AC LINE IF ANY TEST EQUIPMENT IS TO BE CONNECTED.

Figure 9. AC Line Powered 3.6V Buck Regulator with Large Output Capacitor to Support Heavy Loads

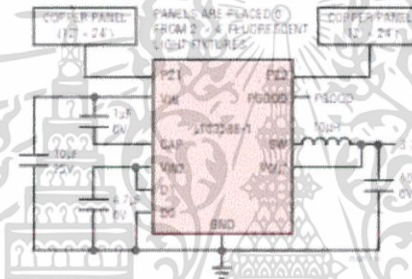


Figure 10. Electric Field Energy Harvester

Alternate Power Sources

The LTC3588-1 is not limited to use with piezoelectric elements but can accommodate a wide variety of input sources depending on the type of ambient energy available. Figure 9 shows the LTC3588-1 internal bridge rectifier connected to the AC line in series with four 150k current limiting resistors. This is a high voltage application and minimum spacing between the line, neutral, and any high voltage components should be maintained per the applicable UL specification. For general off-line applications refer to UL regulation 1012.

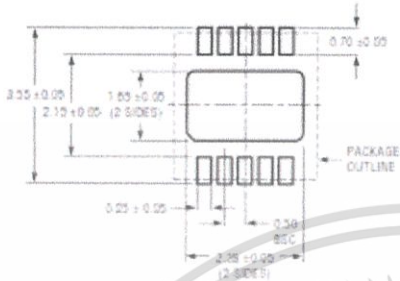
Figure 10 shows an application where copper panels are placed near a standard fluorescent room light to capacitively

harvest energy from the electric field around the light. The frequency of the emission will be 120Hz for magnetic ballasts but could be higher if the light uses electronic ballast. The LTC3588-1 bridge rectifier can handle a wide range of input frequencies.

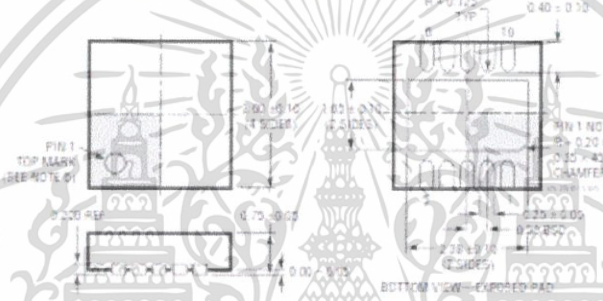
The LTC3588-1 can also be configured for use with DC sources such as a solar panel or thermal couple as shown in Figures 11 and 12 by connecting them to one of the PZ1/PZ2 inputs. Connecting the two sources in this way prevents reverse current from flowing in each element. Current limiting resistors should be used to protect the PZ1 or PZ2 pins. This can be combined with a battery backup connected to V_{IN} with a blocking diode.

PACKAGE DESCRIPTION

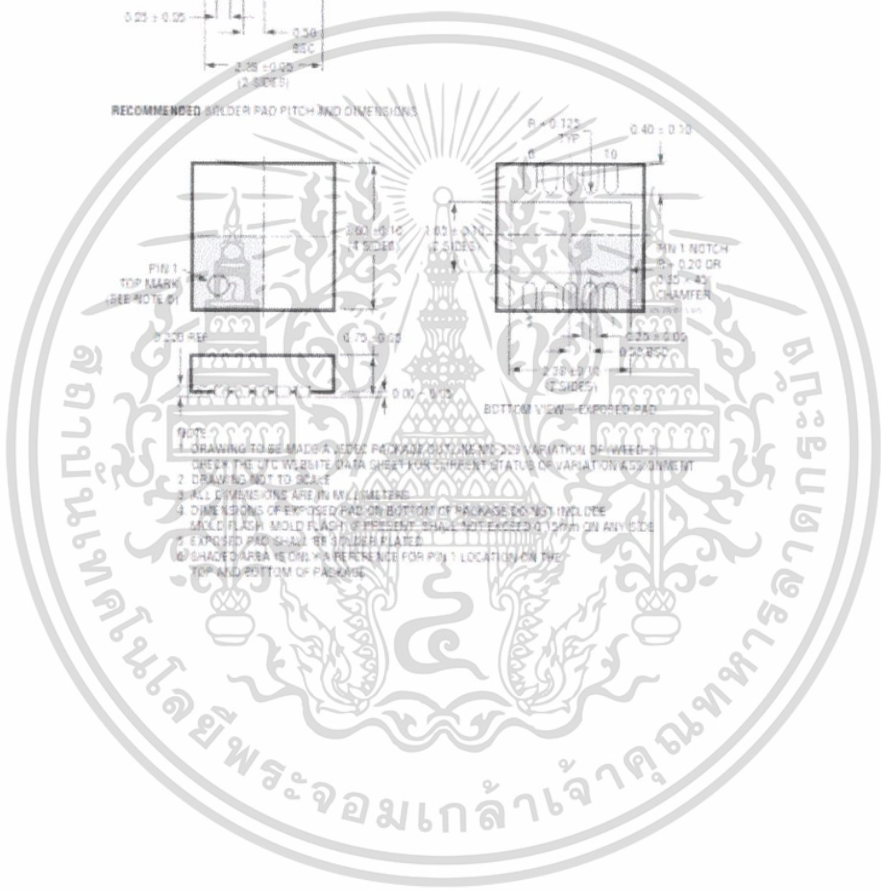
DD Package
10-Lead Plastic DFN (3mm × 3mm)
 (Reference LTC DWG # 05-08-1699 Rev C)



RECOMMENDED SOLDER PAD PITCH AND DIMENSIONS



- NOTE**
- DRAWING TO BE MADE A SOLDER PACKAGE OUTLINE VARIATION OF WIRE-BOND
 - CHECK THE LTC WEBSITE DATA SHEET FOR CURRENT STATUS OF VARIATION ASSIGNMENT
 - DRAWING NOT TO SCALE
 - ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 - DIMENSIONS OF EXPOSED PADS ON BOTTOM OF PACKAGE DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH (IF PRESENT) SHALL NOT EXCEED 0.10mm ON ANY SIDE
 - EXPOSED PADS SHALL BE SOLDER PLANE
 - SPACE 3.0MM MIN. - A REFERENCE FOR PIN 1 LOCATION ON THE TOP AND BOTTOM OF PACKAGE

