

ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่ผลิตพลังงานตัวเองเพื่อวินิจฉัย
ความเสียหายของบอลสกรู

ENERGY AUTONOMOUS WIRELESS SENSOR SYSTEM FOR BALL SCREW
FAULT DIAGNOSIS

ธำปณันท์ สุธาวิยางกูร
THAPANUN SUDHAWIYANGKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-080-126

ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่ผลิตพลังงานได้เองเพื่อวินิจฉัย
ความเสียหายของบอลสกรู

ENERGY AUTONOMOUS WIRELESS SENSOR SYSTEM FOR BALL SCREW
FAULT DIAGNOSIS



ธำพนันท์ สุธาวิยางกูร

THAPANUN SUDHAWIYANGKUL

เลขที่ 138508
วันเดือนปี 8 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-080-126

ENERGY AUTONOMOUS WIRELESS SENSOR SYSTEM FOR BALL SCREW
FAULT DIAGNOSIS

THAPANUN SUDHAWIYANGKUL

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

KMITL-2015-EN-M-080-126

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่ผลิตพลังงานได้เองเพื่อวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู
Thesis Title Energy Autonomous Wireless Sensor System for Ball Screw Fault Diagnosis
นักศึกษา นายฐานันท์ สุธาวิยางกูร
รหัสประจำตัว 56601201
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ดอน อิศรากร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-080-126

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ถาวร	เบญจนาரசุทธิ	
รศ.ดร.ชนินทร์	บุญลักษณ์นาสุรณ์	
รศ.ดร.จงกล	งามวิวิทย์	
ผศ.ดร.นพดล	มณีรัตน์	
ผศ.ดร.ดอน	อิสรากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่ผลิตพลังงานตัวเองเพื่อวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู
นักศึกษา	นายฐาปนันท์ สุธาวิยางกูร
รหัสประจำตัว	56601201
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ดอน อิศรากร

บทคัดย่อ

ระบบติดตามสภาพของเครื่องจักรเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถใช้ในการวินิจฉัยความเสียหายของเครื่องจักร ซึ่งช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต รวมถึงการลดอันตราย และความสูญเสียที่อาจเกิดจากการทำงานที่บกพร่องของเครื่องจักรได้ เซ็นเซอร์ไรต์ในระบบติดตามสภาพเครื่องจักรได้ถูกพัฒนาให้เป็นแบบไร้สาย โดยใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ระบบมีความคล่องตัวสูง แต่อย่างไรก็ตามพลังงานที่มีอยู่ในแบตเตอรี่มีค่าจำกัด จึงมีความจำเป็นต้องชาร์จพลังงานเพิ่ม หรือเปลี่ยนแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งบางครั้งตำแหน่งที่ติดตั้งสามารถเข้าถึงได้ยาก การเปลี่ยนแบตเตอรี่จะส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลาเป็นอย่างมาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเสนอระบบผลิตพลังงานอัตโนมัติสำหรับเซ็นเซอร์ไรต์ เพื่อใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู ซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องจักร ระบบที่นำเสนอประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เซ็นเซอร์ไรต์ที่ใช้วัดความเร่งและวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนที่เชิงเส้น เพื่อนำเอาพลังงานดังกล่าวมาใช้กับเซ็นเซอร์ไรต์แทนแบตเตอรี่ ระบบที่ออกแบบขึ้นได้ถูกนำไปทดสอบใช้งานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิท (Singulation model : DFD6340) สำหรับตัดแผ่นเวเฟอร์ของ บริษัท ยูแทคไทย จำกัด เพื่อศึกษา คุณสมบัติทางไฟฟ้า ความสามารถในการส่งข้อมูล และวิธีการจัดการพลังงาน จากผลการศึกษาพบว่า ระบบที่ออกแบบ สามารถส่งข้อมูลความเร่งได้อย่างน้อย 1 ครั้ง ภายในเวลา 2 นาที และข้อมูลความเร่งดังกล่าวสามารถใช้จำแนกเครื่องตัดแบ่งยูนิทที่บอลสกรูมีรอยบิ่น ออกจากเครื่องตัดแบ่งยูนิทที่บอลสกรูอยู่ในสภาพดีได้

Thesis	Energy Autonomous Wireless Sensor System for Ball Screw Fault Diagnosis
Student	Mr. Thapanun Sudhawiyangkul
Student ID.	56601201
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Don Isarakorn

ABSTRACT

In industrial process, machine monitoring system is indispensable due to its ability to predict and prevent an endangering situation in the process. By utilizing a wireless sensor node with battery as power source, the monitoring system can be flexible and appropriate for harsh or inaccessible environment. However, when the battery reaches its life span and needs to be replaced or recharged, it would cause loss in time and resources. To overcome this issue, this research proposes an energy autonomous wireless sensor system for ball screw fault diagnosis. The proposed system is composed of vibration monitoring wireless sensor node and linear motion energy harvester. The energy scavenged from the harvester will serve as a power source for the sensor node instead of battery. The proposed system will then be tested with IC wafer singulation machines (Singulation model : DFD6340) to investigate electrical characteristic, data transmission and energy management of the proposed system. The experiment results show that the proposed system can transmit at least 1 vibration data per 2 minute and this data can be used to diagnosis the condition of the ball screw.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดอน อิศรากร อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา รวมถึงให้ความรู้ และประสบการณ์ระหว่างการศึกษาปริญญาโท ของข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ คำปรึกษา ชี้แนะ และช่วยในด้านการออกแบบโครงสร้างของระบบ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จจุล่ง ข้าพเจ้าซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้ให้ทุนในการวิจัยนี้ วิทยานิพนธ์นี้ จะไม่สามารถสำเร็จได้หากขาดทุนวิจัยดังกล่าว

ขอขอบคุณน้องนักศึกษาในระดับปริญญาโท และระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมการวัด และควบคุมที่ได้ช่วยเหลือ แนะนำแนวทาง และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้เสมอมา

ในท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณบิดาและมารดาของผู้เป็นที่รักของข้าพเจ้าได้เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และสนับสนุนส่งเสริมข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทนี้

ธูปนันท์ สุธาวิยางกูร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ภาพรวมของระบบติดตามสภาพเครื่องจักรแบบไร้สายและการเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	4
2.1 การวัดการสั่นสะเทือนเพื่อติดตามสภาพของเครื่องจักร.....	4
2.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	5
2.3 การเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	6
2.4 การนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด.....	8
บทที่ 3 การออกแบบและการทดสอบเซ็นเซอร์โหนดกับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน.....	10
3.1 เซ็นเซอร์โหนด.....	10
3.1.1 การเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของบอลสกรู.....	10
3.1.2 การออกแบบเซ็นเซอร์โหนด.....	15
3.1.3 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์โหนด.....	16
3.1.4 การจัดการข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด.....	17
3.1.5 การทดสอบหาความเข้มการส่งสัญญาณของเซ็นเซอร์โหนด.....	20
3.1.6 การทดสอบหาการใช้พลังงานของเซ็นเซอร์โหนด.....	20
3.2 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน.....	22
3.2.1 การออกแบบและภาพรวมอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน.....	22
3.2.2 การหาการวางตัวของขดลวดและแม่เหล็กที่เหมาะสม.....	23
3.2.3 การหาระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่เหมาะสม.....	27

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.4 การหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน.....	28
3.2.5 การทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิต.....	35
บทที่ 4 การจัดการพลังงานสำหรับเซ็นเซอร์โหนด.....	37
4.1 ระบบจัดการพลังงาน.....	37
4.2 การบริหารการทำงานของอุปกรณ์ในเซ็นเซอร์โหนด.....	39
4.3 การวิเคราะห์พลังงานในระบบ.....	40
บทที่ 5 ผลการทดสอบระบบ.....	45
5.1 ผลการวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขณะใช้งานกับเครื่องจักรจริง.....	45
5.2 ผลการทดลองวัดข้อมูล.....	46
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	61
ประวัตินักวิจัย.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของโพรโตคอลการส่งสัญญาณไร้สาย.....	6
2.2 ตารางเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานต่างๆ.....	7
3.1 อัตราการใช้กระแสของอุปกรณ์ต่างๆ ในเซ็นเซอร์โหนดที่แสดงในเดต้าชีท.....	21
3.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองการวางตัวของแม่เหล็ก.....	26
4.1 อัตรากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปกับอุปกรณ์ในระบบจากเดต้าชีท.....	41
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุกับพลังงานในตัวเก็บประจุ.....	42
4.3 ผลเปรียบเทียบค่าจากการทดลองและการคำนวณ.....	44

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	รูปถ่ายเครื่องจักรและชุดนำทางเชิงเส้นที่ทดลอง.....	2
2.1	สัญญาณการสั่นสะเทือนหลังผ่านการแปลงจากโดเมนเวลาไปยังโดเมนความถี่.....	4
2.2	ภาพถ่ายสภาพของบอลสกรูที่ถูกใช้งานเป็นเวลานานและเกิดการบิ่น ณ ตำแหน่งที่ลูกศรชี้.....	5
3.1	แผนผังระบบเซ็นเซอร์แบบผลิตพลังงานได้เองเพื่อใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู.....	10
3.2	โครงสร้างและส่วนประกอบของชุดนำทางเชิงเส้น.....	11
3.3	ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่ฐานแกนเลื่อนของชุดนำทางเชิงเส้น.....	11
3.4	ความเร่งของเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นและบอลสกรูสภาพปกติ.....	12
3.5	ผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่งขณะตัดชิ้นงาน 1 ครั้ง.....	12
3.6	ผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของสัญญาณความเร่งของเครื่องจักร.....	13
3.7	Spectrogram ที่ได้จากการสั่นสะเทือนของเครื่องหมายเลข 53.....	14
3.8	สัญญาณความเร่งและผลการแปลงฟูเรียร์เฉพาะช่วงเวลาการตัดชิ้นงานตามแนวยาว.....	14
3.9	ภาพถ่ายเซ็นเซอร์โหนดที่สร้างขึ้น.....	16
3.10	ภาพถ่ายตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์โหนด.....	16
3.11	ผลการวัดค่าความเร่งของบอลสกรูในชุดนำทางเชิงเส้น.....	16
3.12	การเปรียบเทียบผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว.....	17
3.13	ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด.....	17
3.14	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	18
3.15	ผลการนำข้อมูลความเร่งมากรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านในโดเมนเวลา.....	18
3.16	ผลการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังกรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านในโดเมนความถี่.....	19
3.17	ผลการวัดข้อมูลจากเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นและเครื่องที่บอลสกรูปกติ.....	19
3.18	ค่าความเข้มของสัญญาณเทียบกับระยะทาง.....	20
3.19	การทดสอบหาค่าแอมพลิจูดของเซ็นเซอร์โหนด.....	21
3.20	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน.....	23
3.21	ลักษณะการวางตัวของขดลวดและแม่เหล็ก.....	24
3.22	ลักษณะการวางตัวของแม่เหล็กทั้ง 3 รูปแบบ.....	25
3.23	ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของการวางตัวแม่เหล็กทั้ง 3 แบบ.....	25
3.24	กราฟสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวเส้นประ.....	26
3.25	อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก.....	27
3.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและจำนวนรอบของขดลวดกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก.....	28
3.27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันบรรทัดฐานกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก.....	28
3.28	ภาพถ่ายของภาพรวมชุดทดลอง (ซ้าย) ขดลวด (ขวาบน) และสล๊อตแม่เหล็ก (ขวาล่าง).....	29
3.29	ลักษณะแรงดันจากขดลวดเบอร์ 30 ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 75 mm/s.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30	แรงดันจากขดลวดเบอร์ต่างๆ ที่ความเร็ว 25 mm/s ถึง 175 mm/s.....29
3.31	การต่อวงจรเพื่อหาค่าพลังงานจากขดลวด.....30
3.32	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจากขดลวดกับความเร็ว.....30
3.33	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 4700 μF เมื่อใช้ขดลวดเบอร์ 36 และ 43.....31
3.34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ.....32
3.35	สัญญาณแรงดันที่วัดได้จากขดลวด.....32
3.36	แรงดันจากขดลวดที่ต่ออนุกรมและขนานที่ความเร็วต่างๆ.....33
3.37	พลังงานจากขดลวดที่ต่ออนุกรมและขนานที่ความเร็วต่างๆ.....33
3.38	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจากการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรม.....33
3.39	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ.....34
3.40	ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานภายในเครื่องตัดแบ่งยูนิท.....35
3.41	แรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปขณะตัดชิ้นงาน.....35
3.42	ลักษณะแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF เมื่อตัดแผ่นเวเฟอร์ 1 แผ่น.....36
4.1	วงจรแสดงระบบจัดการพลังงานกับเซ็นเซอร์โหนด.....37
4.2	วงจรภายในของไอซี LTC3588-1.....38
4.3	กราฟแสดงประสิทธิภาพของไอซี LTC3588-1.....38
4.4	วิธีการการสะสมพลังงานของเซ็นเซอร์โหนด.....39
4.5	แผนผังการทำงานของเซ็นเซอร์โหนด.....39
4.6	ลักษณะการใช้กระแสของเซ็นเซอร์โหนดในช่วงเริ่มต้นการทำงาน.....41
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ.....42
4.8	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาต่างๆ.....43
5.1	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในช่วงแรกของการทำงานของเครื่องจักร.....45
5.2	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุหลังจากที่เซ็นเซอร์โหนดเริ่มทำงาน.....46
5.3	ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นโดยใช้ระบบที่พัฒนาขึ้น.....47
5.4	การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนระหว่างเครื่องที่บอลสกรูมีสภาพดีและบอลสกรูมีรอยบิ่น.....47
5.5	รูปแบบการทดลองรับส่งและการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากเซ็นเซอร์โหนด 16 ชุด.....48
5.6	โปรแกรมเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนด.....48
5.7	ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเซ็นเซอร์โหนด 16 ชุด.....49

บทที่ 1

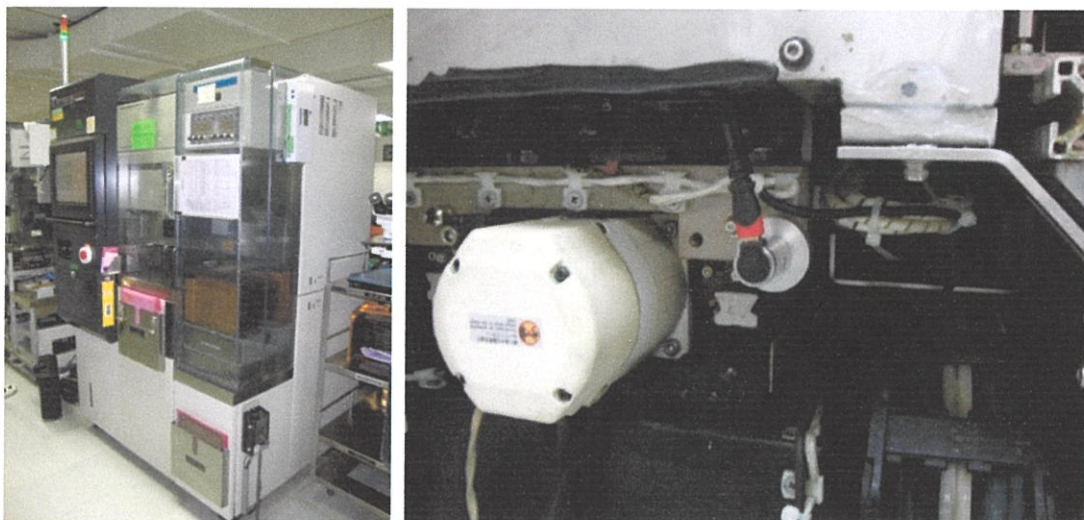
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีการติดตามสภาพของเครื่องจักรเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการผลิตด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากการติดตามสภาพของเครื่องจักรสามารถนำมาวินิจฉัยความเสียหายของเครื่องจักร ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต รวมถึงลดอันตรายและความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจากการทำงานที่บกพร่องของเครื่องจักรได้ นอกจากนี้การติดตามสภาพของเครื่องจักรและบำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างเหมาะสม สามารถช่วยลดผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องจากกระบวนการผลิต ซึ่งบ่อยครั้งกลายเป็นขยะมลพิษและส่งผลเสียกับสิ่งแวดล้อม ระบบติดตามสภาพเครื่องจักรที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับมากในปัจจุบันคือ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) เนื่องจากเป็นระบบที่มีความคล่องตัวสูง สะดวกในการติดตั้งบนชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และยากแก่การติดตั้งสายไฟ ซึ่งหนึ่งในชิ้นส่วนนั้นคือ บอลสกรู (Ball Screw) ที่เป็นชิ้นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องจักรที่ต้องการความแม่นยำในการทำงานสูง โดยทั่วไป บอลสกรูถูกใช้เพื่อเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมจากการหมุนของมอเตอร์เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น หากบอลสกรูที่ใช้งานเริ่มชำรุดหรือมีรอยบิ่น จะส่งผลให้ความแม่นยำในการทำงานของเครื่องจักรลดลงอย่างมาก และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องได้ ดังนั้นหากสามารถวินิจฉัยได้ว่าบอลสกรูใกล้จะเสียหาย จะสามารถป้องกันการทำงานผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายภายในกระบวนการอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก [1-5] เซ็นเซอร์โหนดที่เป็นองค์ประกอบของเครือข่ายดังกล่าว ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน อย่างไรก็ตามพลังงานที่มีอยู่ในแบตเตอรี่มีค่าจำกัด จึงมีความจำเป็นต้องชาร์จพลังงานเพิ่ม หรือเปลี่ยนแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอ ในบางครั้งที่ระบบมีความต้องการพลังงานมาก จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อยๆ และตำแหน่งที่ต้องเข้าไปเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นตำแหน่งที่ยากแก่การเข้าถึง จำเป็นต้องหยุดการทำงานของสายการผลิตเพื่อเข้าไปเปลี่ยนแบตเตอรี่ ทำให้เสียเวลาการผลิตและเวลาของบุคลากรที่ต้องเข้าไปเปลี่ยนแบตเตอรี่

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำวิธีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting : EH) มาประยุกต์ใช้ โดยเอาพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จากสภาพแวดล้อมมาใช้เป็นแหล่งพลังงานแทนแบตเตอรี่ เพื่อใช้สำหรับการติดตามสภาพและวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู ด้วยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของบอลสกรูขณะทำงาน แหล่งพลังงานที่จะเก็บเกี่ยว คือ พลังงานกลจากการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นที่เกิดขึ้นจากการทำงานของชุดนำทางเชิงเส้น (Linear Actuator) ซึ่งมีบอลสกรูที่ต้องการจะติดตามสภาพเป็นส่วนประกอบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจะใช้เป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นด้วยหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Linear Electromagnetic Energy Harvester) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปติดตั้งเข้ากับชุดนำทางเชิงเส้นได้ง่าย และมีความทนทานเหมาะสมกับการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบที่สร้างขึ้นจากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปทดสอบกับชุดนำทางเชิงเส้นในแนวแกน X ภายในเครื่องตัดแบ่งยูนิท (Singulation model : DFD6340) ของบริษัท ยูแทคไทย จำกัด ซึ่งเป็นเครื่องสำหรับตัดแผ่นเวเฟอร์ (iC Wafer) โดยรูปของชุดนำทางเชิงเส้นในแนวแกน X และเครื่องตัดแบ่งยูนิทที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.1



(ก) เครื่องตัดแบ่งยูนิทที่ใช้ทดลอง (ข) ชุดนำทางเชิงเส้นในแนวแกน X ภายในเครื่องตัดแบ่งยูนิท
รูปที่ 1.1 รูปถ่ายเครื่องจักรและชุดนำทางเชิงเส้นที่ทดลอง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเซ็นเซอร์โหนดชนิดซิกบีสำหรับใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรูภายในเครื่องจักรโดยอาศัยการวัดการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้น
2. พัฒนาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้นภายในเครื่องจักรและใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนดเพื่อทดแทนการใช้แบตเตอรี่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเซ็นเซอร์โหนดที่ไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานกล ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้นภายในเครื่องจักร และใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนดเพื่อนำไปติดตามสภาพและวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู โดยจะทดสอบการใช้งานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิท DFD6340

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของบอลสกรูเพื่อวิเคราะห์วิธีวินิจฉัยความเสียหาย
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของบอลสกรูในเครื่องตัดแบ่งยูนิทที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือน แล้วนำมาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ และวิธีการวินิจฉัยความเสียหาย
2. ออกแบบและทดลองเซ็นเซอร์โหนด
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบเซ็นเซอร์โหนดและศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนดที่ออกแบบมา

3. ออกแบบและทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้เหมาะสมกับเซ็นเซอร์โหนดที่ออกแบบมา และศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่น ค่าแรงดัน และพลังงาน จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานดังกล่าว

4. ทดสอบการทำงานของระบบภายในห้องปฏิบัติการ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่าง เซ็นเซอร์โหนด และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เพื่อใช้เป็นระบบติดตามสภาพเครื่องจักร ซึ่งการทดสอบจะทำในห้องปฏิบัติการ

5. ทดสอบการทำงานของระบบภายในโรงงานอุตสาหกรรม

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำระบบติดตามสภาพเครื่องจักรไปทดสอบกับเครื่องจักรจริงภายในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการติดตามสภาพของเครื่องจักร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีมาตรฐาน อีกทั้งยังลดขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่บกพร่อง
2. ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานกล ที่นำมาใช้ร่วมกับระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สามารถช่วยลดการใช้แบตเตอรี่ และลดเวลาในการซ่อมบำรุงได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 2 ภาพรวมของระบบติดตามสภาพเครื่องจักรแบบไร้สายและการเก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งกล่าวถึงหลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตามสภาพเครื่องจักรเพื่อวินิจฉัยความเสียหาย การเก็บเกี่ยวพลังงาน และการนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด

บทที่ 3 การออกแบบและการทดสอบเซ็นเซอร์โหนดและอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน นำเสนอการออกแบบเซ็นเซอร์โหนด การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้ได้พลังงานสูงสุด และการทดลองใช้งาน

บทที่ 4 การจัดการพลังงานเพื่อนำไปใช้กับเซ็นเซอร์โหนด เป็นส่วนของการเลือกใช้วงจรจัดการพลังงาน การบริหารการทำงานของอุปกรณ์เพื่อให้มีพลังงานต่ำที่สุด

บทที่ 5 ผลการทดสอบระบบ จะกล่าวถึงการทดสอบติดตามสภาพของชุดนำทางเชิงเส้นในเครื่องตัดแบ่งยูนิท และวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงบทสรุปของการวิจัย และแนวทางในการพัฒนาต่อ

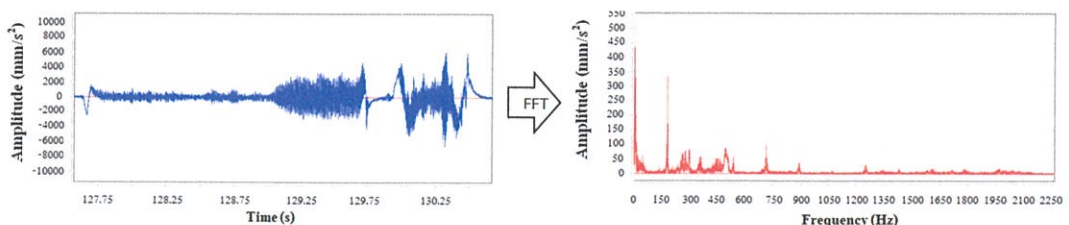
บทที่ 2

ภาพรวมของระบบติดตามสภาพเครื่องจักรแบบไร้สายและการเก็บเกี่ยวพลังงาน

ระบบติดตามสภาพเครื่องจักรแบบไร้สายที่ใช้พลังงานจากสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ การติดตามสภาพเครื่องจักร เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และการเก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงภาพรวม และหลักการเบื้องต้นที่ได้มีการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาของระบบดังกล่าว

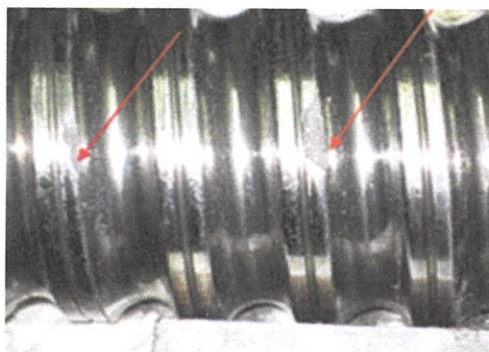
2.1 การวัดการสั่นสะเทือนเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร

ในขณะที่เครื่องจักรทำงาน ชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเครื่องจักรจะเกิดการเคลื่อนไหวซึ่งส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น อย่างไรก็ตามหากชิ้นส่วนใดๆ ในเครื่องจักรมีการเสื่อมสภาพ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกับการสั่นสะเทือนในขณะที่เครื่องจักรมีสภาพสมบูรณ์ การสั่นสะเทือนดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้จากหลากหลายสาเหตุทั้งจากทางกลและทางแม่เหล็กไฟฟ้า [6] เช่น การสึกกร่อน การเยื้องศูนย์ของอุปกรณ์ และความไม่สมมาตรของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ เป็นต้น ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น จะมีความแตกต่างกันไปตามความเร็วการทำงานของอุปกรณ์และสาเหตุที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนดังกล่าว [7,8] การวัดค่าการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรสามารถทำได้ด้วยการใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เลเซอร์ดีอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ (Laser Doppler Vibrometer) [9] และเซ็นเซอร์เสียง (Sound Pressure Transducer) [10] แต่อุปกรณ์ที่นิยมใช้มากที่สุดในการติดตามสภาพของเครื่องจักรคือ การใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง [11] เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาต่ำ ทนต่อสภาพแวดล้อม และสามารถติดตั้งไว้ในเครื่องจักรได้ง่าย ตัวแปรที่ถูกใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนคือ ความเร่ง ความเร็ว และระยะทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งแต่ละตัวแปรมีช่วงความถี่ที่เหมาะสมในใช้งานต่างกัน การวัดความเร่งจะเหมาะกับการวัดที่ความถี่สูง และในทางตรงกันข้ามการวัดความเร็วและระยะทางจะเหมาะกับการวัดที่ความถี่ต่ำ [12] ส่วนมากข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ จะถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์ถึงสภาพของชิ้นส่วนที่ถูกวัด วิธีการวิเคราะห์ที่มีการนำมาใช้คือ การวิเคราะห์จากความน่าจะเป็น (Probabilistic Analysis) [13] การวิเคราะห์รูปสัญญาณ (Waveform Analysis) [14] การวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลา (Time-Domain Signal Analysis) และการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency-Domain Signal Analysis) [15,16] อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์ที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายและชัดเจนที่สุดคือ การวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ โดยการนำข้อมูลที่วัดได้ในโดเมนเวลามาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญญาณการสั่นสะเทือนหลังผ่านการแปลงจากโดเมนเวลาไปยังโดเมนความถี่

ในการวัดการสั่นสะเทือนเพื่อติดตามสภาพของเครื่องจักรส่วนมาก จะถูกมุ่งไปที่การวัดการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ที่มีการหมุนเช่น มอเตอร์ ตลับลูกปืน และกลองเกียร์ ฯลฯ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและพบได้มากในเครื่องจักร [18] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวกับการติดตามสภาพของบอลสกรูยังมีอยู่น้อยมาก [19] บอลสกรูเป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่พบได้ในเครื่องจักรที่ต้องการความแม่นยำในการทำงานสูง และไวต่อการสั่นสะเทือน ซึ่งเมื่อบอลสกรูผ่านการใช้งานเป็นเวลานานโดยที่ไม่ได้มีการบำรุงรักษาที่ได้อย่างสม่ำเสมอ จะเกิดการบิ่นของบอลสกรูดังรูปที่ 2.2 และมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น [20] ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเครื่องจักรอย่างมาก การติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ตำแหน่งที่ติดตั้งมีผลต่อค่าที่วัดได้ การติดตั้งอุปกรณ์วัดจึงควรติดตั้งให้ใกล้จุดที่เกิดการสั่นสะเทือนมากที่สุดเพื่อให้สามารถวัดข้อมูลได้ถูกต้อง ซึ่งในบางครั้งเป็นตำแหน่งที่ยากแก่การติดตั้งและเข้าถึง [21] การใช้เซ็นเซอร์แบบไร้สายจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการติดตามสภาพของเครื่องจักร