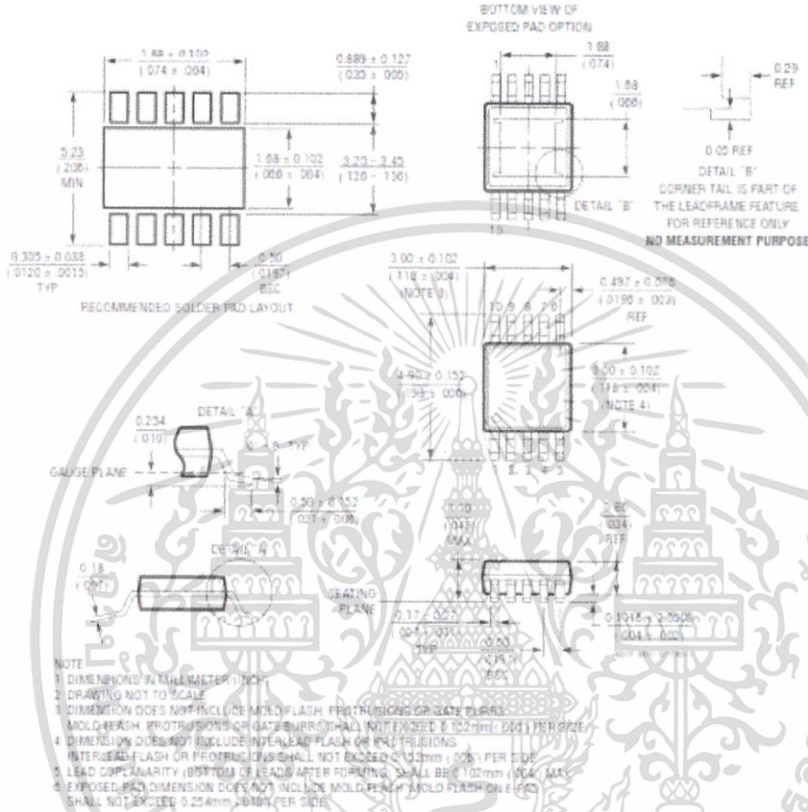


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

PACKAGE DESCRIPTION

MSE Package
10-Lead Plastic eMSOP Exposed Die Pad
 (Reference LTC DWG # 05-08-1664 Rev E)



35881b

REVISION HISTORY

REV	DATE	DESCRIPTION	PAGE NUMBER
A	9/10	Updated/added part number on the Piezoelectric Transducer on the front and back page applications, and Figures 5, 6 and 7	1, 12, 13, 14, 20
		Updated Temperature Range in Order Information	2
		Changed $T_J = 25^\circ\text{C}$ to $T_A = 25^\circ\text{C}$ and I_{LOAD} to I_{BUCK} in Electrical Characteristics	3
		Updated Notes 2, 3 and 4	4
		Updated G21 in Typical Performance Characteristics	6
		Added Figure 13	16
		Updated Related Parts	20

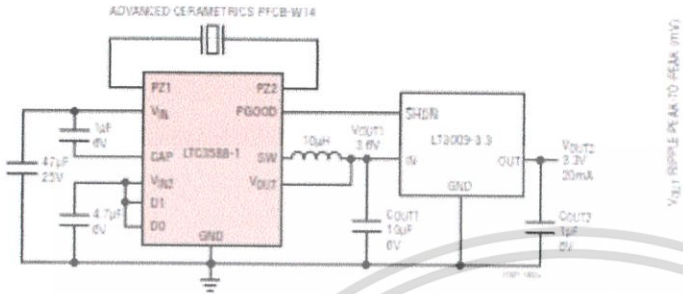
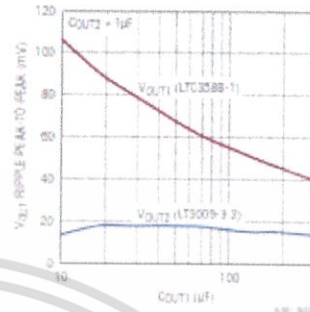


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

TYPICAL APPLICATION

Piezoelectric 3.3V Power Supply with LDO Post Regulator for Reduced Output Ripple

Peak-to-Peak Output Ripple vs C_{OUT1} 

RELATED PARTS

PART NUMBER	DESCRIPTION	COMMENTS
LT1389	Nanopower Precision Shunt Voltage Reference	800nA Operating Current, 1.25V/2.5V/4.095V
LTC1540	Nanopower Comparator with Reference	0.3pA I_{DD} , Drives 0.01pF, Adjustable Hysteresis, 2V to 11V Input Range
LT3009	3µA I_{DD} , 20mA Low-Dropout Linear Regulator	Low 3µA I_{DD} , 1.5V to 20V Range, 20mA Output Current
LTC3388-1/ LTC3388-3	20V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator	80nA I_{DD} in Sleep, 2.7V to 20V Input, V_{OUT} : 1.2V to 5.0V, Enable and Standby Pins
LTC3588-2	Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply	>10A I_{IN} Regulation, UVLO Rising = 16V, UVLO Falling = 14V, V_{OUT} : 3.45V, 4.1V, 4.5V, 5.0V
LT3652	Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power	MPPPT for Solar, 0.05V to 32V, Up to 2A Charge Current
LT3970	40V, 350mA Step-Down Regulator with 2.5µA I_{DD}	Integrated Boost and Catch Diodes, 4.2V to 40V Operating Range
LT3971	38V, 1.2A, 2MHz Step-Down Regulator with 2.6µA I_{DD}	4.5V to 38V Operating Range, Low Ripple Burst Mode™ Operation
LT3991	55V, 1.2A 2MHz Step-Down Regulator with 2.8µA I_{DD}	4.5V to 55V Operating Range, Low Ripple Burst Mode Operation
LTC3631	45V, 100mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12µA I_{DD}	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V
LTC3642	45V, 50mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12µA I_{DD}	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V

35881Ba

20 Linear Technology Corporation
1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035-7417
(408) 432-1900 • FAX: (408) 432-0507 • www.linear.com

LT 0910 REV. A • PRINTED IN USA



© LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2012 International Conference on Engineering,
Applied Sciences, and Technology
(ICEAST 2012)

November 21-24, 2012

Swissôtel Le Concorde, Bangkok, Thailand

Energy Harvesting Using an Impact Type Piezoelectric Energy
Harvester

pp. 344-347.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Energy Harvesting Using an Impact Type Piezoelectric Energy Harvester

D. Isarakorn, S. Nundrakwang, T. Sudhawiyangkul, B. Suksai, and C. Jongsintawee

Department of Instrumentation and Control Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
E-mail: kidon@kmitl.ac.th

Abstract—This paper presents energy harvesting using an impact type piezoelectric energy harvester to capture waste energy from machine vibrations and convert them into usable electrical energy for low power electronic devices. In this work, the concept of impact energy harvesting is proposed by utilizing a piezo buzzer as a power generator. Its electrical characteristics are evaluated when subjected to impact forces in order to examine the harvestable energy performance. Afterward, the power management circuit is investigated, which is one specific need to realize fully-functional energy harvesting systems.

Keywords; energy harvesting, piezo buzzer, impact type generator, power management circuit

I. INTRODUCTION

In past decades, the attention for energy harvesting from environment has grown continuously because it can provide infinite amount of energy without obligation. The available primary energy sources that can be harvested are solar energy, thermal, kinetic and vibration [1-5]. However, the energy harvested from vibration can provide most advantages for industries because most operating machines vibrate with a wide range of frequencies [6]. There are three types of transduction methods for harvesting vibration energy; electromagnetic [7], electrostatic [8], and piezoelectric [9] conversions. The piezoelectric transduction is the most interesting method due to its conversion efficiency with simple structure and mass manufacturability [10, 11].

Several piezoelectric energy harvesters have been proposed and investigated over the years. Most previous research focuses on resonant type energy harvesting systems. These types of harvesters need to be excited close to their resonant frequencies in order to achieve the maximum power generation. As a result, the resonant type

energy harvesters need to be tuned to match their resonant frequencies with the machine vibrations. Alternatively, the development of piezoelectric energy harvesters that can harvest the vibration energy irrespective to resonant frequency of the machine would be a promising solution.

This paper aims at the development of an impact type piezoelectric energy harvester in which a mechanism is coupled to the piezoelectric transducer. In such configuration, the mechanical impact is applied by direct contact on the piezoelectric transducer. The electrical energy can be generated through the impact on the piezoelectric bending structure. Different aspects related to harvesting concept, impact type piezoelectric energy harvester, principle of operation, energy management circuit, and application are addressed.

II. HARVESTING CONCEPT AND DESIGN

The concept of the proposed energy harvester in this work is illustrated in Fig. 1. The system consists of two major parts: an impact part connected to base of the machine and a base part carrying a piezo transducer. The piezoelectric transducer, which is a piezo buzzer in our case, is coupled to the impact element. The piezo buzzer is supported around its outer edge by making a hole on the base part, which allows a uniform curvature of the piezo buzzer under a central impact and thus a better uniformity of the mechanical stress in the piezoelectric material.

Based on the energy harvesting concept, a prototype of impact type piezoelectric energy harvester was realized as shown in Fig. 2. It has approximate dimensions of 6.6 cm (diameter) and 2.3 cm (thickness). The device was made by acrylic plastic. In this work, a circular piezo buzzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(MCFT-36T-2.6A1-139) from Muticomp was chosen as a piezoelectric generator because of its cost effectiveness and high endurance.

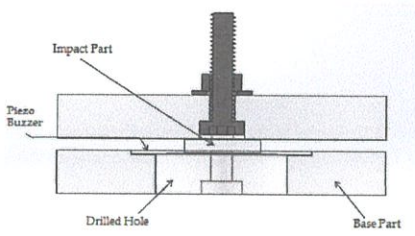


Figure 1. Schematic of the concept for proposed energy harvesting system.

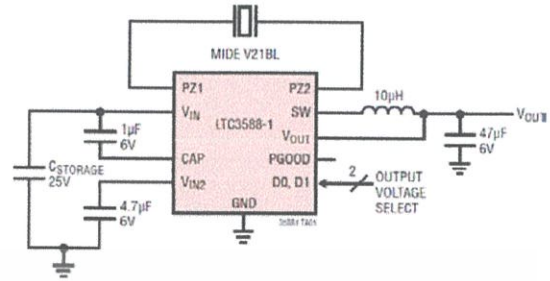


Figure 3. Integrated circuit (LTC3588-1) diagram [12].

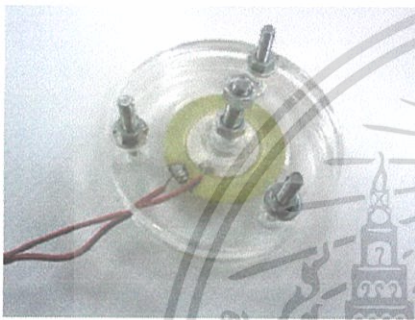


Figure 2. Photograph of the prototype of impact type piezoelectric energy harvester.

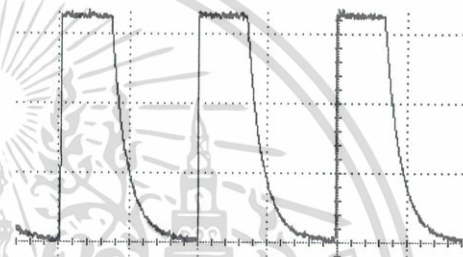


Figure 4. Typical output DC pulse from the LTC3588-1.

III. ENERGY MANAGEMENT CIRCUIT

When the machine starts operating, the piezo buzzer is set into motion by the impact force caused by machine vibrations. The impact energy is then converted to electric energy through piezoelectric effect. The piezo buzzer produces an AC voltage under vibration, which needs to be rectified and regulated by an energy management circuit. Its purpose is to convert the AC voltage from the piezo buzzer to usable DC voltage for electronic devices. In this work, the piezoelectric energy harvesting power supply LTC3588-1 from Linear Technology was used. The LTC3588-1 shown in Fig. 3 contains a low loss full wave bridge rectifier and a high efficiency synchronous buck converter, which transfer energy from an input storage device to an output at a regulated voltage capable of supporting loads up to 100 mA.

IV. EXPERIMENTAL DETAILS

The proposed system was evaluated by using a mini air compressor OL-1204 (Fig.5) as an easy-to-use machine. It has approximate dimension of 23 cm (W) by 24 cm (L) by 32 cm (H) and has a weight about 8 kg. The impact type piezoelectric energy harvester was mounted under one of the leg of the compressor as shown in Fig. 6. The vibration of the compressor was measured by using the EI-Calc vibration analyzer at the base of the compressor. The piezo buzzer was connected to the LTC3588-1, whose output was recorded by using the Rigol DS1102E digital oscilloscope.

The LTC3588-1 takes in the AC voltage from the piezo buzzer, rectifies and produces DC pulses that charge a storage capacitor. Any stored charge in the capacitor is then discharged through the buck converter, which converts the stored energy into a regulated DC voltage pulse. Four output voltages,

1.8V, 2.5V, 3.3V and 3.6V are selectable depend on applications. Fig. 4 illustrates a typical DC pulse that was rectified from the AC voltage signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figure 5. Mini air compressors OL-1204.

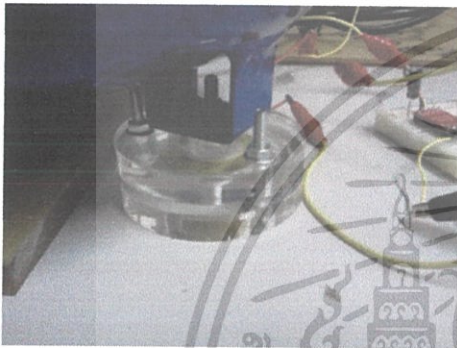


Figure 6. The proposed system mounts to one of the base of machine.

V. RESULTS AND DISCUSSION

The vibration data from the operating compressor is illustrated in Fig. 8 and Fig. 9. Fig. 8 presents the acceleration versus time and Fig. 9 shows the acceleration versus frequency. It can be seen that the vibration data composes of different frequencies. The dominant acceleration peaks appear above 3 kHz. However, our proposed system can harvest energy at a frequency far below its mechanical resonance. The output voltage of the piezo buzzer induced by the compressor vibrations is shown in Fig. 10. The peak-to-peak voltage is around 20V. However, the offset voltage of 5V was observed. This could be due to the unequal bending in vertical axis of piezo buzzer when receiving the impact force from the compressor vibrations.

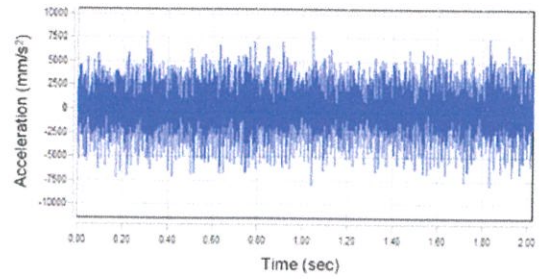


Figure 8. Acceleration profile of compressor.