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายสภาพของบอลสกรูที่ถูกใช้งานเป็นเวลานานและเกิดการบิ่น ณ ตำแหน่งที่ถูกครี

2.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ปัจจุบันเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อติดตามสภาพเริ่มได้รับความสนใจ และมีการใช้งานหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น การติดตามสภาพสิ่งแวดล้อม [22,23] การติดตามสภาพโครงสร้าง [24] และการติดตามสภาพของเครื่องจักร [25] ถึงแม้ว่าระบบติดตามสภาพเครื่องจักรภายในงานอุตสาหกรรมที่แพร่หลายที่สุดคือ ระบบการส่งข้อมูลผ่านสาย แต่ระบบดังกล่าวไม่สามารถนำไปติดตั้งได้ในทุกๆ อุปกรณ์ภายในเครื่องจักร เนื่องด้วยข้อจำกัดคือ ต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถวางสายไฟเข้าไปได้ หรือในหลายๆ ครั้งที่ค่าใช้จ่ายในการวางสายไฟมีราคาสูง การใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว [26] ที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อการติดตามสภาพเครื่องจักรในระบบอุตสาหกรรมอยู่จำนวนมาก [27-32] รวมถึงแนวคิดการใช้งานเพื่อติดตามสภาพของบอลสกรู [33,34] ในแต่ละงานได้มีการเลือกใช้โพรโตคอลการส่งสัญญาณไร้สายที่แตกต่างกัน โพรโตคอลที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในการส่งสัญญาณไร้สายในอุตสาหกรรมคือ IEEE 802.11 (WLAN) [35] และ IEC61158 (Fieldbus) [36] เนื่องจากความสามารถในการส่งสัญญาณที่ความเร็วสูงและส่งได้ไกล แต่เนื่องจากโพรโตคอลดังกล่าวใช้พลังงานค่อนข้างสูง ในบางครั้งจึงไม่เหมาะสมกับการติดตามสภาพอุปกรณ์ในตำแหน่งที่มีแหล่งพลังงานจำกัด จึงทำให้โพรโตคอลอื่นๆ ที่มีอัตราการใช้พลังงานต่ำกว่าเช่น IEEE802.15.1 (Bluetooth) [37], IEEE802.15.4 (Zigbee) [38] หรือ IEEE802.15.3a (UWB) [39] ถูกนำมาใช้งาน

มากขึ้น ซึ่งแต่ละโพรโตคอลมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 โพรโตคอล UWB มีอัตราการใช้พลังงานต่ำที่สุดในทุกๆ โพรโตคอล และสามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง แต่มีข้อเสียคือ กำลังส่งต่ำทำให้ส่งข้อมูลได้ใกล้ ในส่วนของ Bluetooth การใช้พลังงานก็ค่อนข้างต่ำแต่เช่นเดียวกับ UWB คือ มีระยะรับส่งข้อมูลต่ำ และอัตราการใช้พลังงานในโหมดประหยัดพลังงานยังค่อนข้างสูง โพรโตคอล Zigbee ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลใกล้เคียงกับ Bluetooth แต่ระยะการส่งข้อมูลสูงกว่า ค่อนข้างมาก จึงทำให้โพรโตคอล Zigbee มีอัตราการใช้พลังงานเทียบกับระยะทางส่งสูงที่สุดในทั้งสามโพรโตคอลนี้ นอกจากนี้โพรโตคอล Zigbee ยังมีข้อได้เปรียบโพรโตคอลอื่นคือ มีจำนวนโหนดในเครือข่ายได้มากที่สุดถึง มากกว่า 65,000 โหนด เมื่อเทียบกับโพรโตคอลอื่นที่ได้เพียง 8 โหนด

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของโพรโตคอลการส่งสัญญาณไร้สาย

Standard	WLAN [40,41]	Bluetooth [40,41]	Zigbee [40]	UWB [42]
IEEE Spec.	802.11	802.15.1	802.15.4	802.15.3a
Operating Frequency	2.4/5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz
Channel Bandwidth	22 MHz	1 MHz	2 MHz	500 MHz - 7.5 GHz
Bit Rate	54 Mbps	1 Mbps	250 Kbps	110 Mbps
Power Consumption Idle/TX/RX	0.15/0.86/1.46 W	16.5/123/126 mW	45/120/120 mW	-/82.5/- mW
Hibernate Power Consumption	75 mW	270 μ W	3 μ W	15 μ W
Transmission Power	15 - 20 dBm	0 - 10 dBm	(-25) - 0 dBm	-41.3 dBm/MHz
Nominal range	100 m	10 m	40 - 120 m	10 m
Max Number of Cell Nodes	2007	8	> 65000	8

นอกเหนือจากการเลือกใช้โพรโตคอลและอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ต้องการพลังงานต่ำแล้ว การใช้ระบบการจัดการพลังงานสามารถช่วยลดความต้องการในการใช้พลังงานของเซ็นเซอร์โหนดได้ [43] เช่น การเปลี่ยนสถานะการทำงานของเซ็นเซอร์โหนดให้เข้าสู่สถานะประหยัดพลังงาน (Hibernate Mode) เมื่อไม่ได้วัดหรือส่งข้อมูล [44] การปรับลดระดับแรงดันเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์และความถี่ของแหล่งกำเนิดลง [45] การสลับระหว่างสถานะการทำงานเพื่อใช้ผลการฟื้นระดับพลังงานของแบตเตอรี่ (Battery Capacity Recovery Effect) [46] และการใช้อัลกอริทึมในการส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ [47] อย่างไรก็ตามเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายยังต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งแม้เซ็นเซอร์โหนดจะมีอัตราการใช้พลังงานต่ำ แต่ก็ยังมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ จึงทำให้มีการพัฒนานำระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้กับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว [48]

2.3 การเก็บเกี่ยวพลังงาน

ปัจจุบันแหล่งการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมหลักๆ ที่ได้มีการวิจัยมาคือ พลังงานแสงอาทิตย์ [49] พลังงานความร้อน [50] พลังงานกล [51] พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [52]

ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแต่ละแหล่งนั้นก็มีความดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตามสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานภายในกระบวนการอุตสาหกรรม แหล่งพลังงานที่น่าสนใจมากที่สุดคือ พลังงานกลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นตลอดเวลาที่เครื่องจักรมีการทำงาน ซึ่งหลักการการเก็บเกี่ยวพลังงานกลนั้นสามารถทำได้หลักๆ 3 วิธี [53] คือ หลักการเพียโซอิเล็กทริก [54] หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า [55] และหลักการไฟฟ้าสถิต [56] ที่ผ่านมามีการวิจัยหลายๆ งานเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้หลักการเพียโซอิเล็กทริกและไฟฟ้าสถิต [57-63] ซึ่งมีข้อดีคือ จะสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากเมื่อเทียบกับขนาดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามหลักการเก็บเกี่ยวพลังงานทั้งสองแบบนี้เหมาะกับการใช้เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กจากการสั่นสะเทือน เนื่องจากมีราคาสูง นอกจากนี้หากนำไปใช้กับเครื่องจักรที่มีการสั่นสะเทือนต่ำ (เครื่องจักรในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง) การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนจะได้พลังงานต่ำมาก ในกรณีนี้การใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรจะเหมาะสมกว่า และมีราคาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้หลักการอื่นๆ

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานต่างๆ

แหล่งพลังงาน	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยว	ความหนาแน่นพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
แสงอาทิตย์ [49]	Solar Cell	170 mW/cm ²	ความหนาแน่นพลังงานสูงที่สุด	ใช้ได้เฉพาะตอนกลางวันเท่านั้น
ความร้อน [50]	Thermoelectric	1-10 mW/cm ²	เป็นแหล่งพลังงานที่หาได้ง่ายที่สุด	โครงสร้างมีขนาดค่อนข้างใหญ่
พลังงานกล (การสั่นสะเทือนและการเคลื่อนที่) [53]	Piezoelectric [54]	200 μ W/cm ²	สามารถเก็บเกี่ยวได้ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่	โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมักมีความซับซ้อน
	Electrostatic [55]	56 μ W/cm ²		
	Electromagnetic [56]	100 μ W/cm ²		
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [52]	Antenna	100 μ W/cm ²	สามารถสร้างส่งพลังงานไปที่ไหนก็ได้	พลังงานจะแปรผันกำลังสองกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทเชิงเส้น (Linear Generator) และประเภทเชิงมุม (Rotary Generator) การใช้งานของทั้ง 2 ประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดพลังงานที่ต้องการเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานประเภทเชิงมุมจะได้รับความนิยมในการใช้งานมากกว่า เนื่องจากการเคลื่อนที่เชิงมุมสามารถทำความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างแม่เหล็กกับขดลวดได้ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเนื่องจากแหล่งพลังงานภายนอกที่พบได้ทั่วไปส่วนมากจะเป็นการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง จึงส่งผลให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานประเภทเชิงเส้นสามารถมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องมีการสูญเสียพลังงานในโครงสร้างทางกลเพื่อส่งผ่านกำลังจากเชิงเส้นเป็นเชิงมุม [64] ในการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า การวางตัวของแม่เหล็กและขนาดของช่องว่างอากาศระหว่างแม่เหล็กกับขดลวด ต้องมีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านกับขดลวดสูงที่สุด [65] ที่ผ่านมามี

งานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทเชิงเส้น แต่โดยส่วนมากจะมุ่งไปที่การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนที่ที่มีความถี่สูง [66] และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน [67] ซึ่งทั้งสองแบบไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องจักรที่มีการสั่นสะเทือนต่ำและมีพื้นที่แคบในการติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานได้

2.4 การนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด

การนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด เป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องความจำเป็นในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในเซ็นเซอร์โหนดไร้สาย โดยทั่วไปแต่ละโหนดของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลักคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซ็นเซอร์ โมดูลไร้สาย และแบตเตอรี่ แต่เมื่อนำมาใช้กับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เซ็นเซอร์โหนดจะต้องมีองค์ประกอบเพิ่มเติมคือ วงจรจัดการพลังงาน (Energy Management Circuit: EMC) [68] ซึ่งทำหน้าที่จัดการพลังงานที่รับจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้สามารถนำมาใช้งานกับเซ็นเซอร์โหนดได้ ปัจจุบันเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน ยังไม่สามารถให้พลังงานที่มากเพียงพอต่อความต้องการของเซ็นเซอร์โหนดให้สามารถวัดข้อมูลและส่งข้อมูลตลอดเวลาได้ [69] ดังนั้นการนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มาใช้จึงต้องมีอัลกอริทึมในการส่งข้อมูล และการเข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงานที่เหมาะสม [70] ในกรณีที่พลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมีค่าน้อยมาก ระบบจะต้องมีอุปกรณ์สะสมพลังงานเช่น ตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ โดยวงจรจัดการพลังงานจะทำหน้าที่ในการเอาพลังงานไปเก็บสะสมไว้ในอุปกรณ์สะสมพลังงาน และเมื่อพลังงานที่สะสมมากเพียงพอ จึงนำพลังงานที่สะสมไว้จ่ายให้กับอุปกรณ์ในเซ็นเซอร์โหนด [71] อุปกรณ์ที่ใช้ในการสะสมพลังงานโดยทั่วไปจะใช้แบตเตอรี่เป็นหลัก เนื่องจากมีราคาถูก สามารถให้กระแสได้สูง และมีความจุของพลังงานสูง [72] อย่างไรก็ตามด้วยจำนวนรอบการชาร์จที่ต่ำของแบตเตอรี่ทำให้มีการวิจัยอื่นๆ ที่นำโซลิตสเททแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุมาใช้งานแทน [73,74] ซึ่งข้อดีของโซลิตสเททแบตเตอรี่คือ มีรอบการชาร์จสูงกว่าแบตเตอรี่ประมาณ 10 – 20 เท่า และมีพลังงานรั่วไหลต่ำมาก แต่มีข้อเสียคือ มีความจุพลังงานต่ำ และมีความต้านทานภายในสูง ทำให้ยังไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้มากนัก ในทางกลับกันข้อดีของตัวเก็บประจุคือ มีจำนวนรอบการชาร์จที่สูงกว่าแบตเตอรี่ประมาณ 1000 เท่าและมีความต้านทานภายในต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ความจุพลังงานน้อย (น้อยกว่าแบตเตอรี่แต่มากกว่าโซลิตสเททแบตเตอรี่) และมีพลังงานรั่วไหลมาก [75,76] ต่อมามีการนำตัวเก็บประจุมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่เพื่อลดจำนวนรอบการชาร์จของแบตเตอรี่ โดยการให้ตัวเก็บประจุเป็นตัวสำรองไฟขั้นแรก หากไม่เพียงพอจึงค่อยใช้แบตเตอรี่ช่วยจ่ายพลังงาน ซึ่งผลที่ได้คือ ทำให้สามารถยืดอายุของแบตเตอรี่ไปได้ประมาณ 4 เท่า [77]

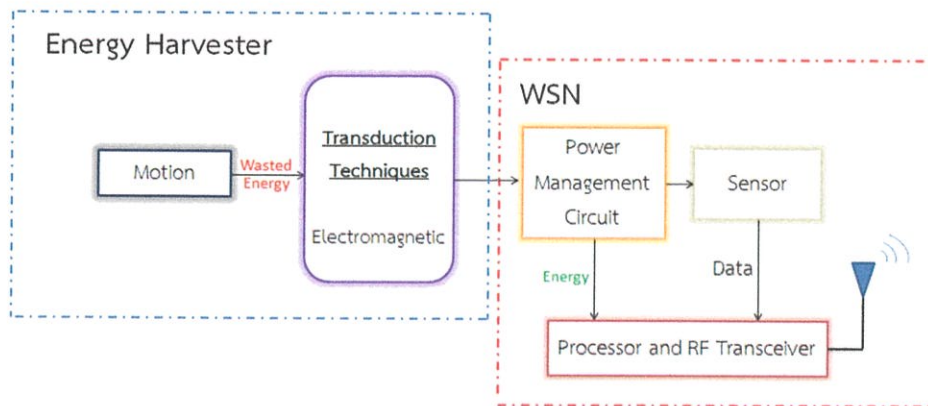
สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าคือ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) เนื่องจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะสามารถจ่ายพลังงานสูงสุดได้เมื่อกระแสที่ถูกโหลดดึงมีค่าเหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปเซ็นเซอร์โหนดเป็นโหลดที่ไม่สามารถเปลี่ยนอัตราการดึงกระแสได้ ในขณะที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมีจุดส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่คงที่ จึงทำให้เป็นเรื่องยากที่จะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดเป็นโหลดโดยตรงของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ที่ผ่านมาจึงมีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้วงจรปรับระดับแรงดัน เพื่อทำหน้าที่แทนโหลดในการปรับอัตราการดึงกระแสจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด [78] ในกรณีที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไม่ได้มีชนิดเดียว เพื่อให้

สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานทั้งหมดได้จะต้องใช้วงจรจัดการพลังงานหลายวงจร [79] ซึ่งหากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมีจำนวนมาก จะทำให้ต้องใช้วงจรจัดการพลังงานหลายวงจรและส่งผลให้เซ็นเซอร์โหนดมีขนาดใหญ่ มีราคาสูงและเกิดการสูญเสียพลังงานไปกับวงจรจัดการพลังงาน ในเวลาต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีการติดตามตำแหน่งการส่งผ่านกำลังสูงสุด โดยอาศัยวงจรจัดการพลังงานเพียงวงจรเดียวขึ้นมา [80] ซึ่งแม้จะได้พลังงานน้อยกว่าใช้วงจรจัดการพลังงานแบบแยกเล็กน้อย แต่สามารถลดพื้นที่และมูลค่าของเซ็นเซอร์โหนดได้มาก

บทที่ 3

การออกแบบและการทดสอบเซ็นเซอร์โหนดกับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบและการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์โหนดและอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน โดยหลักการทำงานในภาพรวมของระบบเซ็นเซอร์แบบผลิตพลังงานได้เองเพื่อใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู สามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังระบบเซ็นเซอร์แบบผลิตพลังงานได้เองเพื่อใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู

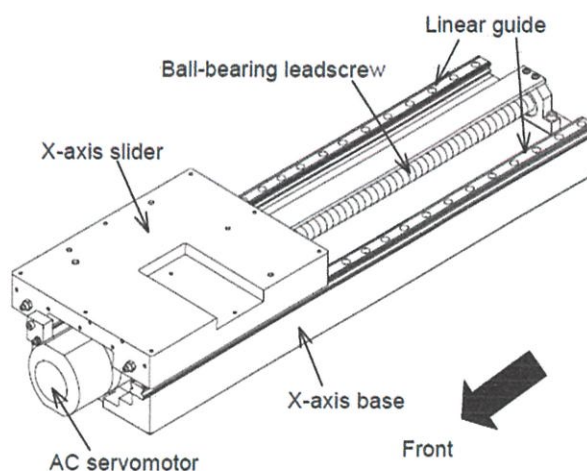
จากรูปที่ 3.1 ระบบเซ็นเซอร์แบบผลิตพลังงานได้เองเพื่อใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรูประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักคือ เซ็นเซอร์โหนด และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน โดยการออกแบบและการทดสอบองค์ประกอบทั้ง 2 ส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.1 เซ็นเซอร์โหนด

ขั้นตอนแรกของการวิจัยจะเป็นการออกแบบ และทดสอบเซ็นเซอร์โหนดเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า และความสามารถในการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด ในขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนย่อยดังนี้

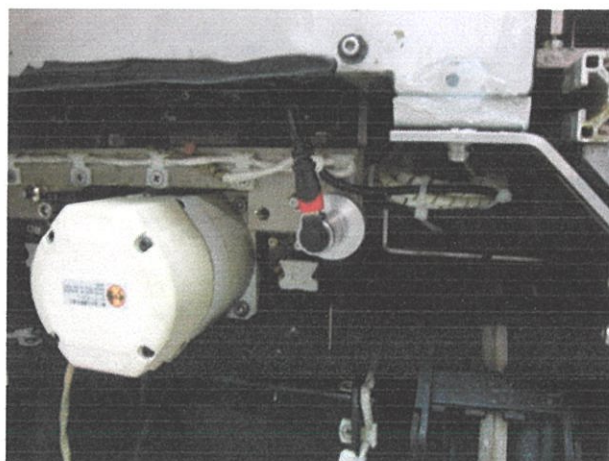
3.1.1 การเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของบอลสกรู

ขั้นตอนนี้จะเป็นการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นในเครื่องจักรตัดแบ่งยูนิท DFD6340 เพื่อนำข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้มาใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน และความเป็นไปได้ในการวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรูที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งของชุดนำทางเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



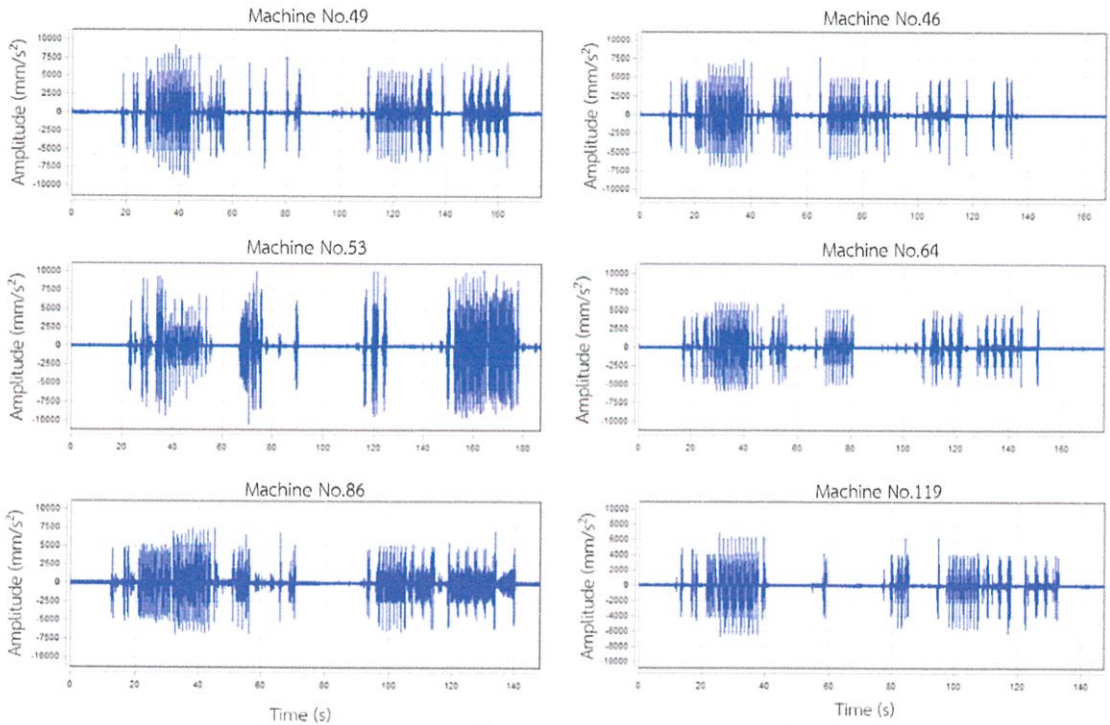
รูปที่ 3.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของชุดนำทางเชิงเส้น

การวัดการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นจะใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง กับโปรแกรม El-Calc ของบริษัท ERBESSD INSTRUMENTS โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งไว้บนฐานแกนเลื่อนในแนวแกนเดียวกับการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่ฐานแกนเลื่อนของชุดนำทางเชิงเส้น

ในการวัดการสั่นสะเทือนดังกล่าวจะวัดการสั่นสะเทือนในช่วงการตัดชิ้นงานแผ่นเวเฟอร์ 64L-NQFN-9x9 mm 4CH Package ด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดนำทาง 125 mm/s โดยจะวัดเครื่องจักรทั้งหมด 6 เครื่อง ซึ่งแบ่งเป็นเครื่องที่บอลสกรูมีสภาพปกติ 3 เครื่อง (เครื่องหมายเลข 46 64 และ 119) และเครื่องที่บอลสกรูเริ่มมีความเสียหายคือ มีรอยบิ่นเกิดขึ้นบนบอลสกรู 3 เครื่อง (เครื่องหมายเลข 49 53 และ 86) ผลการวัดการตัดแผ่นชิ้นงานเวเฟอร์ 2 แผ่นได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4

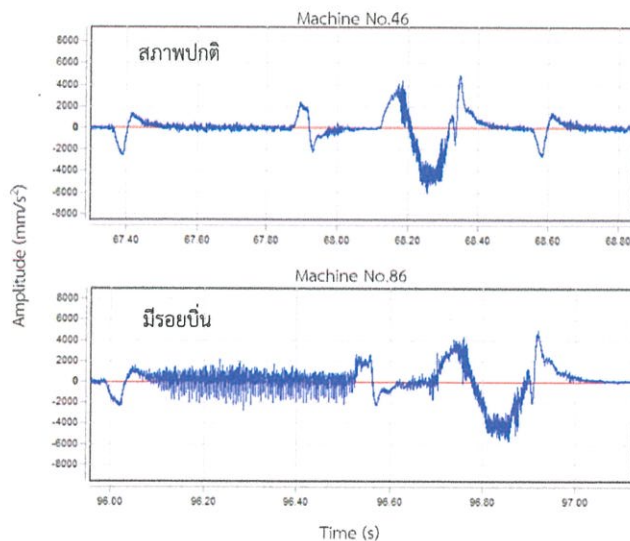


(ก) กลุ่มเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่น

(ข) กลุ่มเครื่องที่บอลสกรูสภาพปกติ

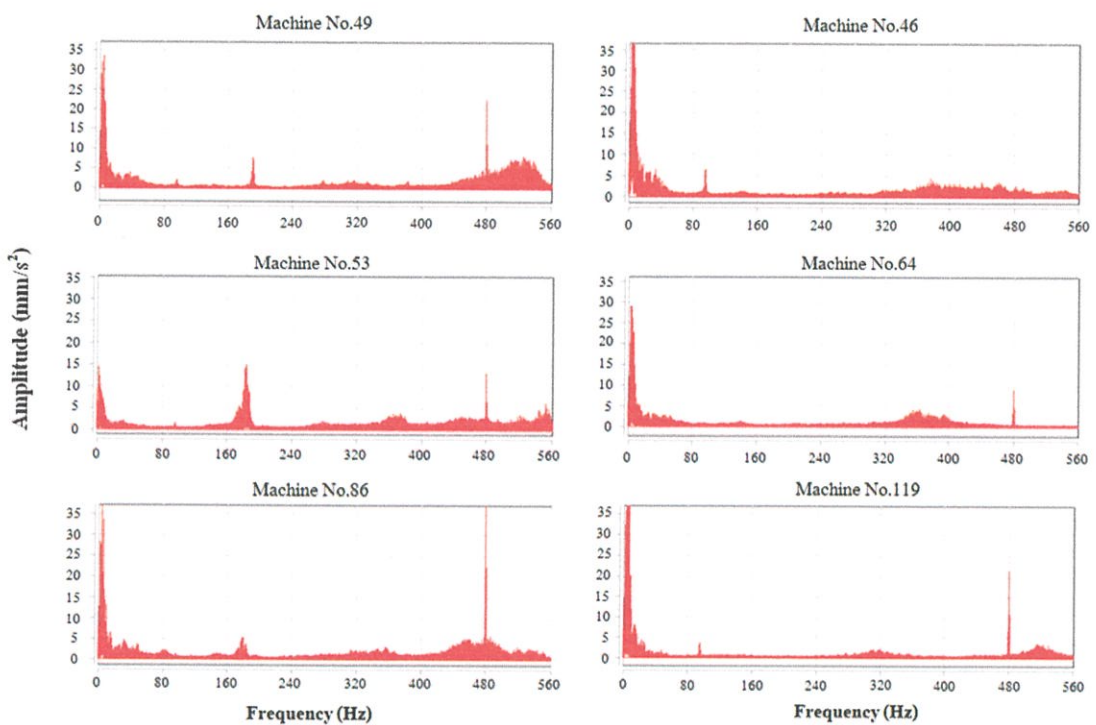
รูปที่ 3.4 ความเร่งของเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นและบอลสกรูสภาพปกติ

จากรูปที่ 3.4 เครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่นคือ เครื่องจักรหมายเลข 49, 53 และ 86 โดยเครื่องที่ 53 จะมีระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนสูงที่สุด ตามด้วยเครื่องที่ 49 และ 53 ตามลำดับ ส่วน เครื่องจักรที่บอลสกรูยังมีสภาพปกติคือ เครื่องจักรหมายเลข 46, 64 และ 119 ซึ่งจะเห็นได้ว่ายอดความเร่งของเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่น จะมีค่าสูงกว่ายอดความเร่งของเครื่องจักรที่บอลสกรูมีสภาพปกติ ความแตกต่างดังกล่าวจะสามารถเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อดูเฉพาะช่วงความเร่งของฐานแกนเลื่อนขณะที่กำลังตัดชิ้นงาน 1 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่งขณะตัดชิ้นงาน 1 ครั้ง

จากรูปเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งขณะตัดระหว่างเครื่องที่บอลสกรูปกติ (เครื่อง 46) และเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่น (เครื่อง 86) จะพบว่าเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นนั้นมีสัญญาณความเร่งความถี่สูงเกิดขึ้นขณะที่กำลังตัดอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความเร่งดังกล่าวเกิดจากการที่ลูกปืนภายในบอลสกรูเคลื่อนที่ผ่านรอยบิ่นที่เกิดจากการทำงานอย่างต่อเนื่องของบอลสกรู เมื่อนำรูปสัญญาณจากรูปที่ 3.4 มาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว จะสามารถเห็นความถี่ที่แตกต่างกันได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะพบว่าความถี่ของกลุ่มเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่น มีความถี่ในช่วง 180 - 200 Hz เกิดขึ้นสูง เมื่อเทียบกับกลุ่มเครื่องจักรที่บอลสกรูมีสภาพปกติ ที่ไม่มีความถี่ในช่วง 180 - 200 Hz เกิดขึ้นหรือมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปได้ว่าสามารถแบ่งแยกเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่นกับเครื่องจักรที่บอลสกรูยังปกติโดยอาศัยการวัดความถี่ช่วง 180 - 200 Hz

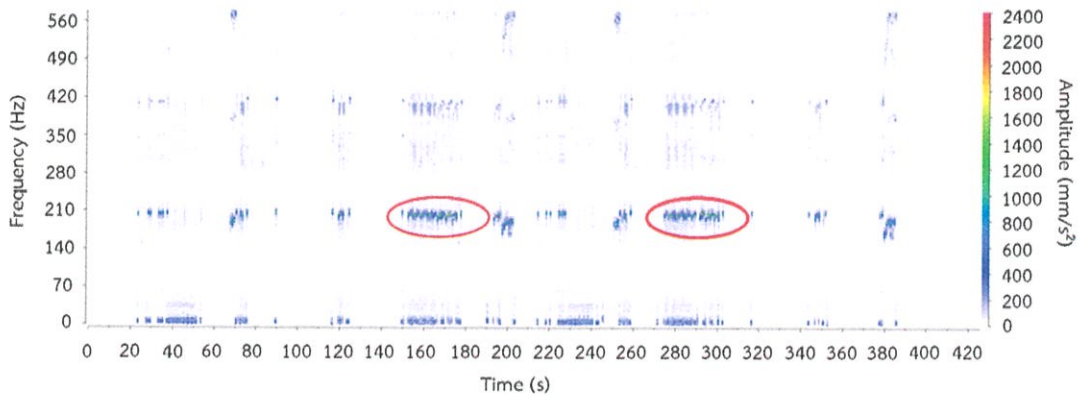


รูปที่ 3.6 ผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วของสัญญาณความเร่งของเครื่องจักร

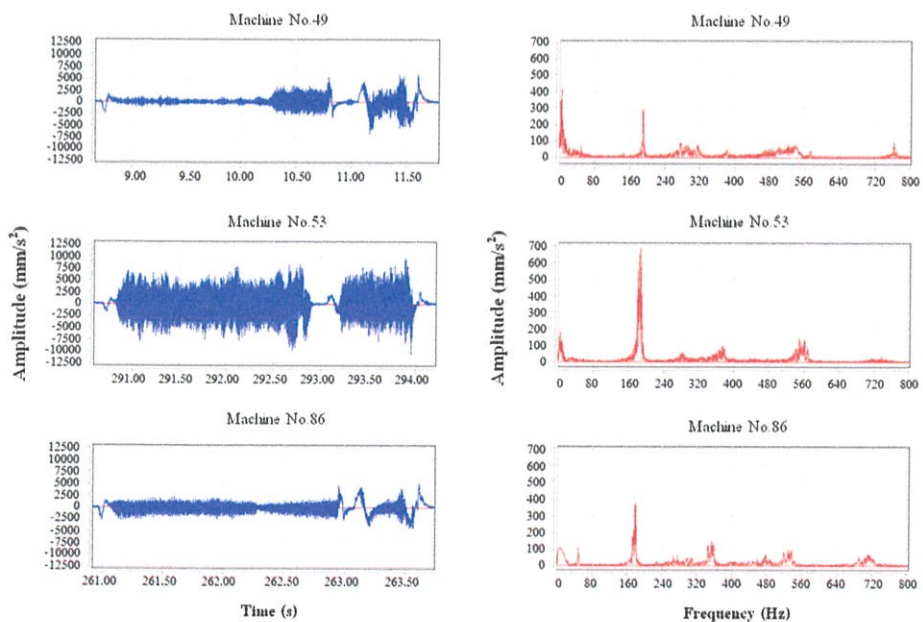
จากรูปที่ 3.6 พบว่าข้อมูลจากการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วนอกจากจะสามารถใช้ความถี่แบ่งแยกระหว่างเครื่องที่มีปัญหาและเครื่องที่ยังปกติดีแล้ว ยังสามารถแบ่งแยกระดับความรุนแรงของความเสียหายได้โดยอาศัยค่าแอมพลิจูดของความถี่ช่วง 180 - 200 Hz โดยสังเกตได้ว่าเครื่องที่มีความรุนแรงของการสั่นสะเทือนมากที่สุดซึ่งก็คือเครื่องที่ 53 จะมีค่าแอมพลิจูดของช่วงความถี่ 180 - 200 Hz มากที่สุด ถัดมาด้วยเครื่องที่ 49 และเครื่อง 86 ตามลำดับ

ในขั้นตอนถัดมาจะเป็นการวิเคราะห์หาช่วงเวลาที่เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค่าความถี่ช่วง 180 - 200 Hz ในระหว่างการทำงานของเครื่อง โดยจะนำข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่งไปหาสเปกโตรแกรม (Spectrogram) ในการทดลองได้นำข้อมูลจากเครื่องที่ 53 ซึ่งเป็นเครื่องที่มีความรุนแรงของการสั่นสะเทือนสูงที่สุด จากผลของสเปกโตรแกรม ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 สังเกตได้ว่าความถี่ในย่าน 180 - 200 Hz นั้นจะเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงที่มีการเคลื่อนเข้าของฐานแกนเลื่อนใน

แนวแกน X เพื่อนำชิ้นงานเข้าไปตัด โดยจะเห็นได้ชัดในช่วงเวลาวินาทีที่ 160 – 180 และ วินาทีที่ 285 – 305 (ช่วงเวลาที่ถูกวงด้วยวงกลมสีแดง) ซึ่งเป็นการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาวและมีการเคลื่อนที่ของฐานแกนเลื่อน เป็นระยะทางที่มากที่สุดในการทำงานของเครื่องจักรดังกล่าว ดังนั้นหากนำสัญญาณข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วในกลุ่มเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่น มาแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเฉพาะส่วนข้อมูลขณะที่มีการเลื่อนเข้าของฐานแกนเลื่อนเพื่อนำชิ้นงานไปตัดตามแนวยาว (รูปที่ 3.8) จะพบว่าค่าความถี่ในช่วง 180 – 200 Hz จะมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น และสามารถแยกออกจากความถี่ค่าอื่นๆ ได้ง่าย



รูปที่ 3.7 สเปกโตรแกรมที่ได้จากข้อมูลการสั่นสะเทือนของเครื่องหมายเลข 53



รูปที่ 3.8 สัญญาณความเร่งและผลการแปลงฟูเรียร์เฉพาะช่วงเวลาการตัดชิ้นงานตามแนวยาว

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่กล่าวมาทำให้สรุปได้ว่า การเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่จะนำมาสร้างเซ็นเซอร์ไหนจะต้องมีค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) สูงกว่า 200 Hz และมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างของข้อมูลสูงกว่า 2 เท่าของแบนด์วิดท์ (ตาม Nyquist's Sampling Theorem) เพื่อให้สามารถวัดข้อมูลช่วงความถี่ 180 – 200 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้แยกเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นกับ

เครื่องที่บอลสกรูมีสภาพปกติได้ นอกจากนี้การวัดควรเลือกช่วงเวลาในการวัดที่เหมาะสมคือ ช่วงเวลาที่มีการเคลื่อนที่เข้าของฐานแกนเลื่อนเพื่อนำชิ้นงานเข้าไปตัดตามแนวยาว เพื่อให้ผลการแยกเครื่องที่มีปัญหาและไม่มีปัญหาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

3.1.2 การออกแบบเซ็นเซอร์โหนด

เซ็นเซอร์โหนดที่ใช้ในการวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลักๆ คือ เซ็นเซอร์วัดความเร่ง, ไมโครคอนโทรลเลอร์ และโมดูลส่งข้อมูลไร้สาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.2.1. เซ็นเซอร์วัดความเร่ง

เซ็นเซอร์วัดความเร่งที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากในขั้นตอนการเก็บข้อมูลคือ ต้องมีค่าแบนด์วิดท์สูงกว่า 200 Hz ขึ้นไป และสามารถสุ่มตัวอย่างข้อมูลได้ด้วยความถี่ที่สูงกว่า 400 Hz และที่สำคัญคือ ใช้พลังงานในการทำงานต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เซ็นเซอร์วัดความเร่ง ADXL203 ของ Analog Device ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากเป็นเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่สามารถปรับค่าแบนด์วิดท์ได้ถึง 2500 Hz มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งสามารถนำมาสุ่มตัวอย่างข้อมูลด้วยความถี่ตามที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสุ่มได้ โดยความถี่ในการสุ่มตัวอย่างคือ 1000 Hz หรือทุกๆ 1 ms (5 เท่าของแบนด์วิดท์) และที่สำคัญคือ เซ็นเซอร์ ADXL203 นี้ใช้พลังงานในการทำงานต่ำ (ประมาณ 1.65 mW ขณะทำงาน)

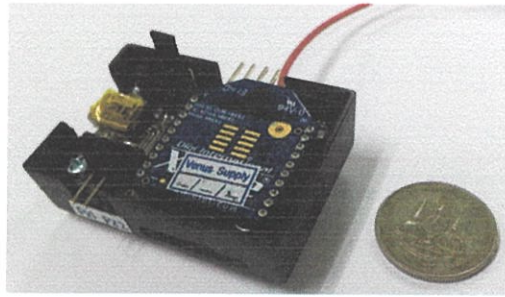
3.1.2.2. ไมโครคอนโทรลเลอร์

คุณสมบัติสำคัญของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะนำมาใช้คือ ต้องมีความสามารถในการประมวลผลที่เร็วเพียงพอต่อความต้องการในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล และต้องมีอัตราการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต ATMEGA168PA ของ AVR เนื่องจากมีคุณสมบัติเพียงพอต่อความต้องการ และใช้พลังงานต่ำ (ประมาณ 23 mW ขณะทำงาน และประมาณ 5 μ W ในสภาวะประหยัดพลังงาน) คริสตัลสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ประกอบร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นคริสตัลสร้างความถี่ 16 MHz เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูงพอสำหรับ การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ความถี่ 1000 Hz และนำข้อมูลไปผ่านกระบวนการปรับปรุงสัญญาณ (Signal Conditioning)

3.1.2.3. โมดูลส่งข้อมูลไร้สาย

การใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในงานอุตสาหกรรม การใช้งานโมดูลส่งข้อมูลไร้สายควรให้ความสำคัญที่โปรโตคอล และเสถียรภาพในการส่งข้อมูล ในงานวิจัยนี้ใช้โมดูลส่งข้อมูลไร้สายโปรโตคอล IEEE® 802.15.4 (Zigbee) ในการส่งข้อมูล เนื่องจากเป็นโปรโตคอลที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลต่ำ ในขณะที่ระยะการส่งข้อมูลสูงกว่าโปรโตคอลอื่นๆ ที่ใช้พลังงานใกล้เคียงกัน และมีการใช้พลังงานต่ำที่สุดในสภาวะประหยัดพลังงาน นอกจากนี้โปรโตคอล Zigbee สามารถมีจำนวนโหนดสูงสุดในเครือข่ายได้มากกว่าโปรโตคอลอื่นๆ

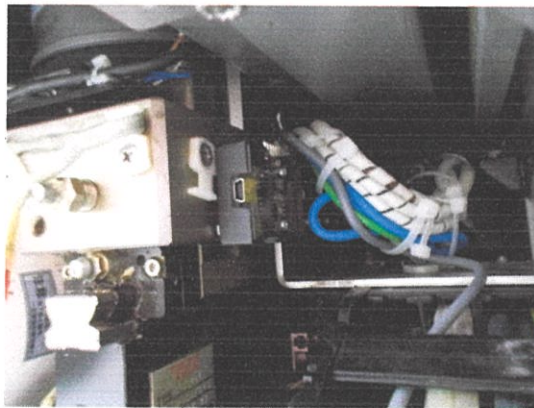
จากนั้นนำเซ็นเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และโมดูลส่งข้อมูลไร้สาย ที่กล่าวมาข้างต้นมา ประกอบเป็นเซ็นเซอร์โหนด โดยออกแบบให้มีขนาดเล็กเนื่องจากด้านในของเครื่องจักรตัดแบ่งยูนิท มีพื้นที่จำกัด เซ็นเซอร์โหนดที่ประกอบขึ้นได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.9



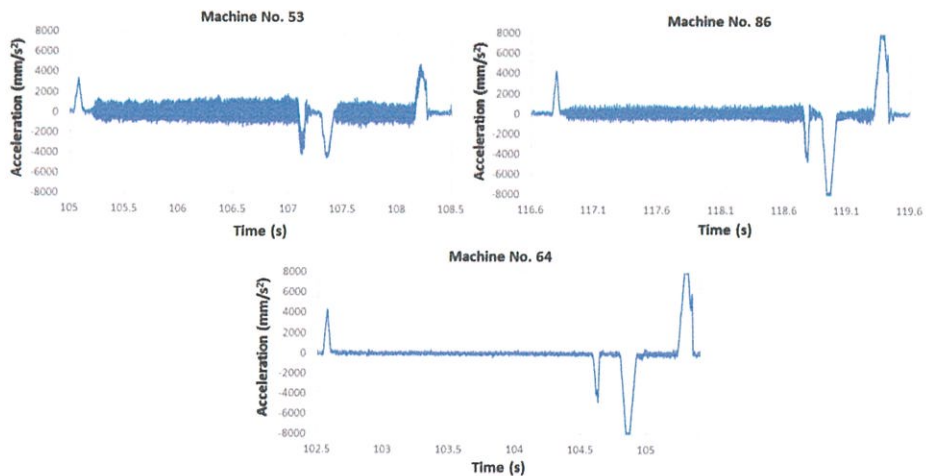
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายเซ็นเซอร์โหนดที่สร้างขึ้น

3.1.3 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์โหนด

จากงานวิจัยในขั้นตอนที่ผ่านมาซึ่งเป็นการออกแบบเซ็นเซอร์โหนดเพื่อใช้ในการวัดค่าความเร่งของชุดนำทางเชิงเส้น ในขั้นตอนถัดไปคือ การนำเซ็นเซอร์โหนดไปทดลองใช้งานจริงโดยนำเซ็นเซอร์โหนดดังกล่าวไปติดตั้งไว้บนฐานแกนเลื่อนของชุดนำทางเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ผลจากการวัดความเร่งของบอลสกรูในชุดนำทางเชิงเส้น ในขณะที่มีการตัดชิ้นงานแผ่นเวเฟอร์ชนิด 64L-NQFN-9x9 mm 4CH Package ด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดนำทาง 125 mm/s ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.11

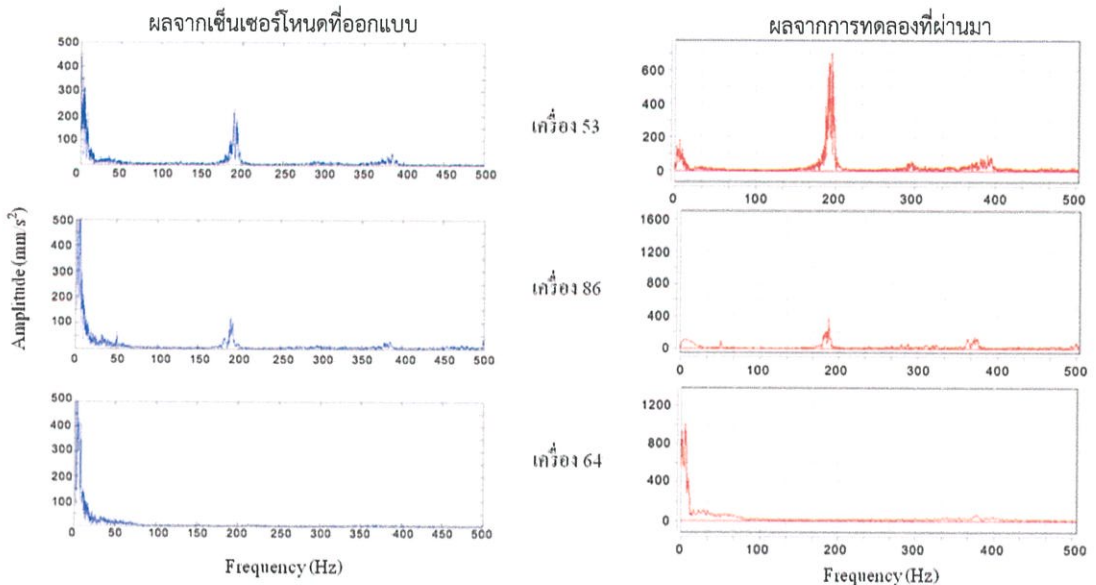


รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์โหนด



รูปที่ 3.11 ผลการวัดค่าความเร่งของบอลสกรูในชุดนำทางเชิงเส้น

จากนั้นจึงนำค่าความเร่งที่ได้จากการวัด มาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่ได้จากการวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดลองที่ผ่านมา ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวได้แสดงในรูปที่ 3.12

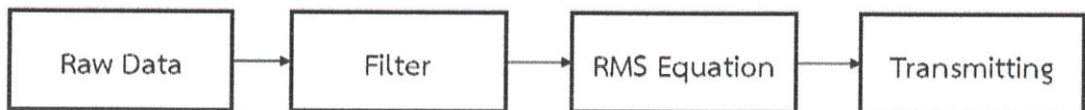


รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 3.12 สังเกตได้ว่าแอมพลิจูด (Amplitude) ของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากค่า DC Offset ของเซ็นเซอร์โหนดที่สร้างขึ้น จึงทำให้เกิดแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 0 Hz ขึ้น แต่ผลค่าความเร่งในช่วง 180 – 200 Hz ที่จะนำมาใช้วินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรูมีลักษณะใกล้เคียงกัน (แอมพลิจูดของแต่ละความถี่อาจแตกต่างกันเนื่องจากเวลาที่วัดต่างกัน)

3.1.4 การจัดการข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด

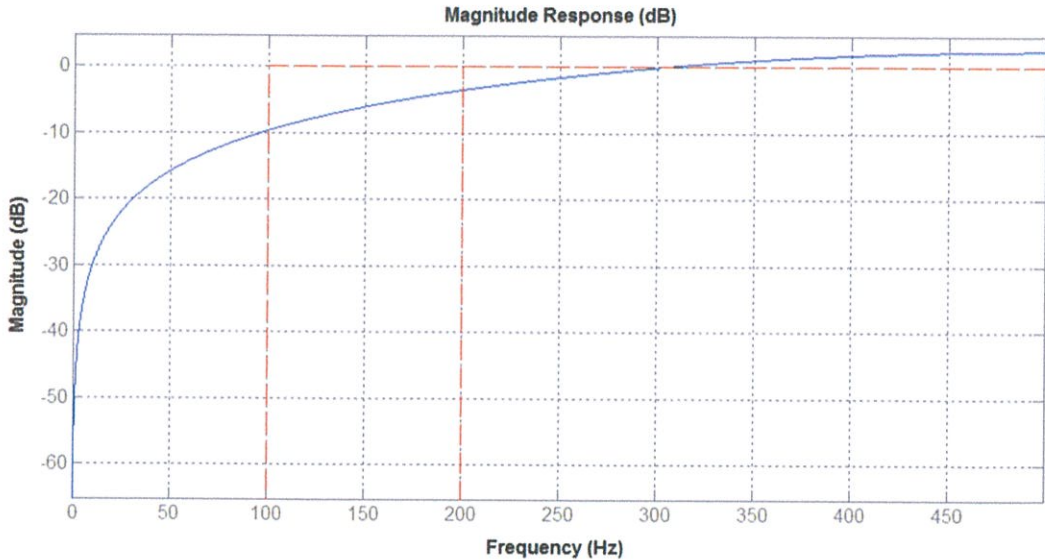
ขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับปรุงข้อมูลความเร่งที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถแบ่งแยกเครื่องจักรที่บอลสกรูที่มีรอยบิ่นออกจากเครื่องจักรที่บอลสกรูมีสภาพปกติได้ โดยขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.13



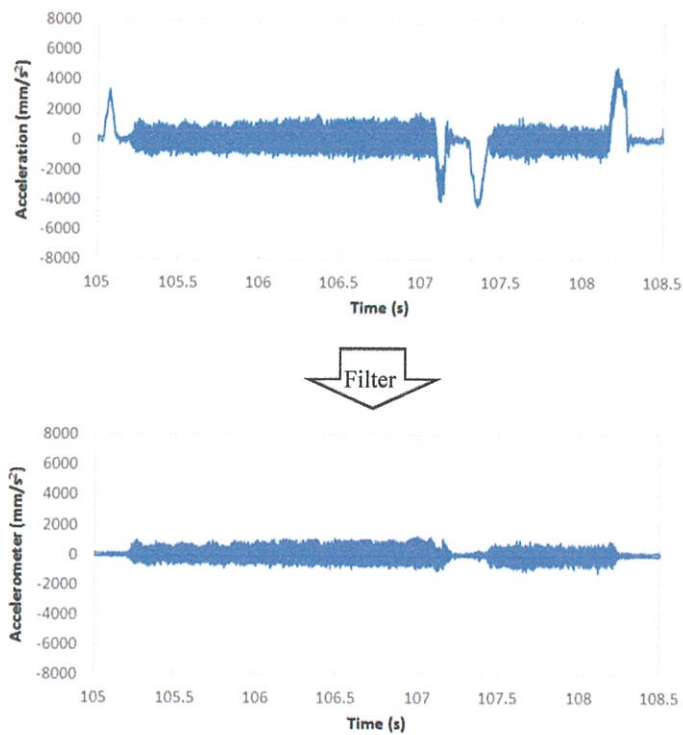
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลของเซ็นเซอร์โหนด

ขั้นตอนแรกของการประมวลผลข้อมูลทำโดยการนำข้อมูลมากรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และเนื่องจากตัวเซ็นเซอร์มีแบนด์วิดท์ซึ่งทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ภายในอยู่แล้ว จึงทำให้ข้อมูลที่ถูกรองออกมา เป็นข้อมูลการสั่นสะเทือน

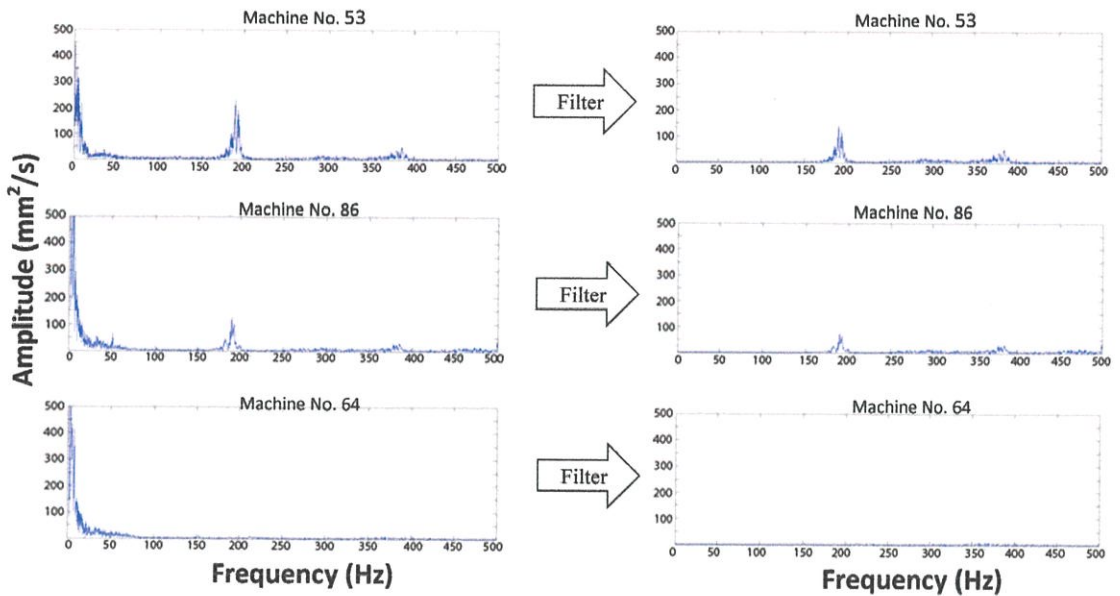
เฉพาะช่วงความถี่ 180 – 200 Hz ตัวกรองความถี่สูงผ่านที่ใช้เป็นตัวกรองดิจิทัลลำดับสามความถี่สูงผ่านแบบ FIR (Digital FIR-High Pass Filter 3th order) ที่มีผลตอบสนองเชิงความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ผลหลังจากกรองข้อมูลด้วยตัวกรองดังกล่าวได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.15 และผลการเปรียบเทียบข้อมูลในโดเมนความถี่แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองความถี่สูงผ่าน



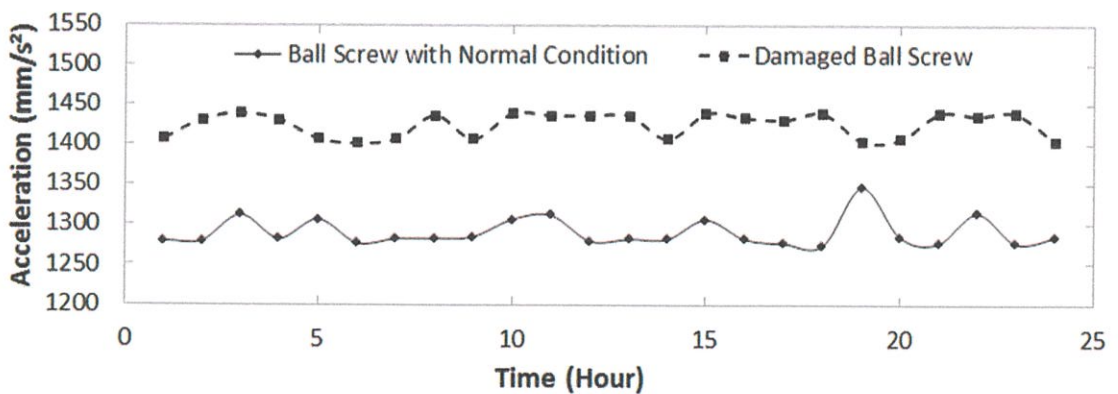
รูปที่ 3.15 ผลการนำข้อมูลความเร่งมากรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านในโดเมนเวลา



รูปที่ 3.16 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังกรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านในโดเมนความถี่

จากรูปที่ 3.16 จะพบว่า หลังกรองข้อมูลด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านแล้ว ข้อมูลจะถูกตัดความถี่ต่ำออกไป และเหลือเฉพาะค่าความถี่ในช่วง 180 – 200 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่จะใช้ในการวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู สังเกตจากเครื่องที่ 64 ซึ่งเป็นเครื่องที่บอลสกรูมีสภาพปกติ หลังกรองข้อมูลด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านแล้วจะพบว่า มีความถี่ในการสั่นสะเทือนต่างๆ ต่ำมาก เนื่องจากไม่มีความถี่ที่เกิดขึ้นจากรอยบิ่นของบอลสกรู