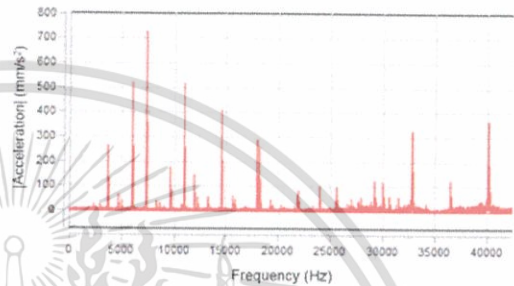


Figure 9. Fast Fourier Transform (FFT) of the compressor vibrations.

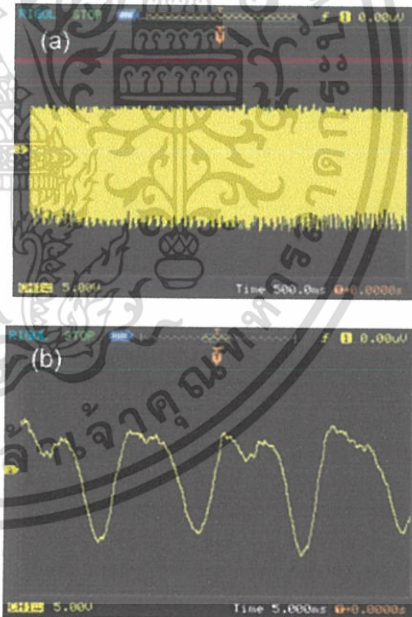


Figure 10. (a) Voltage response of piezo buzzer. (b) The magnification of the voltage response.

The piezoelectric energy harvester was then connected to the LTC3588-1 with the stored capacitor of 47 μF . Fig. 11 shows the regulated 3.3V DC pulses measured across a load resistor of 10 k Ω . As shown in Fig. 11(a), the charging interval for powering the 10 k Ω load resistor was 3.6 sec. The power was supplied to the load resistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

for 200 msec, which represents the operation interval (Fig. 11(b)).

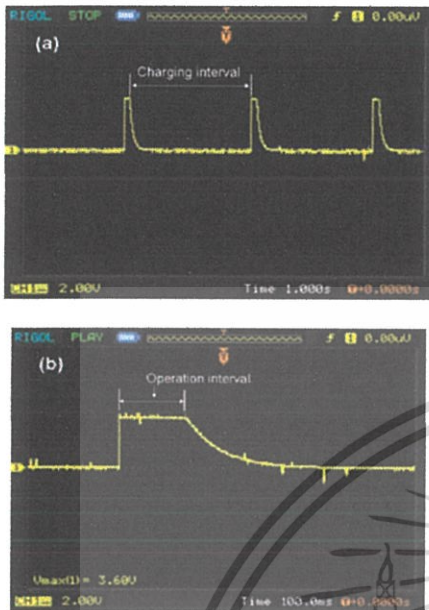


Figure 11. The operation of the LTC3588-1 incorporating with the impact type piezoelectric energy harvester: (a) charging interval and (b) operation interval.

The stored capacitor should be selected based on the energy needs and load requirements of the application. Fig. 12 presents the effect of the different stored capacitors and the load resistors to the operation of the energy harvesting system. As expected, when the size of stored capacitor increased, the charging interval also increased, while the load resistor had no significantly effect as shown in Fig. 12(a). However, when the load resistor decreased, the operation interval also decreased as shown in Fig. 12(b). It can be concluded that the intervals depend on the load current and the size of the stored capacitor. The stored capacitor should be sized to store enough energy to provide output power for the length of time required.

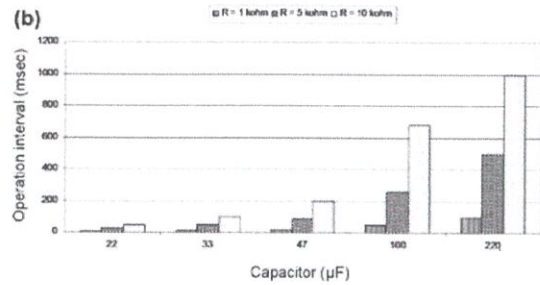
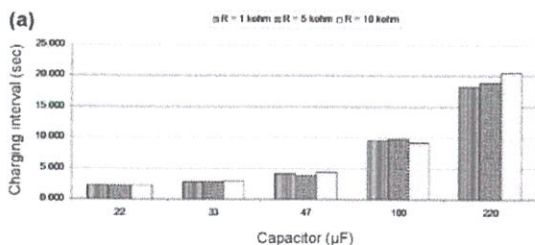


Figure 12. Effect of the different stored capacitors and the load resistors to the operation of the energy harvesting system.

VI. CONCLUSIONS

The concept of impact energy harvesting using piezoelectric transducer was presented in this paper. The prototype of impact type piezoelectric energy harvester was realized using the piezo buzzer as a power generator. The proposed system was evaluated by using a compressor as an easy-to-use machine. The peak-to-peak voltage of 20V was obtained under compressor vibrations. The energy management circuit using the LTC3588-1 was also investigated. The results reveal the potential of the presented harvester concept for powering commercial electronic devices with low-voltage and low-power capabilities.

REFERENCE

- [1] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, and S. Roy, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 17, pp. 1257-1265, 2007.
- [2] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2641-2654, 2011.
- [3] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystem applications," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. R175-R195, 2006.
- [4] S. R. Anton and H. A. Sodano, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. R1-R21, 2007.
- [5] R. J. M. Vullers, R. Van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting," *Solid-state Electron.*, vol. 53, pp.684-693, 2009.
- [6] E. K. Reilly, L. M. Miller, R. Fain, and P. Wright, "A study of ambient vibrations for piezoelectric energy conversion," *PowerMEMS 2009*, pp. 312-315, Washington DC, USA, December 1-4, 2009.
- [7] P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems," *Sens. Actuators, A*, vol. 110, pp. 344-349, 2004.
- [8] F. Peano and T. Tambosso, "Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 14, pp. 435-529, 2005
- [9] D. Shen, S. -Y. Choe, and D. -J. Kim, "Analysis of piezoelectric materials for energy harvesting devices under high-g vibrations," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 6755-6760, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart. Mater. Struct.*, vol. 13, pp. 1131-1142, 2004.
- [11] P. Murali, R. G. Polcawich, and S. Trolier-McKinstry, "Piezoelectric thin films for sensors, actuators, and energy harvesting," *MRS bull.* vol.35, pp. 658-664, 2009.
- [12] LTC3588-1 datasheet.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเพื่อติดตาม
สภาพเครื่องจักร

Piezoelectric Energy Harvesting for Machine Condition Monitoring
อยู่ในขั้นตอนการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร

Piezoelectric Energy Harvesting for Machine Condition Monitoring

ดอน อิศรากร*, สองเมือง นันทขว้าง, ฐานันท์ สุรวีวิยากร, บุลพร สุกใส และ เฉลิมชัย จงสินทวี

สาขาวิศวกรรมการวัดและการควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ผู้ติดต่อ: kidon@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในแต่ละวันโรงงานอุตสาหกรรมต้องใช้เครื่องจักรจำนวนมากอย่างต่อเนื่องในการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้จำนวนที่น่าพึงพอใจจึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดปกติกับเครื่องจักรขณะทำงานได้ บทความนี้จึงนำเสนอการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรมาใช้ติดตามสภาพของเครื่องจักรและนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ไปทดแทนพลังงานที่โดยทั่วไปแล้วจะใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอกเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร โดยการเก็บเกี่ยวพลังงานจะใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานเพียโซอิเล็กทริกที่มีคุณสมบัติแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มาใช้งานแทนหน่วยผลิตไฟฟ้า

ในการทดสอบจะนำพลังงานที่เก็บได้ไปแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้แล้วนำไปติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยการวัดอุณหภูมิ ทำการทดสอบตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการนำพลังงานไปใช้ หลังจากนั้นจึงวัดอุณหภูมิเครื่องจักรด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิอินฟราเรด และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับการวัดอุณหภูมิโดยใช้พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้

คำหลัก: การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือน, เพียโซอิเล็กทริก, หน่วยผลิตไฟฟ้า, การติดตามสภาพเครื่องจักร

Abstract

This research proposed a study of energy harvesting for machine condition monitoring by using electric energy from machine vibration with the piezoelectric effect. The study focused on capture waste energy from machine vibration, utilizing a piezo buzzer as a power generator, and converts them into usable electrical energy for machine condition monitoring. The stored energy could replace external power supply, which nowadays most machine condition monitoring applied. The experimental are about using the stored energy to drive electronics devices for temperature monitoring and compare the results with using an infrared thermometer.

Keywords: energy harvesting, piezo buzzer, impact type generator, power management circuit

1. บทนำ

เมื่อไม่นานนี้หลังจากเกิดวิกฤติการณ์ราคาพลังงานดิบตัวพุ่งขึ้นสูง โดยเฉพาะพลังงานจากฟอสซิลที่เป็นพลังงานสิ้นเปลืองใช้แล้วหมดไป ความสนใจในการเก็บพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่เป็นพลังงานสะอาดก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่ดีในการลงทุนระยะยาว เพราะพลังงานสะอาดนี้ไม่มีวันหมดเหมือนพลังงานสิ้นเปลือง ปัจจุบันนี้ก็สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมได้จากหลากหลายแหล่ง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อน พลังงานจลน์ และแรงสั่นสะเทือน [1-5] เมื่อเทียบในแต่ละแหล่งพลังงาน

แล้วการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนนั้นน่าจะเอื้อประโยชน์สูงสุดให้แก่อุตสาหกรรม เนื่องจากขณะที่เครื่องจักรภายในโรงงานทำงานจะเกิดแรงสั่นสะเทือนซึ่งเป็นพลังงานสูญเสียในรูปแบบหนึ่งขึ้น ซึ่งความถี่ในการสั่นนั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละเครื่องจักร [6] วิธีในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสามแบบ คือ เก็บพลังงานโดยใช้หลักการสนามแม่เหล็ก [7] เก็บพลังงานโดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิต [8] และเก็บพลังงานโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก [9] ในการเก็บเกี่ยวพลังงานทั้งสามอย่างนั้นการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกนั้นเป็นวิธีการที่น่าสนใจที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

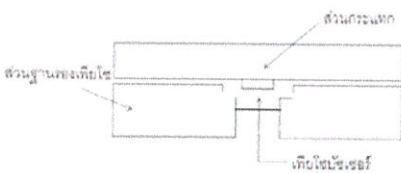
เพราะมีประสิทธิภาพ ได้ความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด ใช้งานง่าย และเหมาะแก่การผลิตเป็นจำนวนมาก [10,11]

ที่ผ่านมาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นมาหลายแบบ งานวิจัยส่วนมากจะเน้นไปพัฒนาระบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบอาศัยหลักการสั่นพ้อง โดยที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบอาศัยหลักการสั่นพ้องนี้จะต้องอาศัยการปรับแต่งความถี่ให้ใกล้เคียงหรือให้เท่ากับความถี่ธรรมชาติของการสั่นนั้นๆ เพื่อจะดึงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ออกมาให้มากที่สุด ปัญหาที่ยากจึงตามมา คือ ต้องทำการปรับความถี่ทุกครั้งหากเปลี่ยนเครื่องจักรตัวใหม่ เพราะเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีความถี่ในการสั่นไม่เท่ากัน แต่ในทางกลับกันหากสามารถพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกที่ไม่ต้องคำนึงถึงความถี่สั่นพ้องของเครื่องจักรได้ จะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่อาศัยหลักการสั่นพ้องได้

ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร โดยตัวอุปกรณ์สามารถผลิตพลังงานได้ด้วยตนเอง จากการแปลงแรงสั่นสะเทือนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเพียโซบัสเซอร์(วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทรงกลมสำหรับรองรับแรงกระแทก)แปลงพลังงานด้วยวงจรจัดการพลังงาน เก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุ และจ่ายพลังงานไปที่อุปกรณ์ติดตามสภาพเครื่องจักรให้ทำงาน

2. แนวคิดและการออกแบบอุปกรณ์เก็บพลังงาน

ในการพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกโดยการใช้เพียโซบัสเซอร์มารับแรงกระแทกจากเครื่องจักรแทนการใช้ความถี่สั่นพ้อง ได้ทำการออกแบบโครงสร้างดังรูปที่ 1

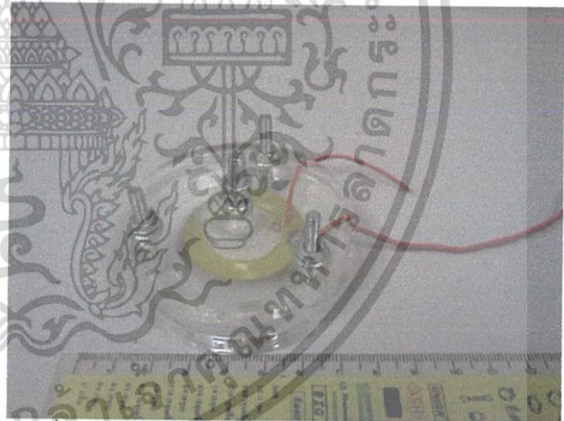


รูปที่ 1 แบบร่างอุปกรณ์เก็บพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบรับแรงกระแทก

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าโครงสร้างประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนกระแทกซึ่งติดตั้งไว้กับฐานของเครื่องจักร และส่วนฐานสำหรับวางอุปกรณ์แปลง

พลังงานเพียโซอิเล็กทริกซึ่งในบทความนี้คือตัวเพียโซบัสเซอร์ไว้รับแรงกระแทกจากส่วนกระแทก โดยจะทำการเจาะส่วนฐานวางให้มีความลึกและรัศมีเท่ากับขนาดตัวเพียโซบัสเซอร์และใต้ตัวเพียโซบัสเซอร์นั้นจะทำการเจาะให้เป็นหลุมกลวงลึกลงไปเพื่อเป็นการทำให้เพียโซบัสเซอร์ไม่เคลื่อนที่ในระหว่างกำลังทำงานและทำให้ตัวเพียโซบัสเซอร์เกิดการโก่งตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้วยังทำให้เพียโซบัสเซอร์เกิดความเค้นมากขึ้นเนื่องจากการโก่งตัวที่มากขึ้นเพราะช่องว่างด้านล่างที่เจาะเป็นหลุมกลวงลึกได้ตัวเพียโซบัสเซอร์