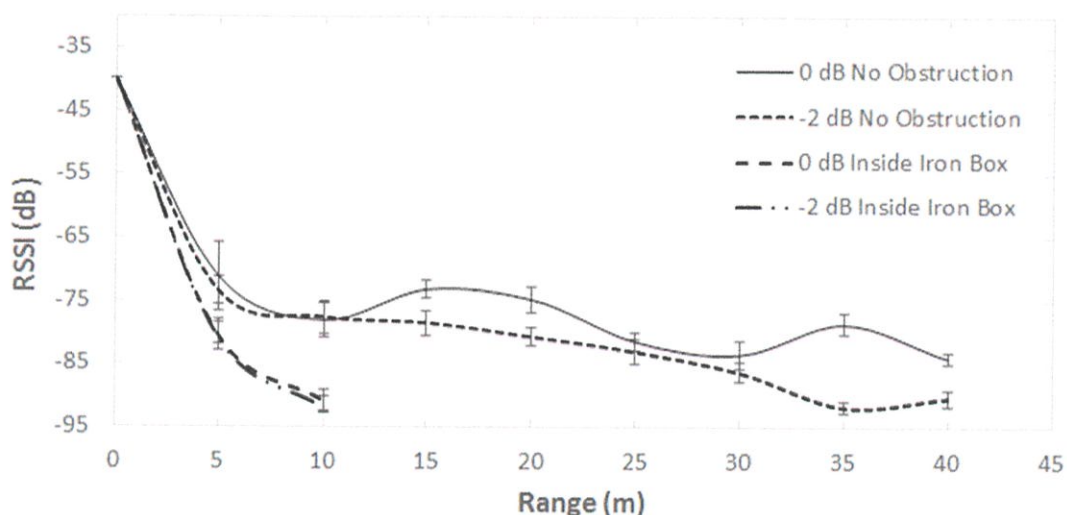
ขั้นตอนถัดไปเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการกรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านมาหาค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square : RMS) โดยจะเก็บข้อมูลจำนวน 1000 ข้อมูลแล้วนำมาหาค่ารากเฉลี่ยกำลังสองตามเวลาจริงทุกๆ 1 วินาที แล้วส่งผลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลให้ผู้ใช้งาน ในรูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดในแต่ละชั่วโมงจากเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่นและบอลสกรูปกติ



รูปที่ 3.17 ผลการวัดข้อมูลจากเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นและเครื่องที่บอลสกรูปกติ

3.1.5 การทดสอบหาความเข้มการส่งสัญญาณของเซ็นเซอร์ไรยนต์

ขั้นตอนถัดไปเป็นการทดสอบหาความเข้มสัญญาณ (Receive Signal Strength Indicator : RSSI) ของโมดูลส่งสัญญาณไร้สาย เพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมในการวางเซ็นเซอร์ไรยนต์ โดยที่ยังสามารถส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบทำโดยการต่อโมดูลส่งสัญญาณไร้สาย Xbee Series 2 จำนวน 2 โมดูลเข้ากับคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องและนำไปไว้ในระยะต่างๆ ในที่โล่ง คือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เมตรตามลำดับ และเนื่องจากเครื่องจักรตัดแบ่งยูนิทมีโครงเป็นโลหะซึ่งทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านได้ยาก จึงต้องทดสอบโดยนำโมดูลส่งสัญญาณใส่ไว้ในกล่องโลหะ และทดสอบส่งข้อมูลโดยใช้ระยะต่างๆ เท่ากับการทดสอบครั้งแรก ในการทดสอบจะทดสอบโดยปรับกำลังส่งของโมดูลส่งสัญญาณไร้สายไว้ที่ 0 dB และ -2 dB ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ค่าความเข้มของสัญญาณเทียบกับระยะทาง

จากรูปที่ 3.18 พบว่า ค่าความเข้มของสัญญาณมีลักษณะแปรผกผันกับระยะทาง หากระยะทางระหว่างโมดูลส่งและโมดูลรับมากขึ้นค่าความเข้มของสัญญาณจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเข้มสัญญาณของการส่งข้อมูลผ่านกล่องเหล็กมีค่าต่ำกว่าความเข้มสัญญาณการส่งข้อมูลในที่โล่งมาก และที่ระยะมากกว่า 10 เมตร การส่งข้อมูลผ่านกล่องเหล็กมีการสูญหายของข้อมูลมากกว่า 90% จึงสรุปได้ว่า ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ไรยนต์ ในการส่งข้อมูลผ่านกล่องเหล็กควรมีค่าน้อยกว่า 10 เมตร เพื่อลดการสูญหายของข้อมูลที่ต้องการจะส่ง

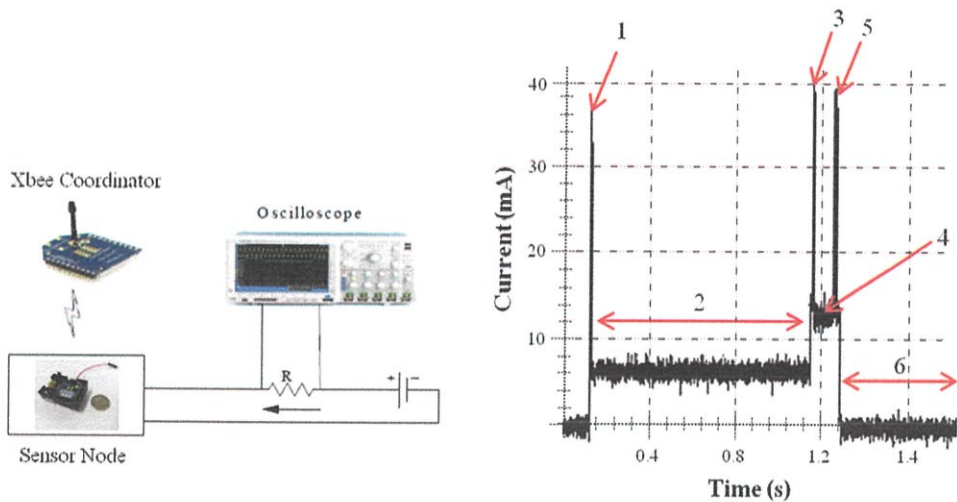
3.1.6 การทดสอบหาการใช้พลังงานของเซ็นเซอร์ไรยนต์

ขั้นตอนนี้เป็น การนำเซ็นเซอร์ไรยนต์ที่สร้างขึ้น มาทดสอบหาอัตราการใช้พลังงานของเซ็นเซอร์ไรยนต์ โดยจะคำนวณหาพลังงานที่เซ็นเซอร์ไรยนต์ใช้งานจากค่ากระแสที่วัดได้ และเปรียบเทียบกับเดต้าชีท (Datasheet) ของอุปกรณ์ ซึ่งจากเดต้าชีทของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ได้แสดงอัตราการใช้กระแสในสภาวะต่างๆ ไว้ดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราการใช้กระแสของอุปกรณ์ต่างๆ ในเซ็นเซอร์โหนดที่แสดงในเดต้าชีท

Device		Current Consumption
Zigbee (Xbee Series 2)	Idle mode ($I_{z,i}$)	10 mA
	Listen and Transmission ($I_{z,t}$)	40 mA
	Hibernate ($I_{z,h}$)	1 μ A
Microcontroller (ATMEGA168)	Supply Current ($I_{m,t}$)	6 mA @ 16 Mhz
	Hibernate Current ($I_{m,h}$)	1.6 μ A
Sensor (ADXL203)	Sensor Supply Current (I_t)	700 μ A

ในการทดสอบหาค่ากระแสใช้งาน จะทำการต่อตัวต้านทานอนุกรมกับเซ็นเซอร์โหนด และวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานดังรูปที่ 3.19 จากนั้นใช้กฎของโอห์มเพื่อคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแสที่เซ็นเซอร์โหนดใช้งาน ผลการวัดค่ากระแสดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.19



(ก) วิธีการต่อวงจรเพื่อหากระแส

(ข) ลักษณะการใช้กระแสของเซ็นเซอร์โหนด

รูปที่ 3.19 การทดสอบหากระแสของเซ็นเซอร์โหนด

จากรูปที่ 3.19 จะพบว่าเซ็นเซอร์โหนดมีช่วงการทำงานแบ่งออกได้เป็น 6 ช่วง ที่มีอัตราการใช้งานกระแสแตกต่างกันคือ

ช่วงที่ 1 ช่วงไมโครคอนโทรลเลอร์ตื่นจากสภาวะประหยัดพลังงาน

ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เปลี่ยนจากสภาวะประหยัดพลังงาน เป็นสภาวะทำงาน (Active State) ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสสูงในระยะเวลาสั้นๆ

ช่วงที่ 2 ช่วงไมโครคอนโทรลเลอร์วัดข้อมูล

ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ในสภาวะทำงาน ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะจ่ายกระแสไฟให้กับเซ็นเซอร์วัดความเร่งเพื่อให้เซ็นเซอร์วัดความเร่งทำงานและวัดข้อมูล ในช่วงนี้

กระแสไฟผ่านเซ็นเซอร์โหนดที่วัดได้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 6.74 mA ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลอัตราการใช้กระแสจากเตต้าซีท ระยะเวลาที่เซ็นเซอร์โหนดอยู่ในช่วงนี้คือ 1.05 วินาที

ช่วงที่ 3 ช่วงโมดูลส่งสัญญาณไร้สายตื่นจากสภาวะประหยัดพลังงาน

ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่โมดูลส่งสัญญาณไร้สายเปลี่ยนจากสภาวะประหยัดพลังงานเป็นสภาวะเตรียมรับส่งข้อมูล (Idle State) ซึ่งในช่วงนี้จะมีการใช้กระแสสูงในระยะเวลาสั้นๆ

ช่วงที่ 4 ช่วงโมดูลส่งสัญญาณไร้สายเตรียมรับส่งข้อมูล

ในช่วงนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดการจ่ายกระแสไปยังเซ็นเซอร์วัดความแรงเพื่อลดการใช้กระแส และส่งข้อมูลที่วัดได้เข้าไปยังบัฟเฟอร์ของโมดูลส่งสัญญาณไร้สาย เพื่อให้โมดูลส่งสัญญาณไร้สายเตรียมส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ ในช่วงนี้กระแสไฟที่ไหลผ่านเซ็นเซอร์โหนดมีค่าประมาณ 14 mA ซึ่งมีค่าน้อยกว่าข้อมูลอัตราการใช้กระแสจากเตต้าซีทประมาณ 2.7 mA ระยะเวลาที่เซ็นเซอร์โหนดอยู่ในช่วงนี้คือ 150 ms

ช่วงที่ 5 ช่วงโมดูลส่งสัญญาณไร้สายส่งข้อมูล

ในช่วงนี้โมดูลส่งสัญญาณไร้สายจะส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ โดยส่งข้อมูล 1 ไบต์ ซึ่งใช้เวลาในการส่งประมาณ 6 ms อัตราการใช้กระแสไฟของเซ็นเซอร์โหนดในช่วงนี้ที่วัดได้มีค่าประมาณ 39 mA ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการใช้กระแสจากเตต้าซีทอยู่ประมาณ 7 mA

ช่วงที่ 6 ช่วงเข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงาน

ในช่วงนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์และโมดูลส่งสัญญาณไร้สายจะเปลี่ยนสภาวะไปอยู่ในสภาวะประหยัดพลังงานเพื่อลดอัตราการใช้กระแส อัตราการใช้กระแสที่วัดได้ในช่วงนี้มีค่าอยู่ที่ 6.5 μ A ในขณะที่ Watchdog Timer ทำงานและ 2.6 μ A ในขณะที่ Watchdog Timer ไม่ทำงาน

กราฟในรูปที่ 3.19 สามารถนำมาใช้หาค่ากระแสเฉลี่ยได้โดยการหาค่าประจุ (พื้นที่ใต้กราฟ กระแส - เวลา) แล้วนำไปหารด้วยเวลาทั้งหมด ซึ่งจะได้ว่าค่ากระแสเฉลี่ยมีค่า 7.97 mA ในกรณีที่ใช้แรงดัน 3.3V จะทำให้สามารถหาค่าพลังงานเฉลี่ยที่เซ็นเซอร์โหนดใช้งานได้ว่ามีค่าประมาณ 26.3 mW

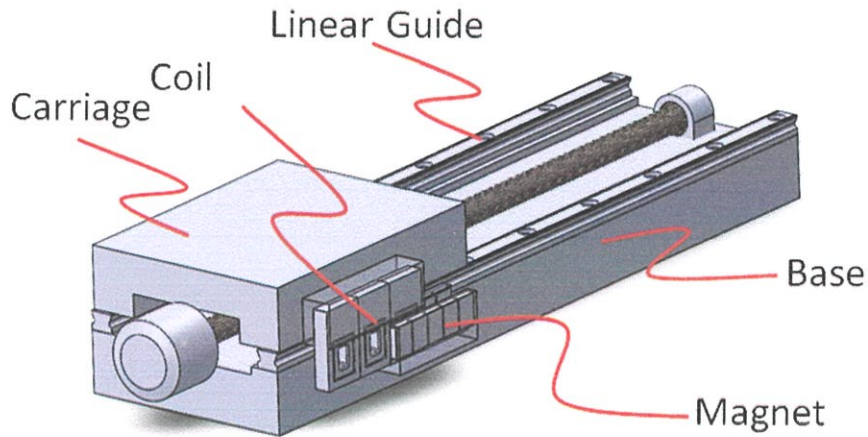
3.2 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากการออกแบบเซ็นเซอร์โหนดและทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซ็นเซอร์โหนดแล้ว ในขั้นตอนถัดมาจะเป็นการออกแบบ และทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อนำมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 5 ขั้นตอนย่อยดังนี้

3.2.1 การออกแบบและภาพรวมอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

ถึงแม้ว่าภายในเครื่องจักรจะมีแหล่งพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวได้อยู่หลายแห่ง แต่การวัดการสั่นสะเทือนของบอลสกรู เซ็นเซอร์โหนดต้องถูกติดตั้งไว้บนฐานแกนเลื่อนของชุดนำทางเชิงเส้น ซึ่งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานควรอยู่บนฐานแกนเลื่อนเช่นเดียวกับเซ็นเซอร์โหนดเพื่อให้ระบบรวมอยู่ในที่เดียวกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากบอลสกรูเป็นอุปกรณ์สำหรับการทำงานที่ต้องการความ

แม่นยำสูง โดยส่วนมากบอลสกรูที่มีสภาพปกติจะมีการสิ้นสะท้อนต่ำ จึงทำให้การเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยหลักการเพียโซอิเล็กทริกและไฟฟ้าสถิตเป็นไปได้ยาก ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกลโดยใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นของฐานแกนเลื่อนบนบอลสกรู ภาพรวมของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ออกแบบมา และการติดตั้งกับชุดนำทางเชิงเส้นได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.20

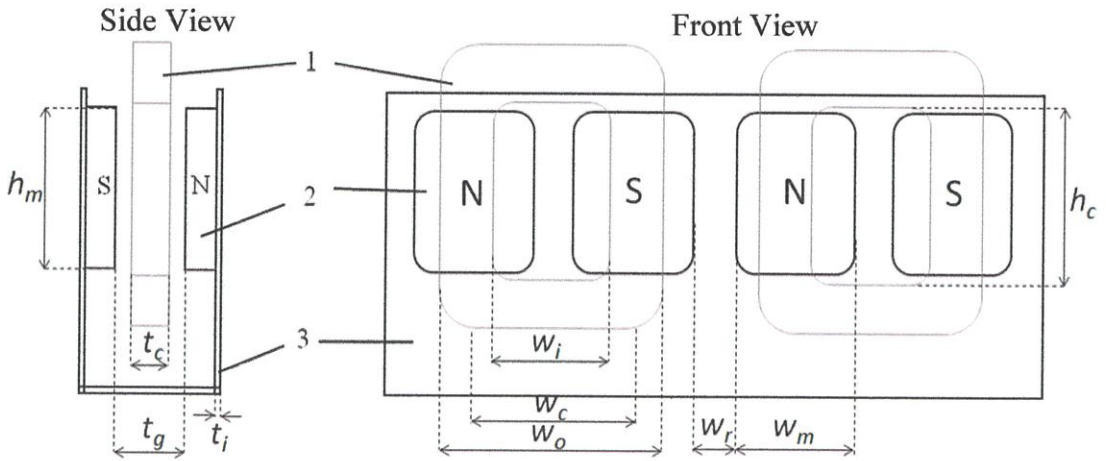


รูปที่ 3.20 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ชุดขดลวดและสล็อตแม่เหล็ก โดยแนวคิดในการติดตั้งคือ ติดตั้งชุดขดลวดไว้กับชุดเซ็นเซอร์โหนดบนฐานแกนเลื่อนของชุดนำทางเชิงเส้น ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ขณะที่เครื่องจักรตัดชิ้นงาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของฐานแกนเลื่อนขณะตัดสามารถตั้งได้ระหว่าง 75 mm/s ถึง 250 mm/s แต่การตัดชิ้นงานทั่วไปจะตัดที่ความเร็ว 125 mm/s ในส่วนของสล็อตแม่เหล็กจะติดตั้งไว้กับฐานของชุดนำทางเชิงเส้น (ไม่มีการเคลื่อนที่ขณะเครื่องตัดชิ้นงาน) โดยจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นโครงเหล็กรูปตัว U มีแม่เหล็กติดอยู่สองข้าง และมีระยะห่างให้ขดลวดสามารถผ่านตรงกลางได้ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เมื่อฐานแกนเลื่อนของชุดนำทางเชิงเส้นมีการเคลื่อนที่ขณะตัดชิ้นงาน ขดลวดที่ติดตั้งไว้บนฐานแกนเลื่อนจะเคลื่อนที่ไปตัดผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแม่เหล็กทั้ง 2 ก้อน การติดตั้งขดลวดไว้กับชุดเซ็นเซอร์ซึ่งอยู่บนฐานแกนเลื่อนทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการตัดผ่านแม่เหล็กของขดลวดสามารถส่งไปยังชุดเซ็นเซอร์ได้โดยตรง และไม่ต้องมีสายไฟเชื่อมเข้าไปยังเซ็นเซอร์โหนดทำให้มีความสะดวกในการติดตั้ง

3.2.2 การหาการวางตัวของขดลวดและแม่เหล็กที่เหมาะสม

ในการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า การวางตัวของแม่เหล็ก ขนาดของขดลวด และขนาดของช่องว่างอากาศระหว่างแม่เหล็กกับขดลวด ต้องมีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านกับขดลวดสูงที่สุด การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยประยุกต์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรแนวราบ (Axial Flux Permanent Magnet Generator : AFPM Generator) [81,82] รูปแบบการวางตัวของขดลวดและแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.21



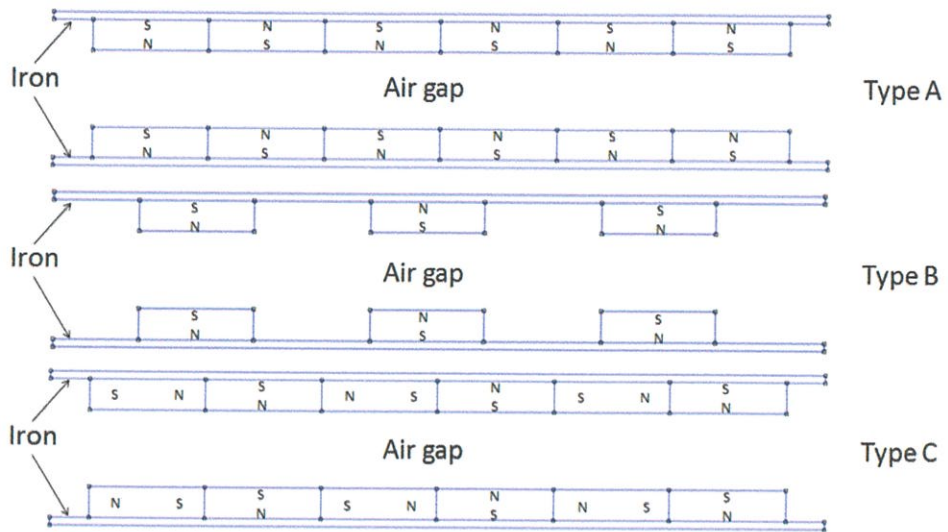
รูปที่ 3.21 ลักษณะการวางตัวของขดลวดและแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.21 หมายเลข 1 คือขดลวด หมายเลข 2 คือแม่เหล็ก และหมายเลข 3 คือโครงเหล็ก แม่เหล็กจะถูกติดอยู่บนโครงเหล็กรูปตัว U เพื่อให้โครงเหล็กดังกล่าวทำหน้าที่ในการป้องกันสนามแม่เหล็กรั่วไหลออกไปด้านนอก ขดลวดจะเคลื่อนที่ผ่านกึ่งกลางระหว่างแม่เหล็กทั้ง 2 ชั้น จากหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรแนวราบ ความกว้างของขดลวด (w_c) ควรมีค่ามากกว่าพอที่จะทำให้ขดลวดสามารถตัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กคู่แรกและคู่ที่สองได้ เพื่อให้เกิดกระแสในขดลวดทิศทางเดียวกันเมื่อขดลวดตัดผ่านคู่แม่เหล็กทั้งสองคู่ เพื่อให้ความกว้างมากเพียงพอ ความกว้างของขดลวดสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$w_c = w_m + w_r \quad (3.1)$$

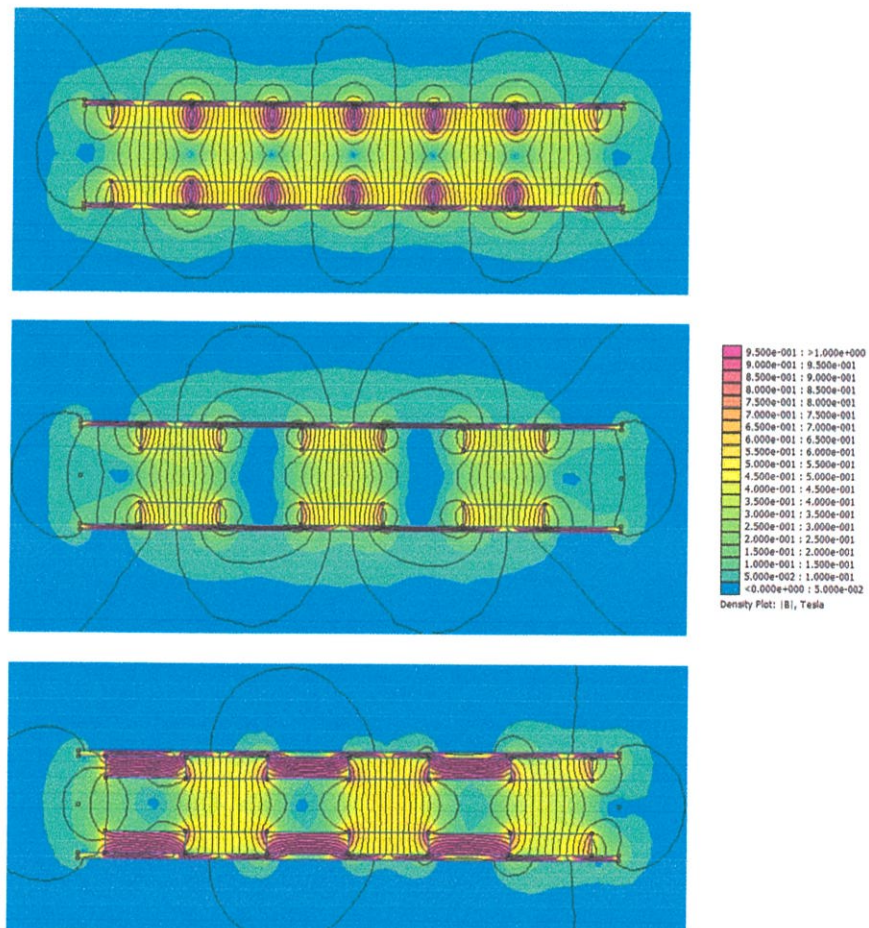
เมื่อ w_m คือ ความกว้างของแม่เหล็ก และ w_r คือ ความกว้างของระยะด้านข้างระหว่างแม่เหล็ก นอกจากนี้เพื่อที่จะลดการสูญเสียพลังงานจากการสูญเสียกระแสวน (Eddy Current Loss) ความสูงของขอบในของขดลวด (h_c) ควรมีค่าสูงกว่าความสูงของแม่เหล็ก (h_m)

ในขั้นถัดมาจะเป็นการออกแบบการวางตัวของแม่เหล็ก โดยจะใช้การจำลองสนามแม่เหล็กแบบ 2 มิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) โปรแกรม FEMM 4.2 [83] เพื่อจำลองทิศทาง และขนาดของสนามแม่เหล็กที่อยู่ตรงกลางระหว่างแม่เหล็กสองก้อน การจำลองจะทำกับรูปแบบการวางตัวของแม่เหล็กทั้งหมด 3 รูปแบบคือ แบบ A, B และ C ดังแสดงในรูปที่ 3.22 การวางตัวแม่เหล็กแบบ A และ B เป็นการวางตัวแบบสลับขั้วของแม่เหล็กจากเหนือไปได้ การวางตัวแม่เหล็กแบบ A จะวางแม่เหล็กที่สลับขั้วกันติดกันเป็นจำนวน 5 ก้อน ในขณะที่การวางตัวแม่เหล็กแบบ B จะวางแม่เหล็กให้ห่างกันเป็นระยะทางเท่ากับ 1 ก้อนแม่เหล็กเป็นจำนวน 3 ก้อน หลักการออกแบบการวางตัวทั้ง 2 แบบนี้เกิดจากการประยุกต์หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรแนวราบ การวางตัวแม่เหล็กแบบ C เป็นการวางตัวที่นำการวางตัวแม่เหล็กแบบ Hallbach Array มาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะมีผลในการเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นเป็น 2 เท่าในด้านหนึ่งของแม่เหล็กแต่จะทำให้สนามแม่เหล็กในอีกฝากหนึ่งของแม่เหล็กหายไป

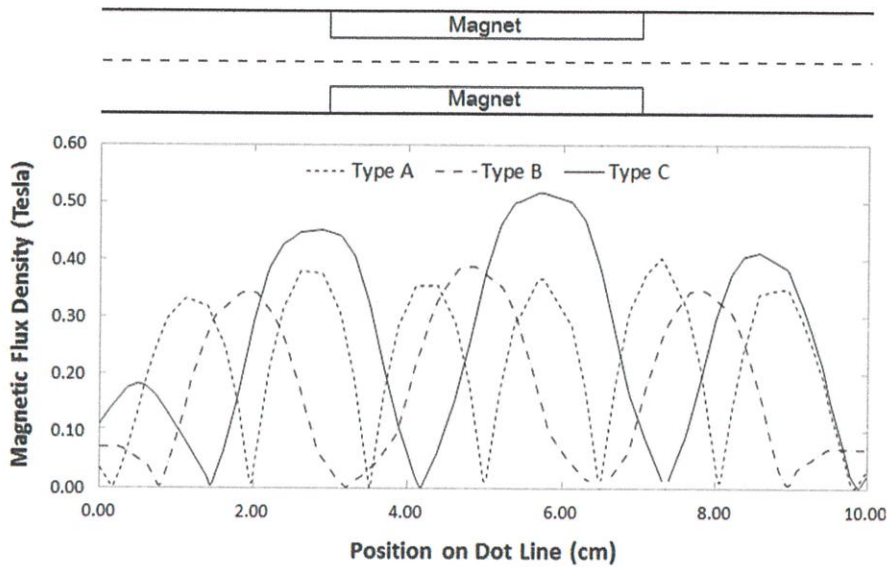


รูปที่ 3.22 ลักษณะการวางตัวของแม่เหล็กทั้ง 3 รูปแบบ

ในการจำลองได้ใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของการวางตัวแม่เหล็กทั้ง 3 รูปแบบในระบบ 2 มิติ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.23 และผลแสดงความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งบนเส้นประ ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของการวางตัวแม่เหล็กทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 3.24 กราฟสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวเส้นประ

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองการวางตัวของแม่เหล็ก

Parameter	Value
Magnet Type	NeFeB (N35)
Number of Magnets	6 - 12
Casing Material	Iron
Magnet Size	15 mm x 0.4 mm
Case Thickness (t_c)	1 mm
Air Gap Size (t_g)	10 mm

จากรูปที่ 3.23 และ 3.24 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุดในการวางตัวแบบ C จะมีค่าประมาณ 0.52 Tesla ซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบ A และแบบ B ที่มีค่าประมาณ 0.4 Tesla อย่างไรก็ตามการวางตัวแม่เหล็กแบบ A มีจำนวนของสนามแม่เหล็กมากกว่าแบบ C ซึ่งจะทำให้มีจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กมากกว่าประมาณ 2 เท่า

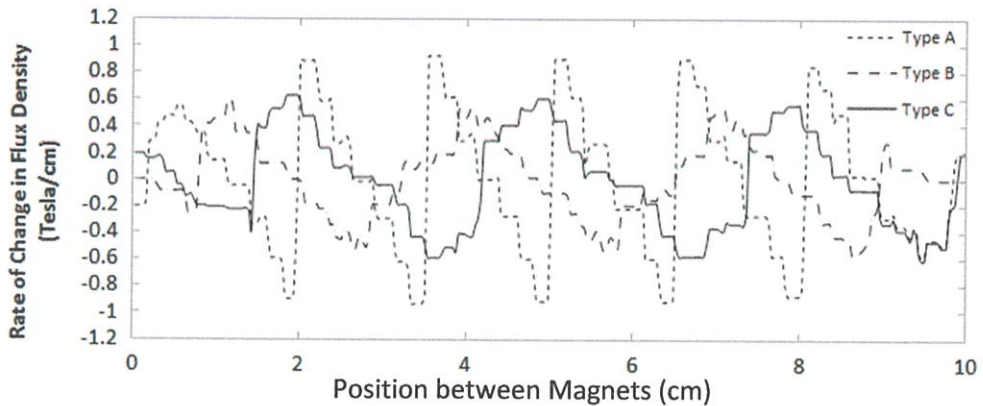
แรงดันที่จะได้จากขดลวดเมื่อขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (3.2)

$$V = NA \frac{dB}{dt} \quad (3.2)$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่จะได้ N คือ จำนวนรอบขดลวด A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ถูกตัดผ่านด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก และ dB/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเทียบกับเวลา จากสมการที่ (3.1) เมื่อแทนค่า dt ด้วย ds/v โดย s คือ ระยะทางและ v คือ ความเร็ว จะได้ความสัมพันธ์กับแรงดันดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$V = NAv \frac{dB}{ds} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) จะพบว่า แรงดัน และขดลวด จะแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเทียบกับระยะทาง (dB/ds) ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเทียบกับระยะทางสามารถหาได้โดยการหาค่าอนุพันธ์ของข้อมูลในกราฟรูปที่ 3.24 ซึ่งได้ผลของการหาค่าอนุพันธ์ของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.25



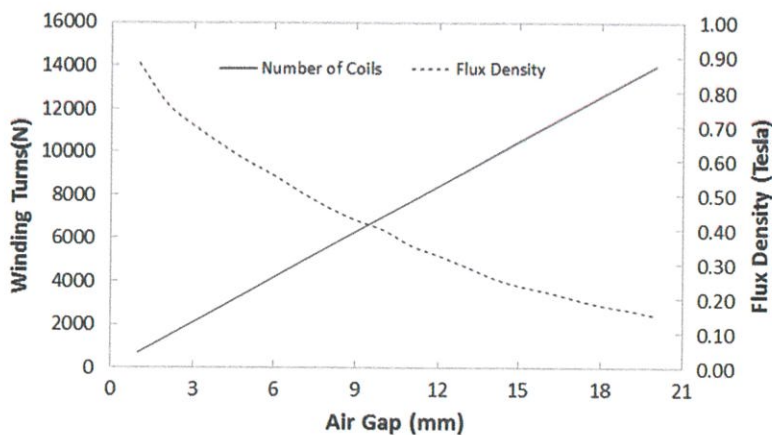
รูปที่ 3.25 อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.25 จะพบว่าการวางตัวของแม่เหล็กแบบ A จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงที่สุด (ประมาณ 0.92 Tesla/cm) ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของการวางตัวแม่เหล็กแบบ B และ C จะอยู่ที่ประมาณ 0.6 Tesla/cm จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า หากใช้ขดลวดขนาดเดียวกันเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กด้วยความเร็วเท่ากัน การใช้การวางตัวแม่เหล็กแบบ A จะได้ค่าแรงดันสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการวางตัวแบบอื่น

3.2.3 การหาระยะห่างระหว่างแม่เหล็กที่เหมาะสม

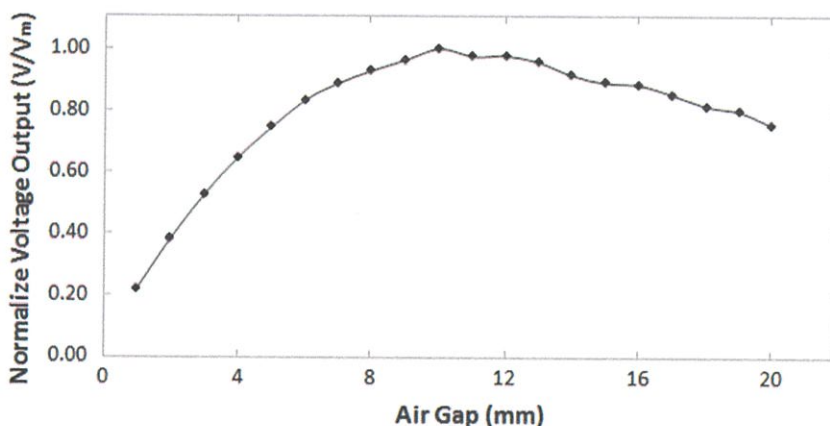
นอกเหนือจากการวางตัวของขดลวดและแม่เหล็กแล้ว ระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก (t_g) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เนื่องจากความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กนั้นแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสองก่อน ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสองก่อนจึงควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของขดลวด (t_c) แปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสองก่อน ซึ่งส่งผลให้เมื่อระยะห่างระหว่างแม่เหล็กมากขึ้น ขดลวดก็จะสามารถมีจำนวนรอบได้มากขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องมีการศึกษาเพื่อให้ได้พลังงานที่สูงที่สุด

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาช่องว่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสองก่อนด้วยการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กเมื่อระยะห่างระหว่างแม่เหล็กมีค่าอยู่ในช่วง 1 – 20 mm ในการทดลองนี้เส้นลวดเบอร์ 43 จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวด ผลการจำลองค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และจำนวนรอบของขดลวดได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและจำนวนรอบของขดลวดกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก

จากนั้นแรงดันจากขดลวดสามารถคำนวณได้โดยแทนค่าข้อมูลที่อยู่ในกราฟรูปที่ 3.26 ลงไปยังสมการที่ (3.3) ผลค่าบรรทัดฐานแรงดัน (Normalized Voltage) เทียบกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.27 ซึ่งจะพบว่าแรงดันสูงสุดจะได้เมื่อค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กคือ 10 mm

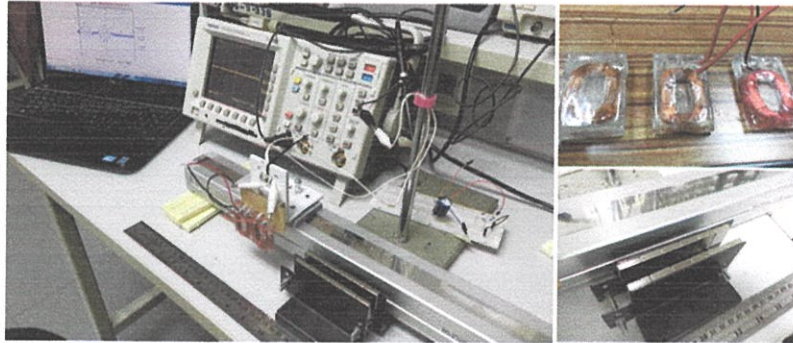


รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันบรรทัดฐานกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก

3.2.4 การหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

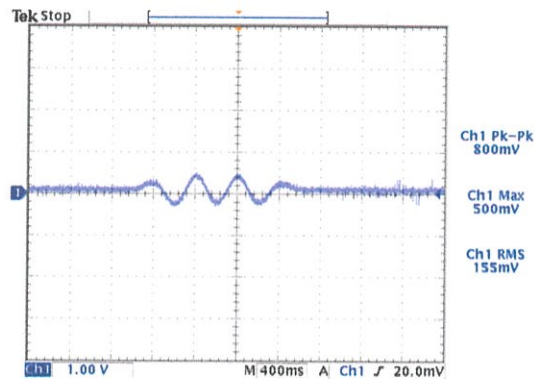
อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ผ่านมา ได้ถูกนำมาติดตั้งเข้ากับชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.28 เพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ชุดทดลองได้ใช้ชุดนำทางเชิงเส้นจาก IAI America รุ่น RCP2-SA6C-I-42P-6-350-P1-S ซึ่งสามารถทำความเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ในช่วง 0 – 175 mm/s เส้นลวดที่ถูกใช้ในการทดลองจะมีอยู่ 3 ขนาดคือ เบอร์ 30, 36 และ 43 เส้นลวดเบอร์ 30 สามารถนำมาพันเป็นขดลวดได้ 350 รอบ และเบอร์ 36 กับ 43 สามารถนำมาพันเป็นขดลวดได้ 1,000 และ 2,500 รอบตามลำดับ เมื่อขนาดความกว้างภายในของขดลวด (w_i) มีค่าอยู่ที่ 10 mm และขนาดความกว้างภายนอกของขดลวด (w_o) มีค่าเท่ากับ 26 mm เส้นลวดที่ถูกพันเป็นขดจะถูกหล่อด้วย เรซินเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในเข้าหล่อขนาด 4.5 cm x 3 cm x 0.8 cm ใน

ส่วนของสล็อตแม่เหล็กจะประกอบไปด้วยแม่เหล็กชนิด NdFeB (N35) ขนาด 2 cm x 1.5 cm x 0.4 cm จำนวน 12 ชิ้น โดยนำมาเรียงกันด้วยรูปแบบการเรียงตัวแบบ A

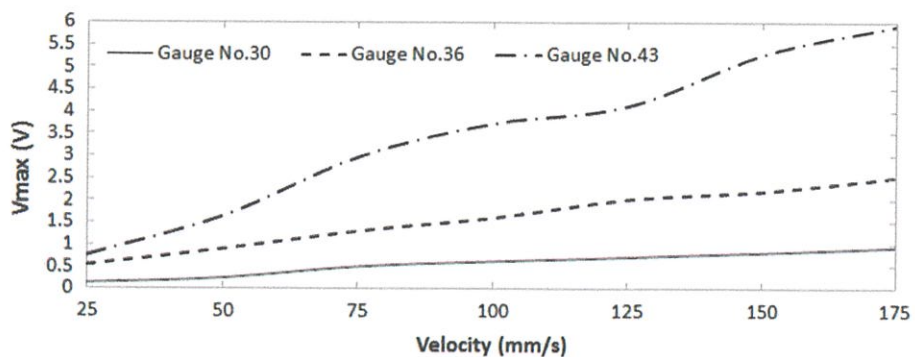


รูปที่ 3.28 ภาพถ่ายของภาพรวมชุดทดลอง (ซ้าย) ขดลวด (ขวาบน) และสล็อตแม่เหล็ก (ขวาล่าง)

ขั้นตอนแรกของการทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะเป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นลวด ความเร็วการเคลื่อนที่ของแกนเลื่อน และแรงดันไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ในการทดลองจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากขดลวดขณะที่เคลื่อนที่ผ่านสล็อตแม่เหล็กด้วยความเร็ว 25 mm/s ถึง 175 mm/s โดยใช้ขดลวดเบอร์ 30, 36 และ 43 ซึ่งลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขดลวดด้วยออสซิลโลสโคปได้แสดงในรูปที่ 3.29 และผลความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นลวด ความเร็วการตัดผ่านสนามแม่เหล็กของขดลวด และแรงดันเอาท์พุทได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.29 ลักษณะแรงดันจากขดลวดเบอร์ 30 ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 75 mm/s

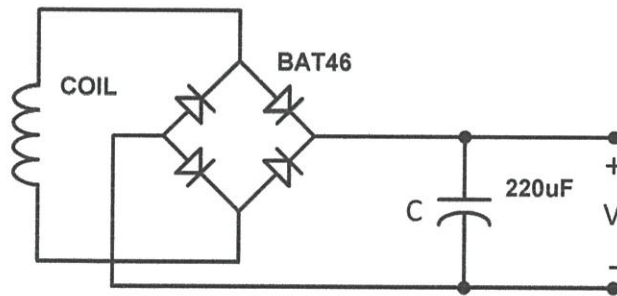


รูปที่ 3.30 แรงดันจากขดลวดเบอร์ต่างๆ ที่ความเร็ว 25 mm/s ถึง 175 mm/s

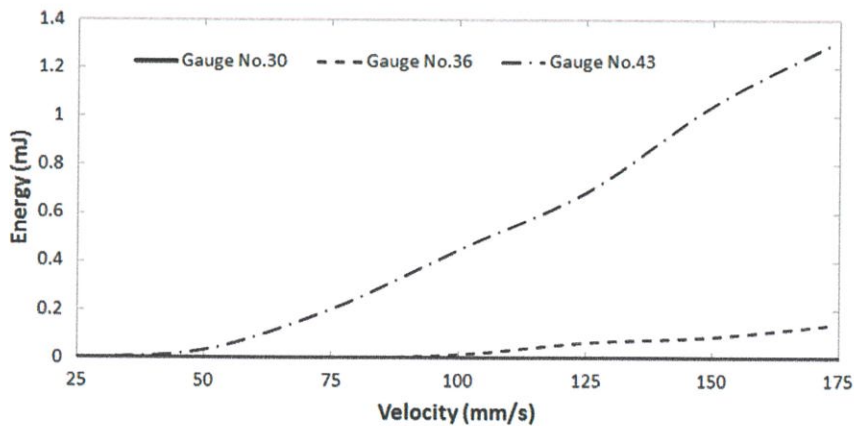
จากรูปที่ 3.30 สามารถสังเกตได้ว่า แรงดันที่ได้จากการเคลื่อนที่ของขดลวดผ่านสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับความเร็วในการตัดผ่านสนามแม่เหล็กของขดลวด ในขณะที่เส้นลวดยังมีขนาดเล็กสามารถให้แรงดันได้มากกว่าเส้นลวดขนาดใหญ่เนื่องจากค่าความต้านทานภายในขดลวดมากกว่าและจำนวนขดลวดต่อขดที่มากกว่าในขนาดที่เท่ากัน (ลวดเบอร์ 30 ได้ 350 รอบ ในขณะที่ลวดเบอร์ 43 ได้ 2500 รอบ) ที่ความเร็ว 175 mm/s แรงดันจากขดลวดเบอร์ 30, 36 และ 43 คือ 0.94 V, 2.52 V และ 5.92 V ตามลำดับ

ขั้นตอนถัดไปเป็นการทดลองเพื่อหาพลังงานเฉลี่ยต่อการตัดผ่านสนามแม่เหล็กของขดลวด 1 ชุด ซึ่งทำโดยการต่อขดลวดเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (ใช้ไดโอดที่มีแรงดันไบแอสตรง ~0.3 V) และนำพลังงานไปเก็บสะสมเอาไว้ในตัวเก็บประจุ 220 μF ดังแสดงในรูปที่ 3.31 จากนั้นวัดค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเพื่อนำมาหาพลังงานเมื่อขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก 1 ครั้งด้วยสมการที่ (3.4) ผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 3.32

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.4)$$



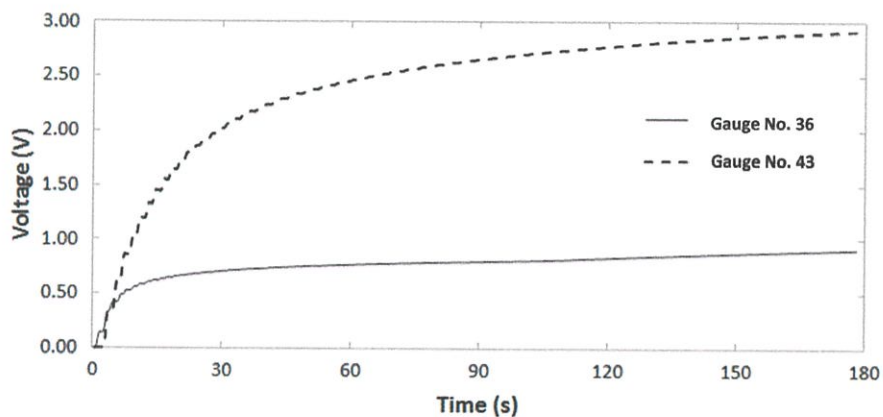
รูปที่ 3.31 การต่อวงจรเพื่อหาค่าพลังงานจากขดลวด



รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจากขดลวดกับความเร็ว

จากรูปที่ 3.32 พบว่าพลังงานจากเส้นลวดเบอร์ 30 ในหลายๆ ค่าความเร็วมีค่าใกล้เคียงกับ 0 เนื่องจากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นซึ่งจะประกอบไปด้วยไดโอดอย่างน้อย 2 ตัวจำเป็นต้องใช้แรงดันไบแอสตรงอย่างต่ำ 0.3 V ต่อตัว ในขณะที่แรงดันจากขดลวดเบอร์ 30 มีค่าน้อยกว่า 0.6 V ในช่วงความเร็ว 25 – 125 mm/s จึงทำให้แรงดันจากขดลวดไม่เพียงพอต่อการไบแอสตรงไดโอดในวงจรเรียงกระแส และในช่วงความเร็ว 125 – 175 mm/s แรงดันที่ได้มีค่ามากกว่า 0.6 V เพียงเล็กน้อยเมื่อนำมาผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแล้วจึงเหลือแรงดันน้อยมากจึงทำให้ค่าที่อ่านได้ใกล้เคียงกับ 0 ด้วยเหตุผลดังกล่าวขดลวดเบอร์ 30 จะไม่ถูกนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนถัดๆ ไป

ขั้นตอนถัดมาเป็นการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานสูงสุดที่ขดลวดแต่ละขนาดสามารถสร้างขึ้นได้ โดยจะหาค่ากราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน กับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ เพื่อหาค่าพลังงานสูงสุดที่ขดลวดสามารถสร้างได้ การทดลองจะเริ่มจากการวัดลักษณะแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 4700 μF เทียบกับเวลาโดยใช้ฮอสซิลโลสโคป ชู่นำทางเชิงเส้นจะเคลื่อนที่ไปกลับเป็นระยะทาง 30 cm ด้วยความเร็ว 175 mm/s เป็นเวลา 180 วินาที แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่วัดได้จากการทดลองได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.33



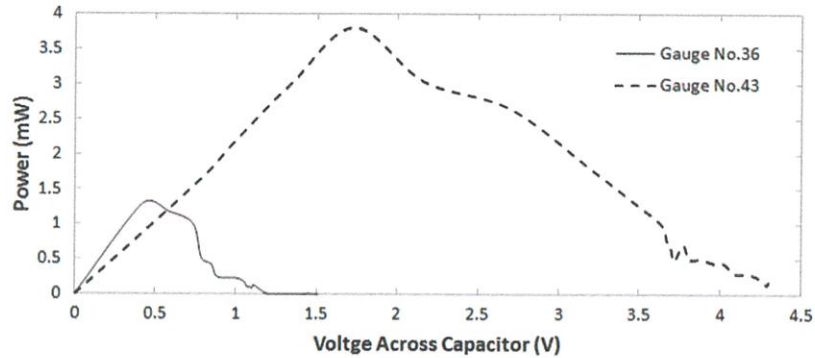
รูปที่ 3.33 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 4700 μF เมื่อใช้ขดลวดเบอร์ 36 และ 43

จากนั้นนำข้อมูลแรงดันไปคำนวณหาพลังงานที่ได้จากขดลวดที่เวลาต่างๆ โดยใช้สูตรที่แสดงอยู่ในสมการที่ (3.5)

$$P(t) = CV(t) \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.5)$$

เมื่อได้พลังงาน ณ ช่วงเวลาต่างๆ จะสามารถหาค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (P-V Curve) ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในช่วงความเร็ว 25 – 175 mm/s ขดลวดเบอร์ 43 สามารถให้พลังงานได้มากกว่าขดลวดเบอร์ 36 ที่ย่านแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงกว่าประมาณ 0.7 V แต่ขดลวดเบอร์ 36 สามารถให้พลังงานได้มากกว่าขดลวดเบอร์ 43 ที่ย่านแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่ำกว่าประมาณ 0.7 V อย่างไรก็ตาม

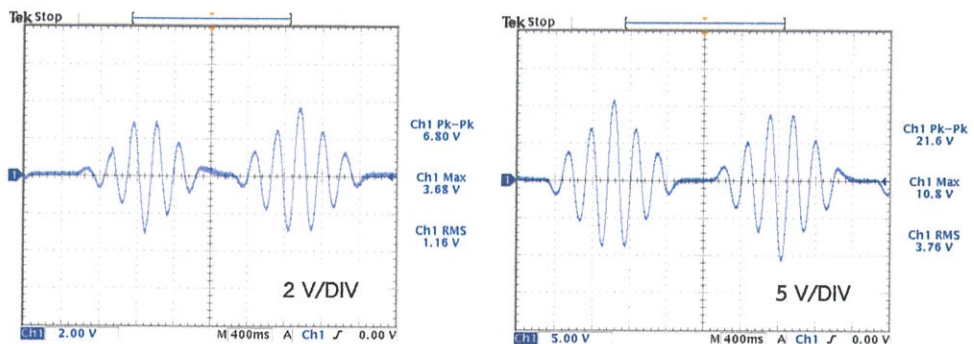
ขดลวดเบอร์ 43 สามารถให้พลังงานสูงสุด (3.8 mW ที่ 1.73 V) สูงกว่าขดลวดเบอร์ 36 (1.29 mW ที่ 0.42 V)



รูปที่ 3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

จากการทดลองที่ผ่านมาจะสรุปได้ว่าในช่วงการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 25 – 175 mm/s การใช้เส้นลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กจะมีความเหมาะสมกว่าการใช้เส้นลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ เนื่องจากสามารถให้แรงดันและกำลังไฟฟ้าที่สูงสุดที่มากกว่า ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะทดลองโดยใช้ขดลวดเบอร์ 43 ซึ่งเป็นเบอร์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดในทั้ง 3 เบอร์ที่นำมาทดลอง

ในขั้นตอนถัดมาจะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลการนำขดลวดมาต่ออนุกรมและต่อขนาน การทดลองจะทำการนำขดลวดเบอร์ 43 จำนวน 3 ขดมาต่ออนุกรมและขนานกัน นำไปติดตั้งกับชุดทดลองและปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ให้อยู่ที่ 125 mm/s แล้ววัดแรงดันจากขดลวดดังกล่าวด้วยออสซิลโลสโคป ผลสัญญาณแรงดันที่วัดได้ขณะที่ขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กทั้งไปและกลับได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.35 ซึ่งจะพบว่าแรงดันสูงสุดจากการต่อขนานคือ 3.68 V ในขณะที่แรงดันสูงสุดจากการต่ออนุกรมคือ 10.80 V



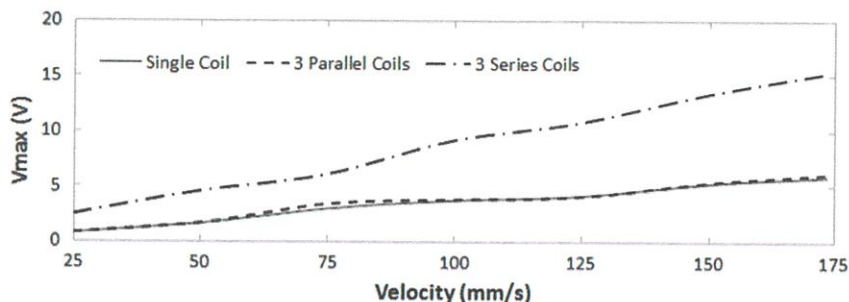
(ก) ขดลวด 3 ขดต่อขนาน

(ข) ขดลวด 3 ขดต่ออนุกรม

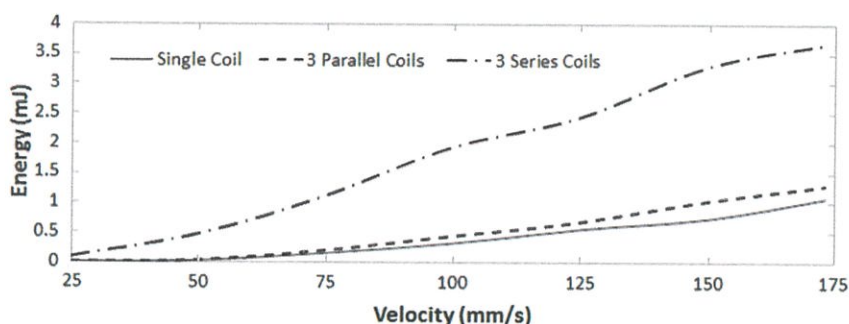
รูปที่ 3.35 สัญญาณแรงดันที่วัดได้จากขดลวด

ผลการวัดค่าแรงดันสูงสุดและพลังงานที่ได้จากการต่อขดลวดทั้ง 2 แบบ ที่ความเร็วตั้งแต่ 25 – 175 mm/s ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.36 และ 3.37 ตามลำดับ โดยทำการทดลองด้วยวิธีการเดียวกับในขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งจากรูปที่ 3.36 จะพบว่าแรงดันจากขดลวดขดเดียวและขดลวดที่ถูกต่อขนาน 3 ขดมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ ความเร็ว ในขณะที่ขดลวดที่ถูกต่ออนุกรม 3 ขดจะได้แรงดันสูง

กว่าขดลวดเดี่ยวประมาณ 2 – 2.5 เท่า จากรูปที่ 3.37 จะพบว่าถ้าขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว 175 mm/s พลังงานจากขดลวดที่ต่ออนุกรมกัน 3 ขดจะอยู่ที่ 3.7 mJ ในขณะที่พลังงานจากขดลวดที่ต่อขนานกัน 3 ขด และขดลวดเดี่ยวอยู่ที่ 1.3 mJ และ 1.1 mJ ตามลำดับ

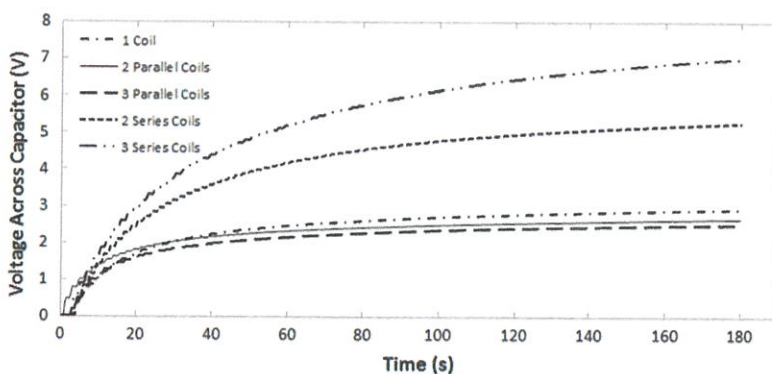


รูปที่ 3.36 แรงดันจากขดลวดที่ต่ออนุกรมและขนานที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 3.37 พลังงานจากขดลวดที่ต่ออนุกรมและขนานที่ความเร็วต่างๆ