จากการออกแบบข้างต้นทำให้ได้โครงสร้างต้นแบบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบรับแรงกระแทกดังแสดงใน รูปที่ 2 จากรูปตัวต้นแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.6 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 2.3 เซนติเมตร วัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ คือ พลาสติกอะคริลิก และทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้เพียโซบัสเซอร์แบบกลม รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139 จาก บริษัท Muticom ซึ่งมีความถี่สั่นพ้องเฉพาะตัวอยู่ที่ประมาณ 2.6 kHz



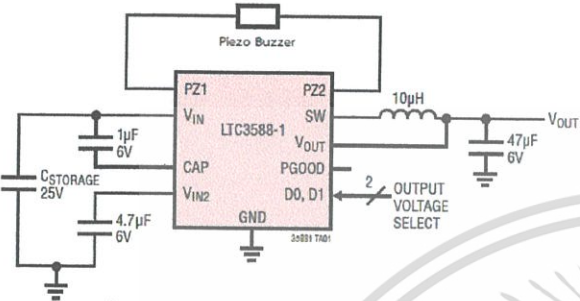
รูปที่ 2 ต้นแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบรับแรงกระแทก

3. วงจรจัดการพลังงาน

เมื่อเครื่องจักรทำงาน เครื่องจักรจะเกิดแรงสั่นสะเทือนไปยังฐานที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เพียโซบัสเซอร์จะได้รับแรงกระแทกจากแรงสั่นสะเทือนของเครื่องจักร และแปลงแรงกระแทกที่ได้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับไม่คงที่ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นจึงทำการแปลงพลังงานไฟฟ้าด้วยวงจรจัดการพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียก่อน เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกนี้เลือกใช้วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 จากบริษัท Linear Technology ในการทดสอบ โดยวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 มีวงจรดังแสดงใน รูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 [12]

จากรูปที่ 3 ภายในตัววงจรจัดการพลังงานประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบสูญเสียพลังงานต่ำและวงจรทอนระดับแรงดันประสิทธิภาพสูงทำงานควบคู่กันไป โดยจะทำการปรับระดับแรงดันที่ขาออกตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการและจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 100 มิลลิแอมป์

วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 รับไฟฟ้ากระแสสลับที่ส่งมาจากตัวเพียโซโซลาร์แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจึงนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไปเก็บสะสมไว้ที่ตัวเก็บประจุ เมื่อตัวเก็บประจุสะสมพลังงานได้เพียงพอในระดับหนึ่งแล้วจะทำการปล่อยประจุที่สะสมไว้ไปยังวงจรทอนระดับ เพื่อให้วงจรทอนระดับปรับระดับแรงดันให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยจะสามารถเลือกแรงดันที่ขาออกได้ทั้งสิ้น 4 ค่า คือ 1.8 โวลต์, 2.5 โวลต์, 3.3 โวลต์ และ 3.6 โวลต์ แล้วแต่ความต้องการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาต่อพ่วง

รูปที่ 4 แสดงรูปตัวอย่างของลูกคลื่นที่ออกมาจากขาออกของวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 หลังจากที่ ได้รับไฟฟ้ากระแสสลับที่อินพุต และผ่านตัววงจรจัดการพลังงานแล้ว



รูปที่ 4 ตัวอย่างไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากรวมวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนทดสอบการเก็บพลังงานจากเครื่องจักร และส่วนทดสอบการนำพลังงานที่เก็บมาใช้งานโดยการนำไปใช้ติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยการตรวจวัดอุณหภูมิเครื่องจักรที่ทำการเก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งจะกล่าวข้อมูลและรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ทดสอบการเก็บพลังงานจากเครื่องจักร

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปั๊มลมขนาดเล็ก รุ่น OL-1204 ดังรูปที่ 5 เป็นเครื่องจักรในการทดสอบ โดยปั๊มลมมีขนาดโดยประมาณดังนี้ กว้าง 23 เซนติเมตร ยาว 24 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 8 กิโลกรัม และมอเตอร์ที่ใช้มีความเร็วรอบประมาณ 3600 รอบต่อนาที

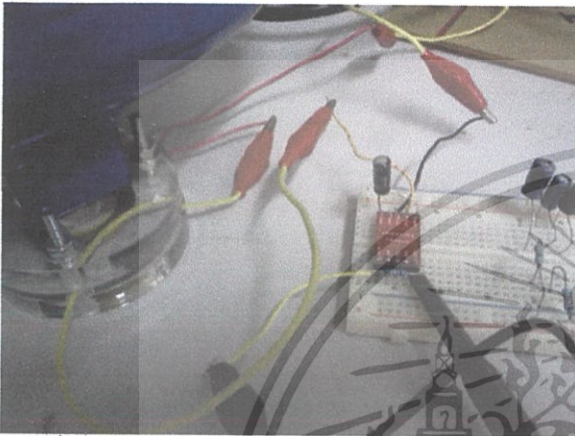


รูปที่ 5 ปั๊มลมขนาดเล็ก รุ่น OL-1204

ทำการติดตั้งตัวเพียโซอิเล็กทริกแบบรับแรงกระแทกไว้ใต้ฐานด้านหนึ่งของปั๊มลมดังแสดงใน รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากปัมลมทำการวัดด้วยเครื่องวัดความเร่งจากบริษัท EI-Calc ที่ฐานของเครื่องจักร หลังจากนั้นทำการต่ออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบเข้ากับวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 และทำการบันทึกค่าที่ขาออกของวงจรจัดการพลังงานโดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลจากบริษัท Rigol รุ่น DS1102E ในการบันทึกค่า



รูปที่ 6 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต้นแบบที่ฐานเครื่องจักร

4.2 ทดสอบการนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาใช้

หลังจากที่ได้ทดสอบเก็บพลังงานไปแล้วขั้นตอนถัดมาจะทำการทดสอบการนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาใช้ในการติดตามสภาพเครื่องจักรด้วยการตรวจวัดอุณหภูมิเครื่องจักร และส่งค่าอุณหภูมิที่ได้ผ่านการส่งสัญญาณไร้สาย ทำให้สามารถแบ่งระบบเป็น 2 ส่วน คือ ฝั่งส่งค่าและฝั่งรับค่าโดยแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 7

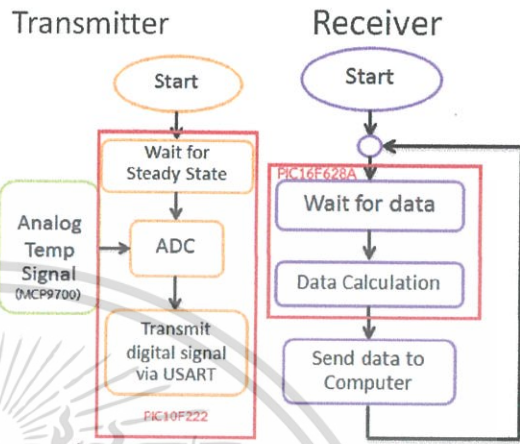
ฝั่งส่งค่า พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จะถูกนำมาใช้เพื่อให้พลังงานกับวงจรในฝั่งนี้ โดยใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700 เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเครื่องจักร ข้อมูลที่ได้มาจะเป็นข้อมูลอนาล็อกจากนั้นแปลงข้อมูลอนาล็อกที่วัดได้เป็นดิจิตอลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC10F222 แล้วส่งผ่านค่าดิจิตอลที่ได้ด้วยตัวส่งสัญญาณ AM-RT4 เพื่อส่งผ่านค่าที่ได้ไปยังฝั่งรับค่า เหตุผลที่เลือกใช้อุปกรณ์ดังกล่าวมาจากว่าอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำและมีขนาดเล็กเหมาะกับการนำมาใช้กับพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้