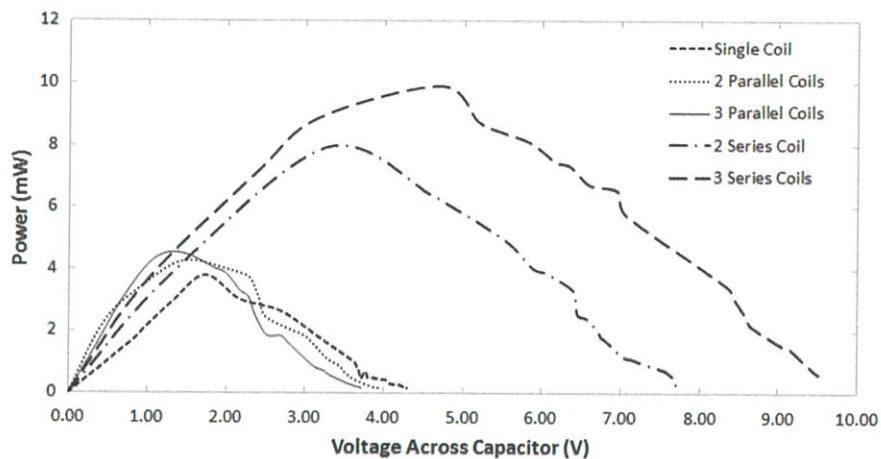
จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาพลังงานสูงสุด ด้วยการต่อขดลวดเข้ากับวงจรเรียงกระแสและตัวเก็บประจุเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา เพื่อเก็บข้อมูลลักษณะแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาต่างๆ การทดลองทำโดยติดตั้งขดลวดจำนวน 3 ขดเข้ากับชุดทดลอง ปรับความเร็วการเคลื่อนที่ให้มีค่า 175 mm/s และนำไปชาร์จเข้าตัวเก็บประจุขนาด 4700 μF เป็นเวลา 180 วินาที รูปที่ 3.38 ได้แสดงผลลักษณะแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุภายในเวลา 180 วินาทีที่เก็บข้อมูล โดยเปรียบเทียบระหว่างขดลวดขดเดี่ยว และการต่ออนุกรมกับการต่อขนานกัน 2 ขดและ 3 ขดตามลำดับ



รูปที่ 3.38 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจากการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรม

จากรูปที่ 3.38 พบว่ากราฟแรงดันจากขดลวดขดเดียวกับแรงดันจากการต่อขดลวดขนานกัน 2 และ 3 ขดลวด มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแรงดันจากขดลวดที่ต่อขนานกันมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากขดลวดทั้ง 3 ขดไม่สามารถให้แรงดันได้เท่ากัน เมื่อนำมาต่อขนานกันแรงดันรวมที่ได้จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ต่ำที่สุดที่เกิดจากขดลวด 1 ใน 3 ขดลวดนั้น แต่ขดลวด 1 ขดที่นำมาแสดงในกราฟเป็นขดลวดที่ให้แรงดันออกมาสูงที่สุดในขดลวดทั้ง 3 ขด จึงทำให้แรงดันจากขดลวดเดียวมีค่ามากกว่าแรงดันจากการนำมาต่อขนานกัน

นอกจากนี้ จะพบว่าแรงดันจากการต่ออนุกรม 3 ขดมีค่ามากกว่า 2 ขด และมากกว่าขดลวดขดเดียวตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการอนุกรมแหล่งจ่ายไฟ เมื่อนำข้อมูลในกราฟที่ 3.38 มาแทนค่าลงในสมการที่ (3.5) เหมือนในการทดลองที่ผ่านมาจะได้ค่าพลังงานที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะสามารถมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 3.39



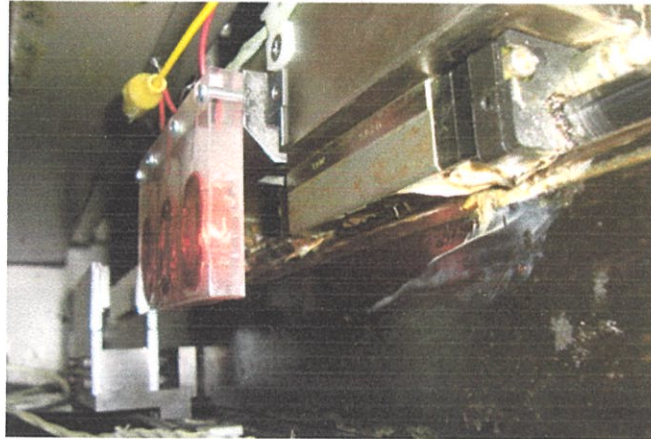
รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.39 สังเกตได้ว่าในช่วงที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 V กำลังไฟฟ้าจากการนำขดลวดมาต่อขนานจะมีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าจากการนำขดลวดมาต่ออนุกรม เนื่องจากในช่วงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่ำ ตัวเก็บประจุจะดึงกระแสจากขดลวดสูง และการต่อขนานทำให้กระแสจากขดลวดมีค่ามากกว่าการต่อแบบอนุกรม แต่เมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้น กระแสที่ไหลเข้าไปยังตัวเก็บประจุจะลดลง ส่งผลให้การนำขดลวดมาอนุกรมกันได้กำลังไฟมากกว่าการต่อขดลวดขนาน (การต่ออนุกรมให้แรงดันที่สูงกว่า) โดยกำลังไฟสูงสุดจากการต่อขดลวดอนุกรม 3 ขดจะอยู่ที่ 9.9 mW เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่า 4.7 V และกำลังไฟสูงสุดจากการต่อขดลวดขนาน 3 ขดจะอยู่ที่ 4.26 mW เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่า 1.46 V

ผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ที่ความเร็วการเคลื่อนที่เชิงเส้น 25 – 175 mm/s การนำขดลวดมาต่ออนุกรมจะมีความเหมาะสมกับการใช้งานมากกว่าการต่อขดลวดแบบขนาน เนื่องจากให้แรงดันและกำลังไฟมากกว่าการต่อแบบขนานในย่านแรงดันทำงานสูงกว่า 1 V (อุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีย่านแรงดันการทำงานที่สูงกว่า 1 V) ดังนั้นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่จะใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ขดลวดเบอร์ 43 นำมาต่ออนุกรมกัน 3 ขดเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนด

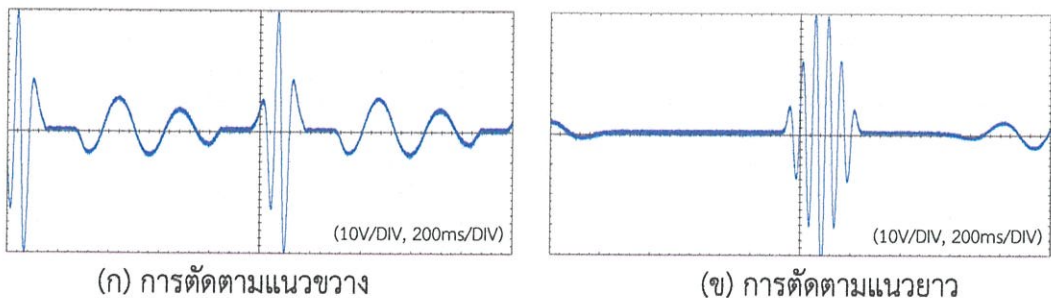
3.2.5 การทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิต

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิต โดยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากขดลวดเบอร์ 43 จำนวน 2500 รอบ 3 ขดต่ออนุกรมกันดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา จะถูกติดตั้งเข้าไปยังชุดนำทางเชิงเส้นของเครื่องตัดแบ่งยูนิตดังแสดงในรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานภายในเครื่องตัดแบ่งยูนิต

เครื่องตัดแบ่งยูนิตมีขั้นตอนการทำงานในการตัดแผ่นเวเฟอร์อยู่ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวขวาง และขั้นตอนการตัดแผ่นเวเฟอร์ในแนวนอน ในการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวขวางระยะการเคลื่อนที่เข้าออกของชุดนำทางเชิงเส้นจะค่อนข้างสั้น (ประมาณ 6.5 cm) ส่วนการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาว ระยะการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้นจะมีค่าประมาณ 21 cm ในขั้นตอนการตัดนั้นชุดนำทางเชิงเส้นจะมีการเคลื่อนที่เข้าและออก เพื่อนำแผ่นเวเฟอร์วางจรรวมเข้าไปตัดและชักออกมา สลับกันจนการตัดเสร็จสมบูรณ์ ความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าและออกจะมีค่าไม่เท่ากัน ความเร็วที่ชุดนำทางเชิงเส้นเคลื่อนที่เข้าจะอยู่ในช่วง 25 – 175 mm/s ขึ้นอยู่กับผู้ใช้เครื่องต้องการ แต่โดยทั่วไปจะใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าตัด 125 mm/s ส่วนความเร็วในการชักแผ่นเวเฟอร์ออกมาจะมีค่า 600 mm/s คงที่ไม่ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าตัดมีค่าเท่าไรก็ตาม รูปที่ 3.41 แสดงแรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปขณะที่เครื่องตัดแบ่งยูนิตทำงานที่ความเร็ว 125 mm/s



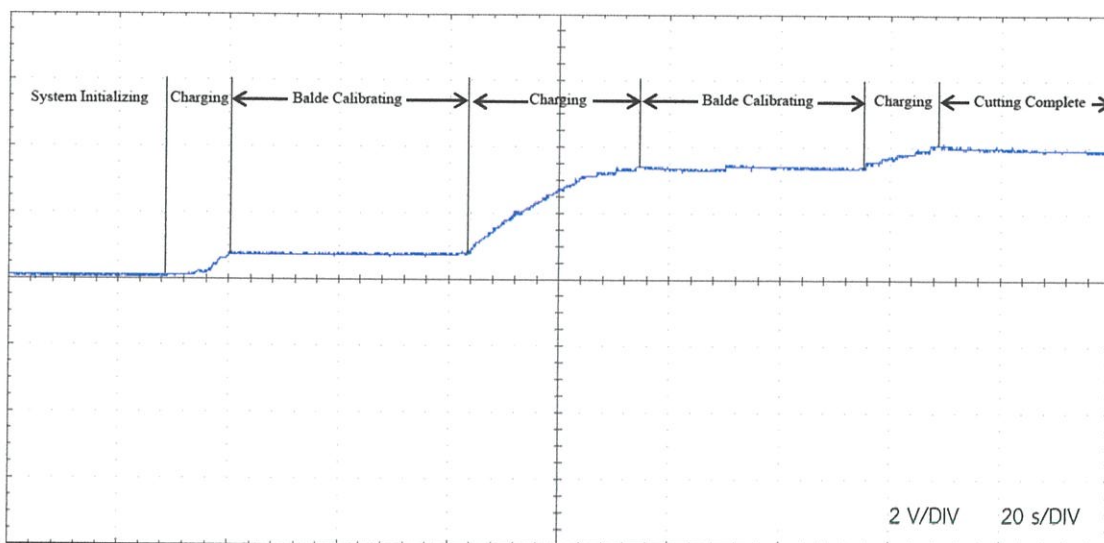
(ก) การตัดตามแนวขวาง

(ข) การตัดตามแนวยาว

รูปที่ 3.41 แรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปขณะตัดชิ้นงาน

จากรูปที่ 3.41 จะพบรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่แตกต่างกัน 2 ชุด ซึ่งชุดที่มีความถี่ต่ำกว่าคือ ชุดสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อชุดนำทางเชิงเส้นเคลื่อนที่เอาแผ่นเวเฟอร์เข้าไปตัดด้วยความเร็ว 125 mm/s และชุดสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าคือ ชุดสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อชุดนำทางเชิงเส้นเคลื่อนที่ชักเอาแผ่นเวเฟอร์ออกด้วยความเร็ว 600 mm/s ซึ่งสังเกตได้ว่าขณะที่ชักแผ่นเวเฟอร์ออกจะได้แรงดันสูงสุดที่ประมาณ 40 V ซึ่งสูงกว่าขณะนำแผ่นเวเฟอร์เข้า (ได้แรงดันสูงสุดประมาณ 10 V) เนื่องจากการชักเอาแผ่นเวเฟอร์ออกมีความเร็วการเคลื่อนที่สูงกว่าอย่างมาก นอกจากนี้ในการตัดแนวขวาง ลูกสัญญาณที่ได้จากการเคลื่อนที่ชักแผ่นเวเฟอร์ออกจะมีจำนวนน้อยกว่าลูกสัญญาณขณะตัดแนวยาว เนื่องจากระยะการเคลื่อนที่ของการตัดแนวขวางสั้นกว่าความกว้างรวมของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน (6.5 cm เทียบกับ 10 cm) จึงทำให้ชุดลวดทั้ง 3 ชุดไม่ได้ตัดกับสนามแม่เหล็กทั้งหมด แต่การตัดแนวยาวระยะทางการเคลื่อนที่ของการตัดมีค่ามากกว่าความกว้างรวมของอุปกรณ์ จึงทำให้ชุดลวดทั้ง 3 ชุดตัดผ่านสนามแม่เหล็กทั้งหมดได้ ส่งผลให้มีจำนวนลูกสัญญาณที่มากกว่า

ในขั้นตอนถัดมาเป็นการทดลองชาร์จพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเข้าไปยังตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF โดยวัดผลแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยออสซิลอโคป ขณะตัดแผ่นเวเฟอร์ 1 แผ่นได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.42 เมื่อความเร็วในการตัดคือ 125 mm/s



รูปที่ 3.42 ลักษณะแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF เมื่อตัดแผ่นเวเฟอร์ 1 แผ่น

จากรูปที่ 3.42 พบว่าในการตัดแต่ละครั้ง ช่วงเวลาการชาร์จจะไม่ต่อเนื่องตลอด เนื่องจากระหว่างการตัดแผ่นเวเฟอร์ ใบตัดจะเกิดการบิ่นขึ้น หลังจากตัดไปช่วงเวลาหนึ่ง เครื่องตัดจะทำการปรับเทียบค่า (Calibrate) ระยะของใบตัดใหม่ จึงทำให้มีการหยุดการตัดชั่วคราว และไม่เกิดการชาร์จพลังงานเข้าตัวเก็บประจุในช่วงนั้น ในการตัดเวเฟอร์ 1 แผ่น อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถชาร์จประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF ได้จนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าประมาณ 4 V ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าพลังงานได้ 120 mJ

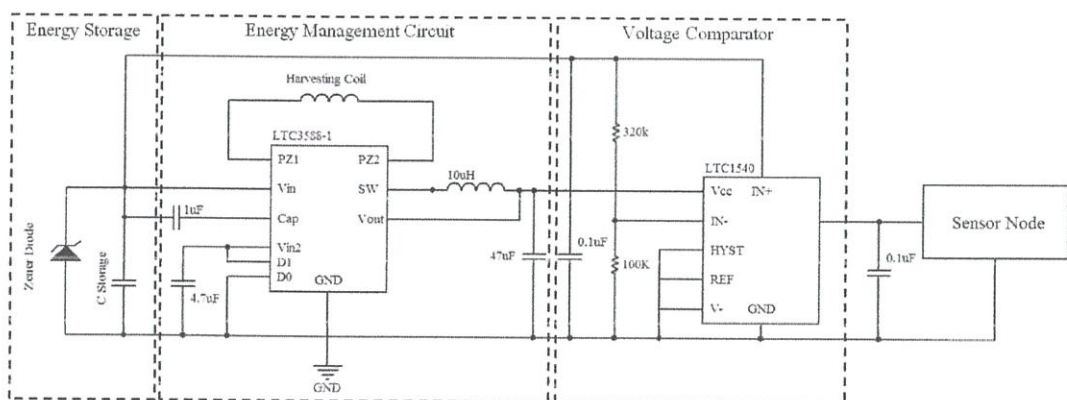
บทที่ 4

การจัดการพลังงานสำหรับเซ็นเซอร์โหนด

เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากจะสามารถทำงานได้เมื่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เลี้ยงอุปกรณ์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันคงที่ แต่พลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับแรงดันไม่คงที่ เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ภายในเซ็นเซอร์โหนดจะต้องมีระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System) ที่เหมาะสมเพื่อทำหน้าที่ในการเรียงกระแส สะสมพลังงาน และรักษาระดับแรงดันให้เหมาะกับการใช้งาน ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบจัดการพลังงาน และหลักการบริหารจัดการพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้สามารถใช้งานกับเซ็นเซอร์โหนดที่ออกแบบมาได้

4.1 ระบบจัดการพลังงาน

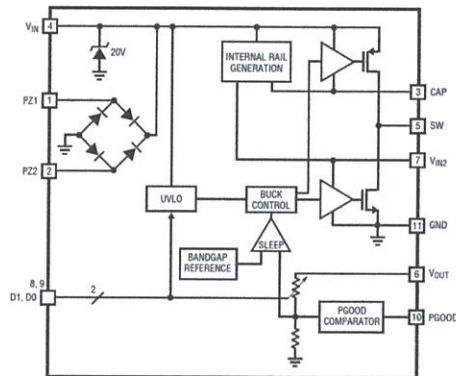
เนื่องจากพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับพลังงานต่ำ เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ระบบจัดการพลังงานที่นำมาใช้จะต้องมีวงจรเรียงกระแส และมีวงจรสำหรับสะสมพลังงานไว้ในอุปกรณ์สะสมพลังงาน (Energy Storage) เป็นองค์ประกอบ ระบบจัดการพลังงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ไอซีจัดการพลังงาน LTC3588-1 อุปกรณ์สะสมพลังงาน และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อุปกรณ์สะสมพลังงานที่นำมาใช้คือ ตัวเก็บประจุเนื่องจากมีรอบการชาร์จ (Charge Cycle) ที่สูง และมีค่าความต้านทานภายในต่ำ ทำให้สามารถจ่ายกระแสสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ นอกจากไอซีจัดการพลังงาน LTC3588-1 แล้ว ในรูปที่ 4.1 จะมีไอซีอีกไอซีหนึ่งคือ LTC 1540 ที่เป็นไอซีเปรียบเทียบระดับแรงดัน ซึ่งหลักการทำงานจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 วงจรแสดงระบบจัดการพลังงานกับเซ็นเซอร์โหนด

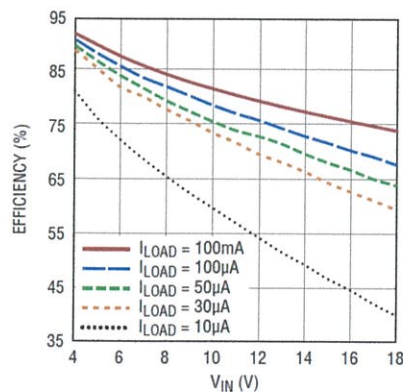
ภายในไอซี LTC3588-1 มีวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และวงจรทอนระดับแรงดันแบบปรับค่าได้อยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการทำงานต่ำ แรงดันไฟฟ้าที่รับเข้าด้านอินพุตมีค่าครอบคลุม สามารถรองรับแรงดันที่ขดลวดสร้างขึ้นได้ ดังนั้นไอซีดังกล่าวจึง

เหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ หลักการทำงานของระบบจัดการพลังงานคือ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นภายในไอซี LTC3588-1 พลังงานที่ได้มาหลังผ่านวงจรเรียงกระแสจะถูกนำไปเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ (C Storage) เพื่อสะสมพลังงาน ในช่วงแรกของการเก็บสะสมพลังงานเข้าตัวเก็บประจุ วงจรทอนระดับแรงดันภายในไอซี LTC3588-1 จะไม่ทำงานจนกว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงถึงระดับแรงดันทำงาน (Cut-in Voltage) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งเอาไว้ที่ 5 V เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงถึง 5 V วงจรทอนระดับแรงดันภายในจะทำงาน เพื่อทอนระดับแรงดันจาก 5 V เป็น 3.3 V และนำไปใช้งานกับเซ็นเซอร์โหนด ในกรณีที่เซ็นเซอร์โหนดใช้พลังงานเฉลี่ยมากกว่าที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะสามารถจ่ายให้ได้ พลังงานที่ถูกเก็บสะสมไว้ในตัวเก็บประจุจะถูกนำออกมาใช้ และเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงต่ำกว่าแรงดันหยุดทำงาน (Cut-off Voltage) ที่ 3.6 V วงจรทอนระดับแรงดันจะหยุดทำงานและตัดพลังงานที่ไปเลี้ยงเซ็นเซอร์โหนด เพื่อให้ตัวเก็บประจุสามารถสะสมพลังงานใหม่ได้



รูปที่ 4.2 วงจรภายในของไอซี LTC3588-1 [84]

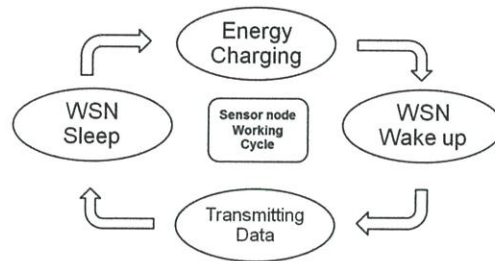
ค่าประสิทธิภาพของไอซี LTC3588-1 นั้นมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับแรงดันขาออก (Output voltage) ที่ตั้งเอาไว้ แรงดันขาเข้า (Input Voltage) จากตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลตึงไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ แรงดันขาออกได้ถูกตั้งกำหนดเอาไว้ที่ 3.3 V ดังนั้นกราฟค่าประสิทธิภาพที่นำมาใช้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า กระแสที่ไหลตึงไปใช้งาน และค่าประสิทธิภาพดังได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.3 โดยค่าประสิทธิภาพของระบบจะถูกพุดถึงในหัวข้อการวิเคราะห์พลังงานในระบบ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพของไอซี LTC3588-1 [84]

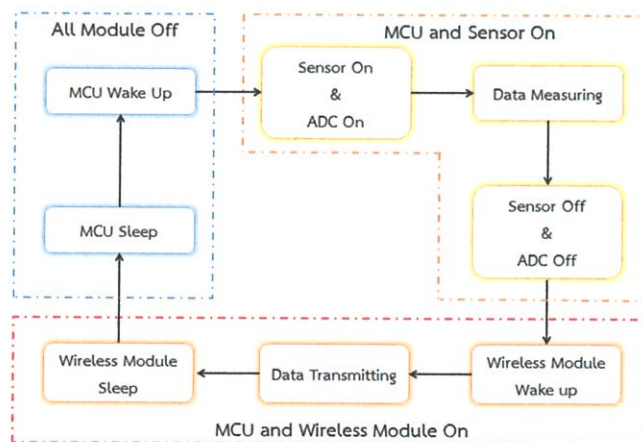
4.2 การบริหารการทำงานของอุปกรณ์ในเซ็นเซอร์โหนด

จากการทดลองหาพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และพลังงานที่เซ็นเซอร์โหนดใช้งานที่ผ่านมานั้นพบว่า พลังงานสูงสุดที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถให้ได้มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการในสภาวะทำงาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องบริหารการทำงานของอุปกรณ์ในเซ็นเซอร์โหนดให้มีประสิทธิภาพ โดยจะต้องทำให้เวลาที่เซ็นเซอร์โหนดอยู่ในสภาวะทำงานและส่งข้อมูลมีค่าน้อยที่สุด และจะต้องเปลี่ยนสภาวะของเซ็นเซอร์โหนดให้อยู่ในสภาวะประหยัดพลังงาน ซึ่งใช้พลังงานน้อยกว่าพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เพื่อให้มีช่วงเวลาสะสมพลังงานเข้าไปยังตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วัฏจักรการสะสมพลังงานของเซ็นเซอร์โหนด

นอกจากการเปลี่ยนสภาวะเซ็นเซอร์โหนดให้เข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงานแล้ว การลดช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวในเซ็นเซอร์โหนดขณะอยู่ในสภาวะทำงานและส่งข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นอีกอย่างหนึ่งเพื่อลดอัตราการใช้พลังงานของเซ็นเซอร์โหนด อุปกรณ์ในเซ็นเซอร์โหนดซึ่งประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน และโมดูลส่งสัญญาณไร้สาย ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำงานพร้อมกันทั้งหมดขณะที่อยู่ในสภาวะทำงานและส่งข้อมูล เนื่องจากการส่งข้อมูลจะเกิดขึ้นหลังจากที่เซ็นเซอร์โหนดวัดค่าการสั่นสะเทือนและประมวลผลข้อมูลการวัดเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นโมดูลส่งสัญญาณไร้สายจะยังไม่ทำงานในขณะที่มีการวัดค่าการสั่นสะเทือน และในทางกลับกันเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนจะถูกปิดลงหลังจากวัดการสั่นสะเทือนเสร็จและส่งข้อมูล ดังแสดงในแผนผังการทำงานในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนผังการทำงานของเซ็นเซอร์โหนด

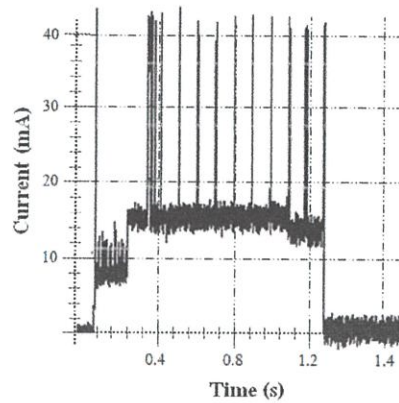
สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวัดการสิ้นสະเทือนก็คือ ช่วงเวลาที่ทำการวัด เนื่องจากขณะที่เครื่องจักรทำงาน ชุดนำทางเชิงเส้นไม่ได้มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และการสิ้นสະเทือนจะเกิดขึ้นเฉพาะขณะที่ชุดนำทางเชิงเส้นมีการเคลื่อนที่เท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสภาวะของเซ็นเซอร์โหนดจากสภาวะประหยัดพลังงานเป็นสภาวะทำงานวัดข้อมูล ในงานวิจัยนี้จึงใช้การอินเตอร์รัพท์จากภายนอกด้วยสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดัน ที่จะเปรียบเทียบระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุกับแรงดันอ้างอิง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไอซีเปรียบเทียบระดับแรงดัน LTC1540 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากไอซี LTC1540 เป็นวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันที่ใช้พลังงานในการทำงานต่ำ และสามารถตั้งฮิสเทอรีซิสได้ (ใช้พลังงานขณะทำงานประมาณ 330 nW) วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันดังกล่าวจะไปอินเตอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดเมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเกินค่าแรงดันที่ตั้งเอาไว้ ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ ฐานแกนเลื่อนมีการเคลื่อนที่พาชดลวดไปตัดผ่านสล็อตแม่เหล็กในขณะตัดแผ่นเวเฟอร์เท่านั้น ดังนั้นการอินเตอร์รัพท์เพื่อเปลี่ยนสภาวะของเซ็นเซอร์โหนดและการวัดการสิ้นสະเทือน จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ฐานแกนเลื่อนกำลังเคลื่อนที่และมีการสิ้นสະเทือนเกิดขึ้นแน่นอน นอกจากนี้เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดจะทำงานเมื่อแรงดันถึงค่าที่ตั้งเอาไว้ ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันนี้จึงสามารถใช้รักษาระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้อีกด้วย

4.3 การวิเคราะห์พลังงานในระบบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์พลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและพลังงานที่ถูกใช้ไปกับเซ็นเซอร์ ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานดังกล่าวสามารถช่วยในการเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ และประเมินระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการอินเตอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดได้

ช่วงเวลาที่เซ็นเซอร์โหนดอยู่ในสภาวะทำงานและส่งข้อมูล เซ็นเซอร์โหนดจะมีการใช้พลังงานสูงกว่าพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน จึงทำให้ต้องใช้พลังงานที่อยู่ในอุปกรณ์สะสมพลังงานมาช่วย ซึ่งในที่นี้คือ ตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามวงจรทอนระดับแรงดันที่อยู่ภายในไอซีจัดการพลังงานจะเริ่มทำงานเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงกว่า 5 V และจะทำงานไปจนกว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงต่ำกว่า 3.6 V ดังนั้นเพื่อให้มีพลังงานไปเลี้ยงเซ็นเซอร์โหนดตลอดเวลา การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุจะต้องเลือกให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนด โดยที่แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่ลดลงต่ำกว่า 3.6 V พลังงานที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการจะมีค่าสูงสุดในช่วงเริ่มต้นการทำงานของเซ็นเซอร์โหนดเป็นช่วงเวลาประมาณ 1.2 วินาที โดยในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของกระแสที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการใช้ใน ช่วงเริ่มต้นการทำงาน

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า ลักษณะการใช้กระแสของเซ็นเซอร์โหนดขณะเริ่มต้นการทำงานจะมีลักษณะคล้ายกับการใช้กระแสของเซ็นเซอร์โหนดในสภาวะทำงานที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 แต่จะมีการใช้กระแสที่สูงกว่าและมีการส่งข้อมูลหลายครั้งในช่วงเริ่มการทำงาน จากการเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 4.6 จะได้กระแสเฉลี่ยที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการในช่วงเริ่มต้นการทำงานอยู่ที่ 13.86 mA ในช่วงเวลาการเริ่มต้นนาน 1.25 วินาที ทำให้สามารถคำนวณหาพลังงานที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการได้ที่ 57.18 mJ



รูปที่ 4.6 ลักษณะการใช้กระแสของเซ็นเซอร์โหนดในช่วงเริ่มต้นการทำงาน

เนื่องจากไอซีจัดการพลังงาน LTC3588-1 มีประสิทธิภาพการทำงานในย่านนี้เท่ากับประมาณ 92% ดังนั้นเพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่ลดลงจาก 5 V ลงไปต่ำกว่า 3.6 V ขณะที่เซ็นเซอร์โหนดทำงาน พลังงานในตัวเก็บประจุในช่วงแรงดัน 3.6 V ถึง 5 V จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 62.15 mJ โดยพลังงานในตัวเก็บประจุดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (4.1)

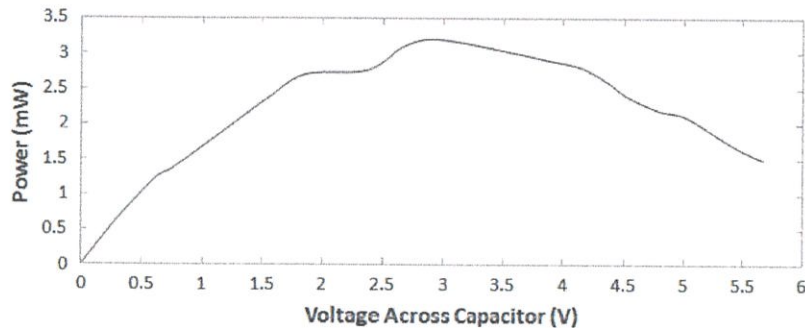
$$E_c = \frac{1}{2}C(V_1^2 - V_2^2) \quad (4.1)$$

เมื่อ E_c คือ พลังงานในตัวเก็บประจุ C คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ V_1 และ V_2 คือ ช่วงของแรงดันที่ต้องการจะหาพลังงาน จากสมการที่ (4.1) ขนาดของตัวเก็บประจุขั้นต่ำที่สามารถหาซื้อได้และสามารถให้พลังงานเพียงพอต่อการใช้งานคือ 11,000 μF แต่ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF เนื่องจากการใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า 15,000 μF จะทำให้ได้พลังงานในช่วงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 3.6 V ถึง 5 V มีค่า 90.3 mJ ซึ่งมากกว่าพลังงานที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการประมาณ 1.45 เท่า หลังจากในตัวเก็บประจุจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนดแล้ว จะมีพลังงานเหลือประมาณ 28.15 mJ เพื่อใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนดในกรณีที่ขุดนำทางเชิงเส้นหยุดการเคลื่อนที่เพื่อตั้งค่านระบบ หรือปรับเทียบค่านระบบของไบตีดใหม่ พลังงานที่สะสมไว้ดังกล่าวจะสามารถจ่ายให้เซ็นเซอร์โหนดขณะอยู่ในสภาวะประหยัดพลังงานได้เป็นเวลาประมาณ 749 เมื่ออัตราการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบขณะประหยัดพลังงานคือ 37.58 μW (คำนวณจากตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 อัตรากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปกับอุปกรณ์ในระบบจากเดต้าชีท

ลักษณะการสูญเสีย	กระแสที่สูญเสีย (μA)	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (μW)	กำลังไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุต้องจ่าย (μW)
LTC3588-1 Input Quiescent Current	1	~5	~5.43
LTC1540 Supply Current	0.3	0.99	1.08
Capacitor Leakage	>4	>20	>21.74
Sensor Node Supply Current	2.6	8.58	9.33
Total	>7.9	>34.57	>37.58

ในขั้นตอนถัดมาจะเป็นการประเมินระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการอินเทอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนด โดยนำตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF มาทดลองเพื่อหากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เข้าไปยังตัวเก็บประจุ ด้วยวิธีการที่เคยทำในหัวข้อที่ 3.2.4 (ใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ 125 mm/s) ซึ่งกราฟผลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7



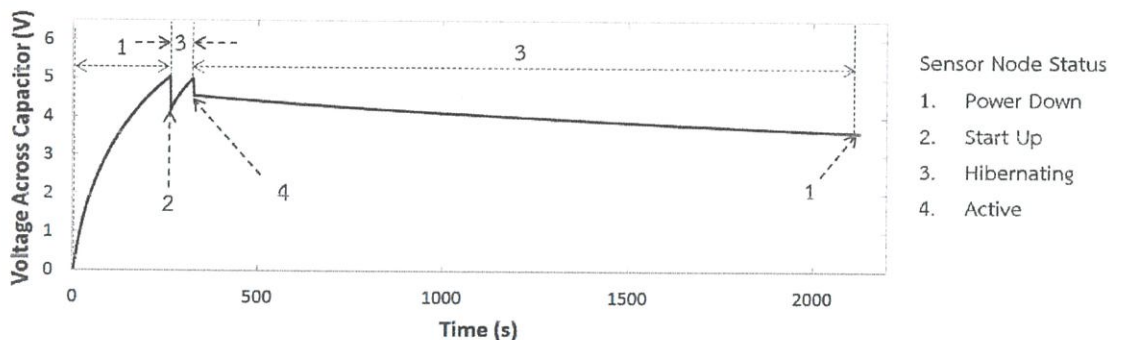
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 4.7 พบว่า อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะสามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าประมาณ 3 V ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่มีค่าต่ำกว่าแรงดันทำงานของเซ็นเซอร์โหนด เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่า 3 V อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจะสามารถให้พลังงานได้น้อยลง เพื่อให้ได้พลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุควรมีค่าใกล้เคียงกับ 3 V มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากวงจรทอนระดับแรงดันจะทำงานเมื่อแรงดันสูงกว่า 3.6 V และพลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุจะต้องมีค่ามากพอที่จะสะสมพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนดขณะอยู่ในสภาวะทำงานและส่งข้อมูล โดยจากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1.6 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เซ็นเซอร์โหนดใช้งานขณะอยู่ในสภาวะทำงานและส่งข้อมูลคือ 26.3 mW โดยเซ็นเซอร์โหนดจะทำงานเป็นเวลาประมาณ 1.2 วินาที ซึ่งสามารถคำนวณเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์โหนดต้องการได้คือ 31.56 mJ แต่เมื่อรวมประสิทธิภาพของไอซีจัดการพลังงานคือ 92% แล้ว ตัวเก็บประจุจะต้องมีพลังงานสะสมอยู่มากกว่า 34.3 mJ หรือมีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอย่างต่ำที่สุด 4.19 V เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของเซ็นเซอร์โหนด อย่างไรก็ตามหากให้เซ็นเซอร์โหนดทำงานเมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่า 4.19 V หลังจากทำงาน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าต่ำกว่า 3.6 V ซึ่งทำให้วงจรทอนระดับแรงดันหยุดทำงาน และไม่มีพลังงานไปเลี้ยงเซ็นเซอร์โหนดขณะที่เข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงาน ดังนั้นการเลือกระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในการอินเทอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดที่เหมาะสม ควรเลือกค่าแรงดันที่มากกว่า 4.19 V เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเหลือสูงกว่า 3.6 V ในงานวิจัยนี้ได้เลือกระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการอินเทอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดอยู่ที่ 5 V เนื่องจากการใช้ตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF จะทำให้หลังจากเซ็นเซอร์โหนดทำงานและส่งข้อมูลเสร็จแล้วมีพลังงานเหลืออยู่ 56 mJ ซึ่งจากการคำนวณสามารถนำไปจ่ายให้เซ็นเซอร์โหนดขณะอยู่ในสภาวะประหยัดพลังงานได้เป็นเวลาประมาณ 1490 วินาที (~25 นาที) หรือพลังงานที่เหลืออาจสามารถนำไปใช้เพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์เพื่อวัดข้อมูลอื่นเพิ่มเติมได้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุกับพลังงานที่มีในตัวเก็บประจุ 15,000 μF ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุกับพลังงานในตัวเก็บประจุ

Interrupt Voltage (V)	Cut off Voltage (V)	Energy in Capacitor (mJ)	Energy Need by Sensor Node (mJ)	Remaining Energy (mJ)	Available Sleep Time (min)
4.19	3.6	34.3	34.3	-	-
4.5	3.6	54.67	34.3	20.37	~ 9
5	3.6	90.3	34.3	56	~ 25

ขั้นตอนถัดมาเป็นการทดลองเพื่อศึกษาดูผลแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นจริงเมื่อนำมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้ การทดลองได้ทำโดยการนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาต่อเข้ากับเซ็นเซอร์โหนดและติดตั้งไปบนชุดทดลอง ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้นที่ใช้คือ 125 mm/s ระยะการเคลื่อนที่ไปกลับของชุดนำทางเชิงเส้นคือ 30 cm ใช้ขดลวดเบอร์ 43 จำนวน 3 ขด และตั้งค่าระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในการอินเตอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดอยู่ที่ 5 V จากนั้นจึงวัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขณะที่ชุดนำทางเชิงเส้นเคลื่อนที่เป็นเวลา 280 วินาที (มีการส่งข้อมูล 2 ครั้ง) แล้วหยุดการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้นจนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่ำกว่า 3.6 V โดยผลการทดลองได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาต่างๆ

ในช่วงแรกของการทำงาน (สถานะที่ 1) เป็นช่วงการสะสมพลังงานในตัวเก็บประจุ โดยในช่วงนี้วงจรทอนระดับแรงดันในไอซี LTC3588-1 ยังไม่ทำงาน ทำให้ไม่มีพลังงานไปเลี้ยงเซ็นเซอร์โหนด เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นถึงระดับ 5 V (สถานะที่ 2) วงจรทอนระดับแรงดันในไอซี LTC3588-1 จะเริ่มทำงานและส่งพลังงานไปให้เซ็นเซอร์โหนด ทำให้เซ็นเซอร์โหนดเริ่มต้นทำงานและใช้พลังงานจำนวนมากจากตัวเก็บประจุ ส่งผลให้แรงดันในตัวเก็บประจุลดลงไปเหลือ 4.14 V อย่างรวดเร็วก่อนที่จะเข้าสู่สถานะที่ 3 คือเซ็นเซอร์โหนดเข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงาน ในช่วงนี้เซ็นเซอร์โหนดจะใช้พลังงานต่ำกว่าที่อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสามารถเก็บเกี่ยวได้ ทำให้พลังงานเข้าไปสะสมในตัวเก็บประจุจนถึงแรงดัน 5 V อีกครั้งที่เวลา 280 วินาที ซึ่งทำให้วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันไปอินเตอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดให้เปลี่ยนเป็นสถานะที่ 4 คือสภาวะทำงานและส่งข้อมูล เซ็นเซอร์โหนดจึงใช้พลังงานในตัวเก็บประจุจำนวนมากอีกครั้ง ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงเหลือ 4.52 V อย่างรวดเร็ว ก่อนเข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงานอีกครั้ง หลังจากวินาทีที่ 280 ผู้วิจัยได้หยุดการทำงานของชุดนำทางเชิงเส้น ส่งผลให้ไม่มีพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยว

พลังงานมาชาร์จตัวเก็บประจุเพิ่ม ทำให้เซ็นเซอร์โหนดนำพลังงานในตัวเก็บประจุมาใช้ และทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงเรื่อยๆ จนถึงวินาทีที่ 2100 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่า 3.6 V ส่งผลให้วงจรทอนระดับแรงดันในไอซี LTC3588-1 หยุดทำงานและไม่มีพลังงานไปเลี้ยงเซ็นเซอร์โหนด

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 จะพบว่าในช่วงสถานะที่ 2 แรงดันในตัวเก็บประจุลดลงจาก 5 V ลงมาเหลือ 4.14 V สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1) เป็นพลังงานมีค่า 58.95 mJ และในช่วงสถานะที่ 4 แรงดันลดลงจาก 5 V ลงมาเหลือ 4.52 V สามารถคำนวณเป็นพลังงานได้เท่ากับ 34.27 mJ เมื่อนำค่าที่ทดลองได้มาเปรียบเทียบกับที่คำนวณจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลเปรียบเทียบค่าจากการทดลองและการคำนวณ

Status	Power (mW)	Active Time (s)	Calculated Energy (mJ)	Tested Energy (mJ)	Error (%)
Start Up	45.74	1.25	57.18	58.95	3
Active	26.3	1.2	31.56	34.27	7.9

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าในการทดลองพลังงานที่เซ็นเซอร์โหนดใช้จริงมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ โดยในช่วงเริ่มต้นการทำงานและช่วงสภาวะทำงาน ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 3% และ 7.9% ตามลำดับนอกจากนี้จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าช่วงเวลาในตัวเก็บประจุยังสามารถจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนดได้โดยที่ระดับแรงดันยังมีค่าเกิน 3.6 V แม้ชุดนำทางเชิงเส้นจะหยุดเคลื่อนที่ ตั้งแต่วินาทีที่ 280 ถึงวินาทีที่ 2100 คิดเป็น 1820 วินาที (~30 นาที) ต่างจากค่าที่คำนวณได้ในตอนแรกคือ 1490 วินาที (~25 นาที) ซึ่งสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดได้ 18.13%

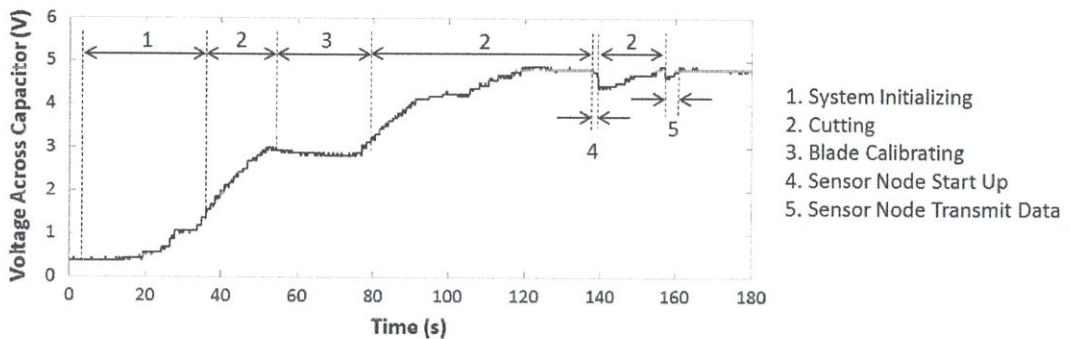
บทที่ 5

ผลการทดสอบระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้กับเครื่องจักรภายในโรงงานจริง ระบบดังกล่าวจะถูกนำไปติดตั้งไว้บนชุดนำทางเชิงเส้นภายในเครื่องจักรตัดแบ่งยูนิท DFD6340 และเก็บข้อมูลต่างๆ ขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงานดังนี้

5.1 ผลการวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขณะใช้งานกับเครื่องจักรจริง

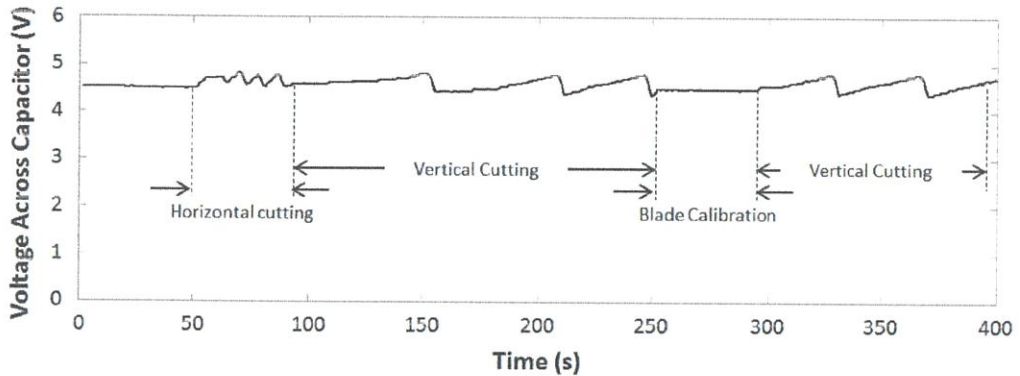
ในช่วงแรกของการทำงานของเครื่องจักร แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่วัดได้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในช่วงแรกของการทำงานของเครื่องจักร

จากรูปที่ 5.1 ก่อนที่เครื่องจักรจะทำงานตัวเก็บประจุมีแรงดันตกค้างอยู่ประมาณ 0.5 V ในช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ระบบภายในเครื่องจักรเริ่มทำงาน (System Initializing) ซึ่งในช่วงนี้ชุดนำทางเชิงเส้นภายในเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาประมาณวินาทีที่ 20 ถึงวินาทีที่ 35 จึงทำให้มีการสะสมพลังงานเข้าตัวเก็บประจุ และทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นในช่วงเวลานั้น ในช่วงที่ 2 จะเป็นช่วงที่เครื่องจักรตัดแผ่นเวเฟอร์ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้นภายในเครื่องจักร ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงขึ้น ถัดมาในช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่เครื่องจักรปรับเทียบค่าระยะของใบตัดใหม่ ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ของฐานแกนเลื่อนในช่วงเวลานี้ ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสภายในระบบ (รวมทั้งกระแสที่รั่วผ่านออสซิลโลสโคป) หลังจากทีกระบวนกรปรับเทียบค่าระยะของใบตัดเสร็จสมบูรณ์ เครื่องจักรจะตัดแผ่นเวเฟอร์ต่อจนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าถึง 5 V (ช่วงที่ 4) วงจรทอนระดับแรงดันภายในระบบจัดการพลังงานจะทำงานและส่งพลังงานให้แก่เซ็นเซอร์โหนด ทำให้เซ็นเซอร์โหนดเริ่มต้นทำงาน และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นเซ็นเซอร์โหนดจะเข้าสู่สภาวะประหยัดพลังงานทำให้เกิดการสะสมพลังงานเข้าไปยังตัวเก็บประจุใหม่ จนกระทั่งแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจนมีค่าถึง 5 V วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันจะอินเทอร์รัพท์เซ็นเซอร์โหนดทำให้เซ็นเซอร์โหนดเปลี่ยนเป็นสภาวะทำงานในช่วงที่ 5

หลังจากช่วงที่ 4 ที่วงจรปรับระดับแรงดันในระบบจัดการพลังงานทำงานและจ่ายพลังงานให้กับเซ็นเซอร์โหนด หากเครื่องจักรที่ถูกเก็บเกี่ยวพลังงานทำงานอย่างต่อเนื่อง แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าอยู่ในช่วง 4 – 5 V ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เนื่องจากเซ็นเซอร์โหนดจะอยู่ในสภาวะประหยัดพลังงานจนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงกว่า 5 V จึงจะเปลี่ยนสภาวะเป็นสภาวะทำงาน ทำให้มีการดึงพลังงานมาใช้ก่อนที่จะมีการชาร์จพลังงานเข้าไปใหม่จนถึง 5 V อีกครั้งหนึ่ง



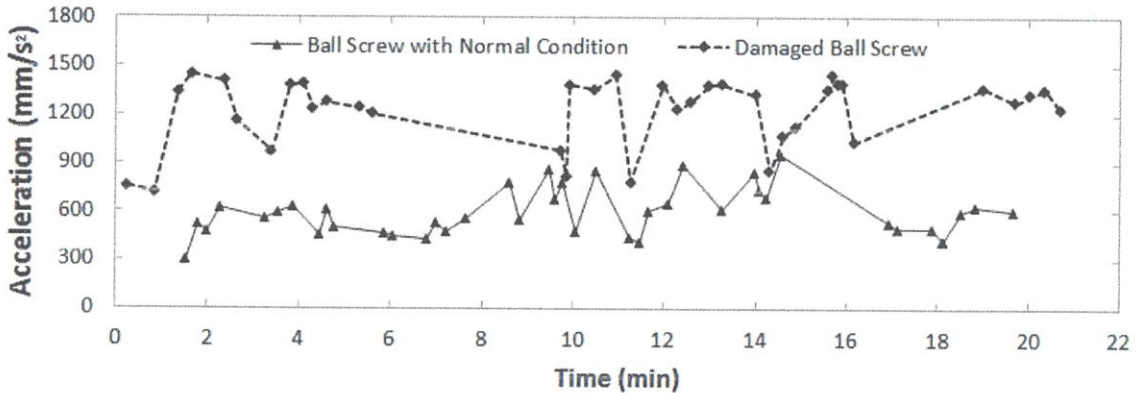
รูปที่ 5.2 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุหลังจากที่เซ็นเซอร์โหนดเริ่มทำงาน

จากรูปที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่าในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวขวาง (Horizontal Cutting) จะมีการชาร์จพลังงานเข้าสู่ตัวเก็บประจุที่เร็วกว่าในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาว (Vertical Cutting) เนื่องจากการเคลื่อนที่เข้าออกของฐานแกนเลื่อนมีความต่อเนื่องมากกว่า (สังเกตได้จาก รูปที่ 3.41 ในบทที่ 3) นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่า แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ลดลงหลังจาก เซ็นเซอร์โหนดเปลี่ยนสภาวะในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวขวางจะลดลงจาก 5 V เหลือประมาณ 4.4 V ในขณะที่ในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาวจะลดลงจาก 5 V เหลือประมาณ 4.2 V ซึ่งทั้ง 2 กรณีมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ในบทที่ 4 เนื่องจากมีพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ไปทดแทนพลังงาน บางส่วนที่ต้องถูกดึงออกจากตัวเก็บประจุไปใช้งาน

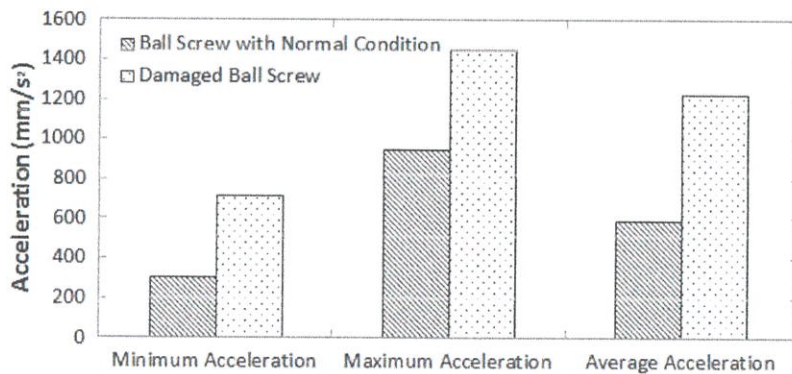
เนื่องจากความเร็วในการชาร์จพลังงานเข้าตัวเก็บประจุมีค่าไม่เท่ากันในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาวและตามแนวขวาง จึงทำให้ระยะเวลาระหว่างการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งของ เซ็นเซอร์โหนดมีค่าไม่คงที่ ในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาวที่มีความเร็วในการชาร์จพลังงานเข้าตัวเก็บประจุมากกว่าระยะเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละครั้งจะสั้นกว่า ในทางกลับกันในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาวซึ่งมีความเร็วในการชาร์จพลังงานเข้าตัวเก็บประจุต่ำกว่า ระยะเวลาการส่งข้อมูลแต่ละครั้งก็จะนานกว่า อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่แรงดันถูกรักษาอยู่ในระดับ 4 – 5 V นี้ หากเครื่องจักรที่ถูกเก็บเกี่ยวพลังงานทำงานอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลการสิ้นสะท้อนที่วัดได้จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์อย่างต่ำ 1 ครั้งภายใน 2 นาที ซึ่งเพียงพอต่อการใช้ติดตามสภาพและวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู

5.2 ผลการทดสอบวัดข้อมูล

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบวัดข้อมูลการสั่นสะเทือน โดยนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปติดตั้งเข้ากับชุดนำทางเชิงเส้นของเครื่องจักร 2 เครื่องที่มีสภาพของบอลสกรูแตกต่างกัน เครื่องหนึ่งจะเป็นเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน และอีกเครื่องหนึ่งเป็นเครื่องที่ถูกเปลี่ยนบอลสกรูใหม่ได้ไม่เกิน 2 เดือนและบอลสกรูยังมีสภาพปกติ จากนั้นจึงวัดค่าการสั่นสะเทือนขณะที่เครื่องจักรทำงานเป็นช่วงเวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งได้ผลการวัดดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4



รูปที่ 5.3 ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นโดยใช้ระบบที่พัฒนาขึ้น

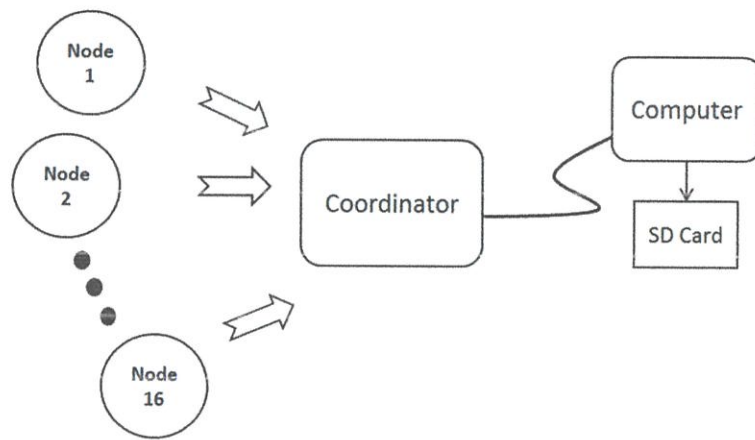


รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนระหว่างเครื่องที่บอลสกรูมีสภาพดีและบอลสกรูมีรอยบิ่น