ฝั่งรับค่า ใช้ตัวรับสัญญาณ AM-HRR30 แล้วจึงส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F628A เพื่อคำนวณและตัดข้อมูลที่ไมต้องการออก ก่อนจะส่งค่าไปยังส่วนแสดงผล เพื่อให้ส่วนแสดงผลแสดงอุณหภูมิที่วัดได้ออกมาเป็นตัวเลข และนอกจากนี้ยังใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนเวสาหรับการเ้างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

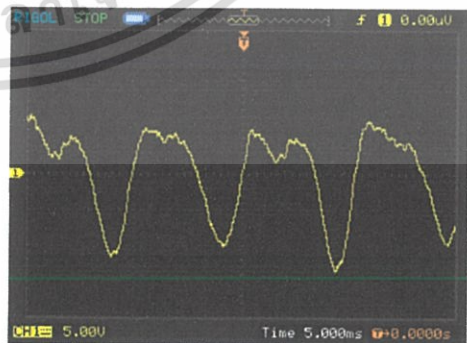
แบบอินฟราเรดรุ่น GM300 วัดค่าอุณหภูมิของเครื่องจักร ในขณะที่เดียวกันไปด้วยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการใช้พลังงานที่เก็บเกี่ยวจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานระบบติดตามอุณหภูมิ

5. ผลการทดลองและอภิปราย

ในส่วนของการทดสอบการเก็บพลังงานจากเครื่องจักรนั้น จะสามารถเก็บข้อมูลแรงสั่นสะเทือนเมื่อเครื่องจักรขณะทำงาน[13] โดยได้ค่าความถี่สั่นพ้องแรกจะอยู่ที่ความถี่ 3 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่ามากกว่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซโซเซอเรที่นำมาใช้มากแต่ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงกระแทกสามารถทำงานได้โดยไม่มีค่านึงถึงความถี่สั่นพ้องจึงไม่เป็นอุปสรรคในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเครื่องจักร แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากเพียโซโซเซอเรที่เกิดขึ้นจากแรงสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ภาพแรงดันไฟฟ้าจากเพียโซโซเซอเร

สังเกตว่าได้แรงดันไฟฟ้าจากจุดยอดถึงจุดยอดอยู่ที่ประมาณ 20 โวลต์แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านบวกรมีค่าน้อยกว่าด้านลบประมาณ 5 โวลต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนเวสาหรับการเ้างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งของเพียโซบัสเซอร์ในแกนแนวตั้งที่ไม่เท่ากันเนื่องจากน้ำหนักของเครื่องจักรที่ถูกกดลงบนเพียโซบัสเซอร์ เมื่อนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกต่อเข้ากับวงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 ตัวเก็บประจุที่ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับกระแสและระยะเวลาที่ภาระต้องการใช้พลังงานดังแสดงในตารางที่ 1

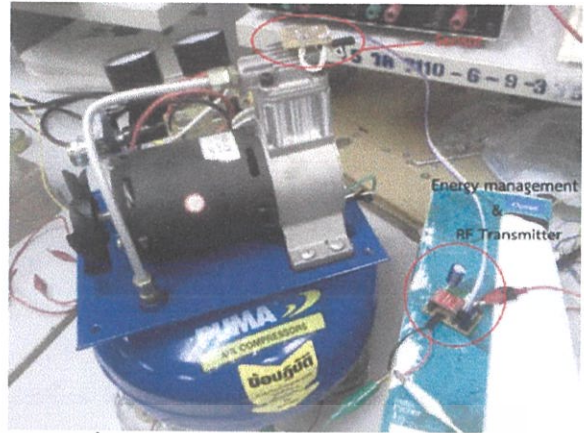
Capacitor Size (μF)	Operated Time (ms)		
	I = 3.3 mA	I = 0.66 mA	I = 0.33 mA
22	5	25	50
33	11	50	100
47	16	90	200
100	50	260	680
220	100	500	1000

ตารางที่ 1 แสดงถึงผลเมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและกระแสที่ภาระต้องการของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน

จากตารางที่ 1 จะพบว่าหากเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุในขณะที่กระแสที่ภาระต้องการคงที่จะทำให้ระยะเวลาการทำงานเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันหากภาระต้องการกระแสมากขึ้นในขณะที่ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาดเท่าเดิมจะทำให้ระยะเวลาในการทำงานลดลง ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับพลังงานที่ต้องการเพื่อให้ได้ช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมกับระบบหรืออุปกรณ์นั้นๆต้องการ

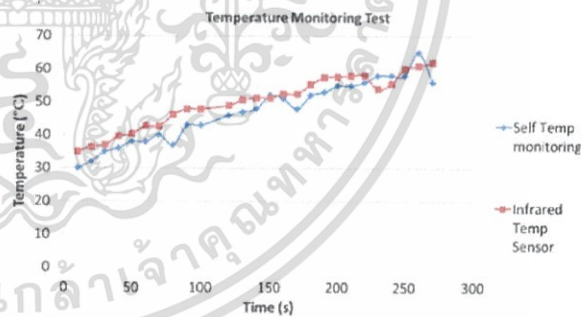
ส่วนของการทดสอบการนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาใช้ในการวัดอุณหภูมิของเครื่องจักรนั้น ในการทดลองได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 220 ไมโครฟารัด เนื่องจากระบบที่นำมาใช้นั้นต้องการกระแสประมาณ 5 มิลลิแอมป์ ซึ่งการนำตัวเก็บประจุขนาด 220 ไมโครฟารัดมานั้นจะทำให้ช่วงเวลาการทำงานมีค่าประมาณ 60 มิลลิวินาทีซึ่งหากน้อยกว่านี้จะไม่เพียงพอต่อระบบที่ต้องวัดอุณหภูมิและส่งค่าที่วัดได้ออกไป

ในการทดลองจะทำการติดตามวัดค่าอุณหภูมิของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยได้นำเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MCP9700 ไปวางไว้บนคอมพิวเตอร์เพื่อวัดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำงานดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงถึงระบบวัดอุณหภูมิของเครื่องจักร

เมื่อนำค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด มาเปรียบเทียบกับระบบตรวจติดตามอุณหภูมิที่ทำขึ้นดังรูปที่ 10 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ได้มีค่าความชันที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความคลาดเคลื่อนโดยที่ค่าที่วัดได้จากระบบที่ทำขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด เนื่องจากการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิติดตั้งโดยเพียงแค่วางไว้บนคอมพิวเตอร์ไม่ได้ติดตั้งด้วยซิลิโคนหรือกาวที่นำความร้อนได้ดีมีผลกับการถ่ายเทความร้อนจากคอมพิวเตอร์ไปยังเซ็นเซอร์และทำให้วัดอุณหภูมิได้น้อยกว่าปรกติ



รูปที่ 10 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์ติดตามสภาพอากาศเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

6. สรุปผลการทดลอง

แนวคิดเรื่องอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบรับแรงกระทำโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกในการแปลงพลังงานที่ได้ นำเสนอในบทความนี้ ตัวต้นแบบของตัวอุปกรณ์ใช้เพียโซบัสเซอร์เป็นตัวผลิตไฟฟ้า เลือกใช้เครื่องจักรที่มีการทำงานไม่ซับซ้อน จากแรงสั่นสะเทือนเมื่อเครื่องจักรทำงานได้แรงดันไฟฟ้าจากยออดถึงยออดที่ 20 โวลต์ ใช้วงจรจัดการพลังงาน LTC3588-1 เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเก็บสะสมก่อนนำไปใช้ในการทดสอบการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตในการค้าไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาวัดอุณหภูมิของเครื่องจักร โดยอุปกรณ์ที่เลือกมาเลือกใช้อุปกรณ์ที่การทำงานไม่ซับซ้อนมากนัก ราคาข้อมเยา ขนาดเล็กและใช้พลังงานต่ำ ซึ่งได้ผลจากการทดลองว่าอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถนำไปใช้ในการให้พลังงานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยตนเองเพื่อการตรวจสอบติดตามสภาพของเครื่องจักรได้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, and S. Roy, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 17, pp. 1257-1265, 2007.
- [2] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2641-2654, 2011.
- [3] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystem applications," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. R175-R195, 2006.
- [4] S. R. Anton and H. A. Sodano, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. R1-R21, 2007.
- [5] R. J. M. Vullers, R. Van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting," *Solid-state Electron.*, vol. 53, pp.684-693, 2009.
- [6] E. K. Reilly, L. M. Miller, R. Fain, and P. Wright, "A study of ambient vibrations for piezoelectric energy conversion," *PowerMEMS 2009*, pp. 312-315, Washington DC, USA, December 1-4, 2009.
- [7] P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems," *Sens. Actuators, A*, vol. 110, pp. 344-349, 2004.
- [8] F. Peano and T. Tambosso, "Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 14, pp. 435-529, 2005.
- [9] D. Shen, S. -Y. Choe, and D. -J. Kim, "Analysis of piezoelectric materials for energy harvesting devices under high-g vibrations," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 6755-6760, 2007.
- [10] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart. Mater. Struct.*, vol. 13, pp. 1131-1142, 2004.
- [11] P. Muralt, R. G. Polcawich, and S. Trolier-McKinstry, "Piezoelectric thin films for sensors, actuators, and energy harvesting," *MRS bull.* vol.35, pp. 658-664, 2009.
- [12] LTC3588-1 datasheet.
- [13] D. Isarakorn, S.Nundrakwang, T. Sudhawiyangkul, B. Suksai, and C. Jongsintawee "Energy Harvesting Using an Impact Type Piezoelectric Energy Harvester" *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology*, pp. 344-347, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล.....ดร.ดอน.อิศราวร.....

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด.....4 ธันวาคม 2520.....อายุ 35..... ปี

สถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D.	Microsystems and Microelectronics	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland	2011
M.Eng.	Control Engineering	KMITL	2003
B.Eng.	Electronics Engineering	KMITL	2000

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ..... Microsensors..... and..... microactuators..... Piezoelectric materials for sensing and actuating applications..... MEMS process development..... Energy harvesting systems..... PowerMEMS.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2013	Sci & Tech Initiative and Sustainability Awards (STISA 6 th)	The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry
2011	Good Ph.D. thesis award	Office of National Research Council of Thailand
2011	Prix de La Ville de La Chaux-de-Fonds 2011	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2006-2010	Thai Government Science and Technology Scholarship	Thai Government
2001-2003	Royal Thai Government Scholarship	Thai Government

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- **Don Isarakorn** (Principal investigator), Noppadol Maneerat and Bundit Pasaya, “Fundus Image Database System and Primary Diabetic Retinopathy Screening Software,” A New Researcher Scholarship of CSTC, MOST, 2012.
- **Don Isarakorn** (Principal investigator), Songmoung Nundrakwang, Noppadol Maneerat and Kasemsuk Sepsirisuk, “Design and Development of an Electric Stand-up Wheelchair,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.
- **Don Isarakorn** (Principal investigator) and Songmoung Nundrakwang, “Self-powered System for Machine Condition Monitoring Applications,” Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.

การเสนอผลงานวิชาการ

- **ดอน อิศรากร**, สองเมือง นันทขว้าง, ธัชพล สิลพิพัฒน์, ภาณุพงศ์ โลจวิธ, วัชรินทร์ กิจวิไลรัมย์ และทฤษฎ์ เอี่ยมประภากุล, “อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กส่วนจากการเคลื่อนที่ของมนุษย์,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 94-99, 2556
- **ดอน อิศรากร**, สองเมือง นันทขว้าง, ณัฐพล ทรณัฐพิภุต, วิรุฒ แซ่มซ้อย และสิรินาด มาวรณ, “การเก็บเกี่ยวพลังงานจากข้อต่อหัวเข่าโดยใช้ไฮดรอปอร์มอเตอร์,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 154-159, 2556
- **ดอน อิศรากร**, สองเมือง นันทขว้าง, ธนากร หมุ่มทอง, ธนาพร สิริโสภานทรณราย, พรสุดา พัศกร และวิรุฒม์ ยืนยง, “การเก็บเกี่ยวพลังงานจากกรณีเข่าข้อบึง,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 160-165, 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดอน อิศราวกร, สองเมือง นันทขว้าง, สุวณันท์ สุธาวิยางกูร, บุศพร สุโกส และเฉลิมชัย จงสินทวี, “การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการกระแทกโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 205-210, 2556
- ดอน อิศราวกร, สองเมือง นันทขว้าง, โกมล บัญญัติเลิศดาวร, กฤษณา ประภาณุกิต และวีณา จงเจริญกมล, “พื้นที่กำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 988-993, 2556
- ดอน อิศราวกร, สองเมือง นันทขว้าง, ธนพล บุญโชติ, บุศกร สีเหลืองเย็น และพงษ์ศร นุ่มทอง, “การออกแบบใบพัดเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 1000-1005, 2556
- ดอน อิศราวกร, สองเมือง นันทขว้าง, ณวันยุทธ แสนจิตร, วัชรพงศ์ เหมืองหม้อ และธงชัย ทองคำ, “การศึกษาระดับการสั่นของสะพานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเซนเซอร์,” การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 89-93, 2556

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

“Energy Scavenging from a Rotating Gear using an Impact Type Piezoelectric MEMS Scavenger”, International Patent: P2203PC00/ European Patent: N°EP 11168703.4

“Piezoelectric energy generating device from impact force”, Thai patent: Patent pending no. 1201006020

“Piezoelectric energy harvesting floor”, Thai patent: Patent pending no. 1201006021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล.....นายสองเมือง นันทขว้าง.....

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด.....อายุ.....ปี

สถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
M.Eng.	Control Engineering	KMITL	2005
B.Eng.	Control Engineering	KMITL	2003

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ Machine Design, Mechatronic System Modeling, Control Systems.....