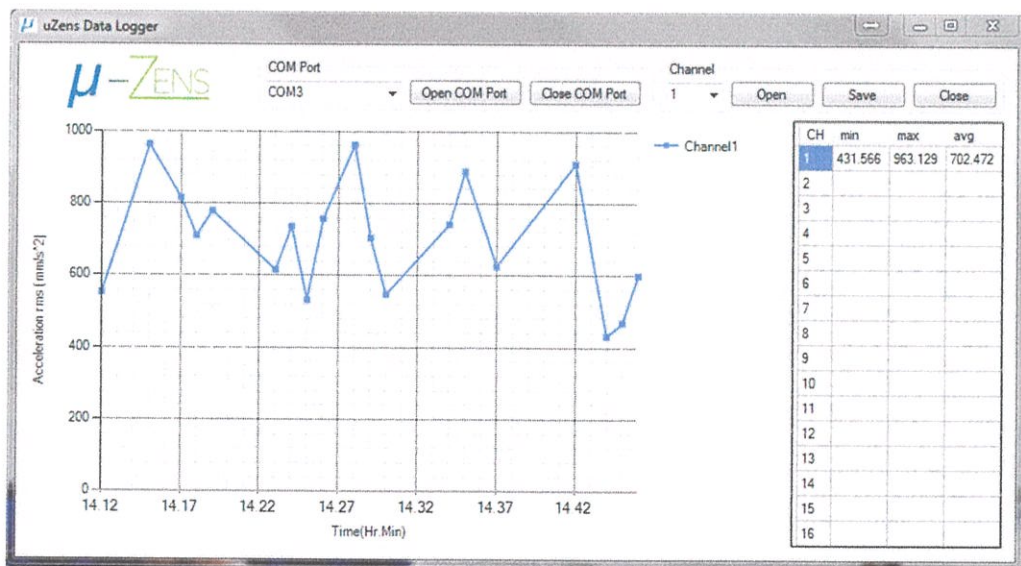
จากรูปที่ 5.3 จะพบว่า การส่งข้อมูลครั้งแรกของทั้ง 2 โหนด ส่งที่เวลาไม่พร้อมกัน และระยะเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละครั้งของทั้ง 2 โหนด มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดขึ้นจาก 2 ปัจจัยคือ ความเร็วการซาร์จตัวเก็บประจุในแต่ละช่วงการตัดมีค่าไม่เท่ากัน และในการตัดแต่ละครั้งมีช่วงเวลาในการหยุดตัดเพื่อปรับเทียบค่าระยะของใบตัดไม่เท่ากัน นอกจากนี้ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีค่าพิสัยค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากระบบไม่สามารถเลือกช่วงเวลาในการวัดการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นได้ ในกรณีที่การวัดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เครื่องจักรทำการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวขวาง ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้ในช่วงการตัดแผ่นเวเฟอร์ตามแนวยาว อย่างไรก็ตามจากผลสรุปค่าการสั่นสะเทือนในรูปที่ 5.4 จะพบว่าค่าเฉลี่ยการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่น จะมีค่าสูงกว่าค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องที่

บอลสกรูยังอยู่ในสภาพปกติอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าการสั่นสะเทือนเฉลี่ยที่วัดได้จากเครื่องที่บอลสกรูมีรอยป็นมีค่า 1223.97 mm/s^2 และค่าการสั่นสะเทือนเฉลี่ยที่วัดได้จากเครื่องที่บอลสกรูยังอยู่ในสภาพดีมีค่า 592.77 mm/s^2 ดังนั้นในการวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู จะทำการวินิจฉัยโดยอาศัยข้อมูลค่าเฉลี่ยของการสั่นสะเทือนที่วัดได้เป็นหลัก

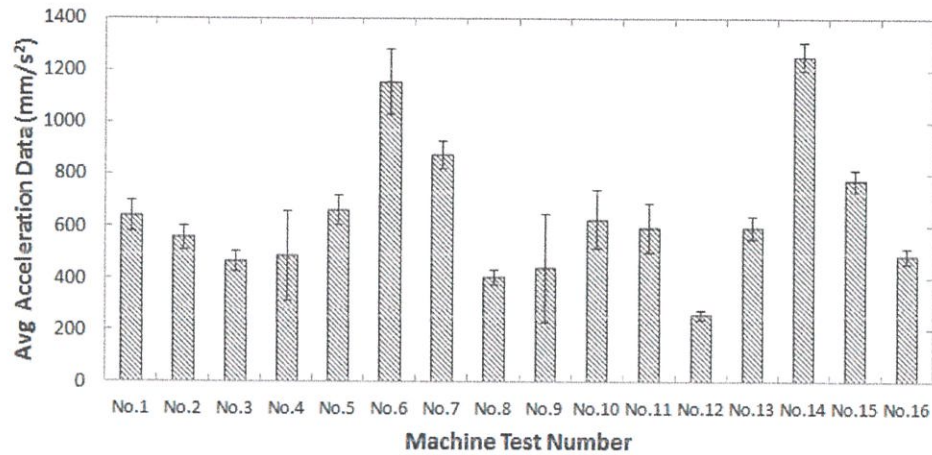
ขั้นตอนถัดมาจะเป็นการทดลองเพิ่มจำนวนของเซ็นเซอร์โหนดเข้าไปเป็นจำนวน 16 ตัว ในการทดลองจะทำโดยติดตั้งเซ็นเซอร์โหนดเข้ากับเครื่องตัดแบ่งยูนิต 16 เครื่องเป็นช่วงเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บข้อมูลการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดแบ่งยูนิตทั้ง 16 เครื่อง ข้อมูลที่ถูกส่งมาจากเซ็นเซอร์โหนดจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและบันทึกข้อมูลลง SD Card ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6 ค่าเฉลี่ยของค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ใน 48 ชั่วโมงของเครื่องตัดแบ่งยูนิต 16 เครื่องได้แสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.5 รูปแบบการทดลองรับส่งและการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากเซ็นเซอร์โหนด 16 ชุด



รูปที่ 5.6 โปรแกรมเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนด



รูปที่ 5.7 ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเซ็นเซอร์โหนด 16 ชุด

จากรูปที่ 5.7 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นภายในเครื่องจักรทั้ง 16 เครื่องในช่วงเวลา 48 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพของบอลสกรู โดยเครื่องหมายเลข 6 และ 14 เป็นเครื่องที่บอลสกรูมีรอยบิ่นจำนวนมาก และกำลังจะถูกเปลี่ยนบอลสกรู มีค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้สูงกว่า 1200 mm/s^2 ส่วนเครื่องหมายเลข 12 เป็นเครื่องที่เพิ่งมีการเปลี่ยนบอลสกรูใหม่ภายในวันที่เริ่มวัดข้อมูล ซึ่งค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องหมายเลข 12 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 254 mm/s^2 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากเครื่องหมายเลข 12 เป็นเครื่องที่ถูกเปลี่ยนบอลสกรูใหม่ภายในวันที่เก็บข้อมูล ค่าเฉลี่ยของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมายเลขอื่นๆ ที่บอลสกรูมีค่าปกติคือ 583 mm/s^2

จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนของชุดนำทางเชิงเส้นที่เกิดจากรอยบิ่นของบอลสกรูได้ และสามารถนำค่าการสั่นสะเทือนดังกล่าวมาใช้ในการแยกแยะเพื่อวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรูได้เช่นกัน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่ผลิตพลังงานได้เองเพื่อวินิจฉัยความเสียหายของบอลสกรู ระบบที่นำเสนอประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ เซ็นเซอร์โหนดที่ใช้ในการวัดความเร่งและอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนที่ของชุดนำทางเชิงเส้น เพื่อนำพลังงานดังกล่าวมาใช้กับเซ็นเซอร์โหนด ระบบที่ออกแบบขึ้นได้ถูกนำไปทดสอบใช้งานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิต DFD6340 ของบริษัท ยูแทคไทย จำกัด ซึ่งเป็นเครื่องสำหรับตัดแผ่นเวเฟอร์ ขั้นตอนแรกของการวิจัยเป็นการออกแบบและทดลองเซ็นเซอร์โหนด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แม้เซ็นเซอร์โหนดที่สร้างขึ้นจะยังไม่ได้ทำการปรับเทียบค่าให้ค่าที่วัดได้มีค่าตรงกัน แต่เซ็นเซอร์โหนดสามารถจำแนกเครื่องจักรที่บอลสกรูมีรอยบิ่น และเครื่องจักรที่บอลสกรูยังมีสภาพปกติออกจากกันได้ โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของค่าความเร่งของชุดนำทางเชิงเส้นขณะทำงาน ขั้นตอนถัดมาเป็นการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าให้เหมาะสมกับเซ็นเซอร์โหนด และได้พลังงานสูงสุด โดยจากการทดลองพบว่า อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่มีการวางตัวของแม่เหล็กแบบสลับเหนื่อได้ และด้านข้างของแม่เหล็กถูกวางเรียงติดกัน โดยมีระยะช่องอากาศระหว่างคู่แม่เหล็ก 10 mm สามารถให้พลังงานได้สูงสุดที่ 9.9 mW จากนั้นเป็นการนำเซ็นเซอร์โหนดและอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้งานรวมกัน โดยนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้สะสมไว้ในตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF ก่อนนำพลังงานดังกล่าวมาใช้งานเมื่อสะสมได้สูงถึงระดับแรงดัน 5 V หลังจากเซ็นเซอร์โหนดดึงพลังงานจากตัวเก็บประจุไปใช้วัดและส่งข้อมูล พลังงานในตัวเก็บประจุจะมีเหลือให้เซ็นเซอร์โหนดใช้งานในสภาวะประหยัดพลังงานได้เป็นเวลารประมาณ 30 นาที โดยไม่ต้องมีการเก็บเกี่ยวพลังงานเพิ่ม ในขั้นตอนสุดท้ายของการวิจัยคือ การนำระบบรวมทั้งพัฒนาขึ้นไปทดสอบใช้งานกับเครื่องตัดแบ่งยูนิต ซึ่งผลการทดสอบการใช้งานพบว่าระบบสามารถส่งข้อมูลได้อย่างน้อย 1 ครั้งภายในเวลา 2 นาที และเครื่องตัดแบ่งยูนิตที่เซ็นเซอร์โหนดสามารถวัดค่ารากกำลังสองของความเร่งเฉลี่ยเกิน 1200 mm/s^2 ถูกจำแนกให้เป็นเครื่องตัดแบ่งยูนิตที่บอลสกรูมีรอยบิ่น

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบระบบกับเครื่องตัดแบ่งยูนิตเพียงชนิดเดียว ในการพัฒนาเพิ่มเติมควรมีการปรับเทียบเซ็นเซอร์ให้ได้มาตรฐาน ด้วยการติดตั้งบนอิเล็กทรอนิกส์โทรแมกเนติกเชกเกอร์ (Electromagnetic Shaker) แล้วปรับจูนค่าความเร่งที่เซ็นเซอร์แต่ละตัววัดได้ ให้มีค่าเท่ากันและตรงกับแหล่งกำเนิด จากนั้นควรนำเซ็นเซอร์โหนดไปทดสอบใช้งานกับเครื่องจักรชนิดอื่น

ขนาดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างภายในของเครื่องตัดแบ่งยูนิต ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมหรือไม่สามารถนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องจักรชนิดอื่น ดังนั้น ขนาด และโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน สมควรถูกพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถติดตั้งเข้ากับเครื่องจักรได้หลายๆประเภท เช่น ลดขนาดของโครงสร้างลงด้วยการเปลี่ยนชนิดของแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กแต่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น

นอกจากนี้ อุปกรณ์สำรองพลังงานที่ใช้ภายในเซ็นเซอร์โหนด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 15,000 μF ในการสำรองพลังงาน ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลถึงขนาดโดยรวมของเซ็นเซอร์โหนด ในการพัฒนาเพิ่มเติมอาจมีการนำอุปกรณ์สำรองพลังงานชนิดอื่นที่มีขนาดเล็กลงมาใช้งานร่วมกับตัวเก็บประจุ เช่น โซลิตสเตทแบตเตอรี่ เพื่อลดขนาดของเซ็นเซอร์โหนดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Chen, M. Nixon, T. Aneweer, R. Shepard, K. Burr, and A. K. Mok, "Wireless process control products from ISA 2004" *International Workshop on Wireless and Industrial Automation*, March 2005.
- [2] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches" *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, October 2009, pp. 4285-4265.
- [3] J. Song, A. K. Mok, D. Chen, and M. Nixon, "Challenges of Wireless Control in Process Industry" *Workshop on Research Directions for Security and Networking in Critical Real-Time and Embedded Systems*, April 2006.
- [4] M. Antoniou, M. C. Boon, P. N. Green, P. R. Green and T. A. York, "Wireless Sensor Networks for Industrial Processes" *IEEE Sensors Applications Symposium*, February 2009.
- [5] M. Hanssmann, S. Rhee, and S. Liu, "No Wiring Constraints" *IEEE Industry Applications Magazine*, August 2009, pp. 60-65.
- [6] Michael J. Costello, "Understanding The Vibration Forces in Induction Motor" *Proceedings of the Nineteenth Turbomachinery Symposium*, pp. 67 – 76.
- [7] Glenn H. Bate, "Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives" *Application Note Bruel&Kjaer*.
- [8] Dennis H. Shreve, "Introduction to Vibration Technology" *IRD Mechanalysis, Inc.*, 1994.
- [9] Hani H. Nassif, Mayrai Gindy, Joe Davis, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration" *NDT & E International*, Volume 38, Issue 3, April 2005, pp. 213 – 218.
- [10] R. B. W. Heng and M. J. M. Nor, "Statistical Analysis of Sound and Vibration Signals for Monitoring Rolling Element Bearing Condition" *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 1- 3, 1998, pp. 211 – 226.
- [11] Commtest Instruments, "Beginner's Guide to Machine Vibration" *Commtest Instruments Ltd*.

- [12] Bruel&Kjaer, "Measuring Vibration" Bruel&Kjaer, September 1982.
- [13] H. Ohta and N. Sugimoto, "Vibration Characteristics of Tempered Roller Bearings" *Journal of Sound and Vibration*, vol. 190, 1996, pp. 137 – 147.
- [14] J. I. Taylor, "The Vibration Analysis Handbook, first edition" Vibration Consultants Inc, 1994.
- [15] Bo Li, Gregory Goddu, Mo-Yuen Chow, "Detection of Common Motor Bearing Faults Using Frequency-Domain Vibration Signals and a Neural Network Based Approach" *Proceedings of the American Control Conference*, June 1998, pp. 2032 – 2036.
- [16] S. A. McInerny and Y. Dai, "Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection" *IEEE Transactions on Education*, Vol.46, No. 1, February 2003, pp. 149 – 156.
- [17] Y. T. Su and S. J. Lin, "On initial fault detection of a tapered roller bearing: Frequency domain analysis" *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 155, Issue 1, May 1992, pp. 75 – 84.
- [18] K. N. Ede, E. A. Ogbonnaya, M. T. Lilly, S. O. T. Ogaji and S. D. Probert, "Vibration Monitoring of Rotating Systems" *Scientific Research Engineering*, Vol. 2, No. 1, January 2010, pp. 46 – 54.
- [19] Guo-Hua Feng, Yi-Lu Pan, "Establishing a cost-effective sensing system and signal Processing method to diagnose preload levels of ball screws" *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, pp. 78 – 88.
- [20] Min-Chi Chang, Jeng Luen Liou, Chin-Chung Wei, Jeng-Haur Horng and Yueh-Ling Chiu, "Fractal Analysis for Vibrational Signals Created in a Ball-Screw Machine Operating in Short- and Long-Range Tribological Tests" *Journal of Tribology*, Vol. 135, July 2013.
- [21] Hans-Christian Mohring Oliver Bertram, "Integrated Autonomous Monitoring of Ball Screw Drives" *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012, pp. 355 – 358.

- [22] Juan A. Lopez, "Development of a Sensor Node for Precision Horticulture" *Sensors*, 2009, pp. 3240-3255.
- [23] Liyang Yu, Neng Wang and Xiaoqiao Meng, "Real-time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks" *Proceedings of Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2005, pp. 1214 – 1217.
- [24] Yang Wang, Kenneth J. Loh, Jerome P. Lynch, Michael Fraser, Kincho Law and Elgamal, "Vibration Monitoring of the Voigt Bridge using Wired and Wireless Monitoring Systems" *The Proceeding of 4th China-Japan-US Symposium on Structural Control and Monitoring*, Oct. 16 – 17, 2006, pp. 1 – 8.
- [25] Gang Shao, "Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey" *Network Protocols and Algorithms*, Vol. 3, No. 1, 2011.
- [26] Liqun Hou and Neil W. Bergmann, "Novel Industrial Wireless Sensor Networks for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 10, October 2012, pp. 2787 – 2798.
- [27] Ankit Tiwari, Prasanna Ballal and Frank L. Lewis, "Energy-Efficient Wireless Sensor Network Design and Implementation for Condition-Based Maintenance" *ACM Transactions on Sensor Networks*, Vol. 3, No. 1, Article 1, March 2007.
- [28] Kan Yu, Zhibo Pang, Mikael Gidlund, Johan Akerberg and Mats Bjorkman, "REALFLOW: Reliable Real-Time Flooding-Based Routing Protocol for IndustrialWireless Sensor" *Industrial Wireless Sensor Networks*, Article ID 936379, 2012.
- [29] Honghua Xu, Ke Liu and Xingping Guan, "Time Slots Allocating and Multicycle Scheduling in IWSN for Narrow Process Automation" *Industrial Wireless Sensor Networks*, Article ID 324045, 2012.
- [30] Bin Lu and Vehbi C. Gungor, "Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, November 2009, pp. 4651 – 4659.

- [31] A. Tiwari, F. L. Lewis and Shuzhi Sam Ge, "Wireless Sensor Network for Machine Condition Based Maintenance" **8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision**, December 2004, pp. 461 – 467.
- [32] E. Witrant, A. D’Innocenzo, G. Sandou, "Wireless Ventilation Control for Large-scale Systems: The Mining Industrial Case" **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, vol. 20, no. 2, 2010, pp. 226–251.
- [33] Huang-Chen Lee, Yu-Chang Chang and Yen-Shou Huang, "A Reliable Wireless Sensor System for Monitoring Mechanical Wear-Out of Parts" **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol. 63, No. 10, October 2014, pp. 2488 – 2497.
- [34] J. S. Tobias, H. Hennrich, T. Blank, "Poster Abstract: A Wireless MEMS-Sensor Network Concept for the Condition Monitoring of Ball Screw Drives in Industrial Plants" **SenSys’10**, November 2010, pp. 425 – 426.
- [35] Andreas Willig, Martin Kubisch, Christian Hoene and Adam Wolisz, "Measurements of a Wireless Link in an Industrial Environment Using an IEEE 802.11 – Compliant Physical Layer" **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 49, No. 6, December 2002, pp. 1265 – 1282.
- [36] A. Flammini, D. Marioli, and A. Taroni, "Design and Implementation of a Wireless Fieldbus for Plastic Machineries" **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 56, No. 3, March 2009, pp. 747 – 755.
- [37] L. Nachman, R. Kling, R. Adler, J. Huang and V. Hummel, "The Intel® mote platform: a Bluetooth-based sensor network for industrial monitoring" **Information Processing in Sensor Networks**, April 2005, pp. 437 – 442.
- [38] S. Korkua, H. Jain, W. J. Lee, C. Kwan, "Wireless Health Monitoring System for Vibration Detection of Induction Motors" **Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**, May 2010, pp. 1 – 6.
- [39] R. Reinhold and R. Kays, "Improvement of IEEE 802.15.4a IR-UWB for Time-Critical Industrial Wireless Sensor Networks" **Wireless Days (WD)**, Nov. 2013, pp. 1 – 4.

- [40] K. Pothuganti and A. Chitneni, "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi" **Advance in Electronic and Electric Engineering**, Vol. 4, No. 6, 2014, pp. 655 – 662.
- [41] E. Ferro and F. Potorti, "Bluetooth and Wi-fi Wireless Protocols: A Survey and a Comparison" **IEEE Wireless Communications**, Vol.12, Issue 1, Feb. 2005, pp. 12 – 26.
- [42] C. Robert, P. Tomé, C. Botteron, P.-A. Farine, R. Merz, A. Blatter, "Low Power ASIC Transmitter for UWB-IR Radio Communication and Positioning" **International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation**, Sept. 2010, pp. 1 – 7.
- [43] Chuan Lin, Yan-Xiang He, Naixue Xiong, "An Energy-Efficient Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks" **Proceedings of The Fifth International Symposium on Parallel and Distributed Computing**, 2006.
- [44] F. Salvadori, M. de Capos, P. S. Sausen, R. F. de Camargo, "Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network with Dynamic Power Management" **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol. 58, No. 9, September 2009, pp. 3104 – 3111.
- [45] Ammit Sinha and Anantha Chandrakasan, "Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks" **IEEE Design & Test of Computers**, 2001, pp. 62 – 74.
- [46] P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich, "Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes in Wireless Sensor Networks" **Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems**, Oct. 2007, pp. 1 – 8.
- [47] R. Shelke, G. Kulkarni, R. Sutar, P. Bhore, D. Nilesh and S. Belsare, "Energy Management in Wireless Sensor Network" **International Conference on Computer Modeling and Simulation**, 2013, pp. 668 – 671.
- [48] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges Design Principles, and Technical Approaches" **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 56, No. 10, October 2009, pp. 4258 – 4265.

- [49] Naveen K. V., Manjunath S. S., "A Reliable Ultracapacitor Based Solar Energy Harvesting system for Wireless Sensor Network Enabled Intelligent Buildings" **Intelligent Agent and Multi-Agent Systems (IAMA), 2011 2nd International Conference**, September 2011, pp. 20 - 25.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] J. A. Hagerty, F. B Helmbrecht, W. H. McCalpin, R. Zane and Z. B. Popovic, "Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays" **Microwave Theory and Techniques**, IEEE Transactions vol. 52, March 2004, pp. 1014 – 1024.
- [53] Paul D. Mitcheson, Eric M. Yeatman, G. Kondala Rao, Andrew S. Holmes, and Tim C. Green, "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices" **Proceedings of the IEEE**, Vol.96, 9 September 2008, pp. 1457 – 1486.
- [54] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting" **Strain**, vol. 40, 2004, pp. 49–58.
- [55] Stephen P Beeby, Terence O'Donnell, "Electromagnetic Energy Harvesting" **Energy Harvesting Technology**, 2009, pp. 129 – 161.
- [56] G. Despesse, J. Chaillout, T. Jager, J. M. Le´ger, A. Vassilev, S. Basrour, and B. Charlot, "High Damping Electrostatic System for Vibration Energy Scavenging" **Joint sOc-EUSAI conference, Grenoble, France**, October 2005, pp. 283–286.
- [57] S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, "**Energy Scavenging for Wireless Sensor Network**" 1st ed. Boston, MA: Kluwer, Academic, 2003.
- [58] S. Roundy and P. K. Wright, "A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wireless Electronics" **Smart Mater. Struct.** **13**, 2004, pp. 1131 – 1142.
- [59] Swee-Leong Kok, Ab Rahman M.F., Yap D.F.W., Yih Hwa Ho, "Bandwidth Widening Strategies for Piezoelectric Based Energy Harvesting from Ambient Vibration Sources" **Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE)**, December 2011, pp. 492 – 496.

- [60] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, N. Gershenfeld, "Parasitic Power Harvesting in Shoes" **Second IEEE International Conference on Wearable Computing**, August 1998.
- [61] Arpita Mukherjee and Uma Datta, "Comparative Study of Piezoelectric Materials Properties for Green Energy Harvesting from Vibration" **Annual IEEE India Conference (INDICON)**, December 2010, pp. 1 – 4.
- [62] Erick O. Torres and Gabriel A. Rincon-Mora, "Electrostatic Energy Harvester and Li-Ion Charger Circuit for Micro-Scale Applications" **49th IEEE International Midwest Symposium**, Vol. 1, August 2006, pp. 65 – 69.
- [63] Erick O. Torres and Gabriel A. Rincon-Mora, "Self-Tuning Electrostatic Energy-Harvester IC" **IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs**, Vol. 57, No. 10, September 2010, pp. 615 – 622.
- [64] X. Tang, T. Lin and L. Zuo, "Design and Optimization of a Tubular Linear Electromagnetic Vibration Energy Harvester" **IEEE/ASME Transaction on Mechatronics**, Vol. 19, No. 2, April 2014.
- [65] X. Jiang, Y. Li and J. Li, "Design of a Novel Linear Permanent Magnet Vibration Energy Harvester" **IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, 2013, pp. 1090 – 1095.
- [66] Paul D. Mitcheson, Eric M. Yeatman, G. Kondala Rao, Andrew S. Holmes and Tim C. Green, "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Device" **Proceedings of the IEEE**, Vol. 96, No. 9, September 2008, pp. 1457 – 1487.
- [67] C. Gao, J. Si and P. Wang, "Research of Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy" **Journal of Convergence Information Technology**, Vol. 7, No. 22, December 2012, pp. 694 – 702.
- [68] Jianmin Hou and Yi Gao, "Greenhouse Wireless Sensor Network Monitoring System Design Based on Solar Energy" **International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering**, 2010, pp. 475 – 480.

- [69] Winston K. G. Seah, Zhi Ang Eu and Hwee-Pink Tan, "Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) – Survey and Challenges" **Wireless VITAE'09**, 2009, pp. 1 – 5.
- [70] Dusit Niyato and Ekram Hossain, "Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting Technologies: A Game-Theoretic Approach to Optimal Energy Management" **IEEE Wireless Communication**, August 2007, pp. 90 – 97.
- [71] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso and N. Gershenfeld, "Parasitic Power Harvesting in Shoes" **Second International Symposium on Wearable Computer**, Oct. 1998, pp. 132 – 139.
- [72] S. Roundy, Dan Steingart, Luc Frechette, Paul Wright and Jan Rabaey, "Power Sources for Wireless Sensor Network" **Wireless Sensor Networks**, Vol. 2920, 2004, pp. 1 – 17.
- [73] Nancy J. Dudney, "Thin Film Batteries for Energy Harvesting" **Energy Harvesting Technologies**, Chapter 13, 2009, pp. 355 – 362.
- [74] D. C. Hoang, H. B. Chng and S. K. Panda, "Thermal Energy Harvesting From Human Warmth for Wireless Body Area Network in Medical Healthcare System" **International Conference on Power Electronics and Drive System**, November 2009, pp. 1277 – 1282.
- [75] Vincenzo Musolino and Enrico Tironi, "A Comparison of Supercapacitor and High-Power Lithium Batteries" **Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion**, Oct. 2010, pp. 1 – 6.
- [76] Sebastian Bader and Bengt Oelmann, "Short-term Energy Storage for Wireless Sensor Networks Using Solar Energy Harvesting" **International Conference on Networking, Sensing and Control**, April 2013, pp. 71 – 76.
- [77] F. Ongaro, S. Saggini and P. Mattavelli, "Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network" **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 27, No. 9, September 2012, pp. 3944 – 3953.

- [78] C. Aplippi and C. Galperti, "An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes" **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, Vol. 55, No. 6, July 2008, pp. 1742 – 1751.
- [79] Chulsung Park and Pai H, Chou, "AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes" **IEEE Secon**, 2006, pp. 168 – 178.
- [80] Y. K. Tan and S. K. Panda, "Energy Harvesting From Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes" **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 58, No. 9, September 2011, pp. 4424 – 4436.
- [81] G. F. Price, "Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator" **Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference**, Paper 190, ENT 202, 2008
- [82] Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, Kobus Van der Weshuizen and Jacek F. Gieras, "Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator" **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 41, No. 1, January 2005, pp. 55 – 64.
- [83] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.0.1 (03Dec2006 Build), <http://www.femm.info>.
- [84] LTC3588-1 datasheet, Online Available "<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/35881fb.pdf>".

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

ก-1 บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Don Isarakorn, Thapanun Sudhawiyangkul and Songmoung Nundrakwang, “Energy Analysis in Zigbee based Wireless Sensor Node Powered by Piezoelectric Energy Harvester”, Advanced Materials Research Vols. 931-932, May 2014, pp. 1328-1332.

KKU International Engineering Conference



Energy Analysis in Zigbee based Wireless Sensor Node Powered by Piezoelectric Energy Harvester

Don Isarakorn^{a*}, Thapanun Sudhawiyangkul^b
 and Songmoung Nundrakwang^c

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
^akidon@kmitl.ac.th, ^barto.thapanun@gmail.com, ^cs_nundrakwang@yahoo.com

Keywords: energy harvesting, piezoelectric transducer, Zigbee based wireless sensor network

Abstract: Recently, an integration of wireless sensor network with energy harvesters is getting more interested because it can extend the life time of battery in a sensor node, which is very important in many applications. This paper presents the concept of energy analysis in Zigbee based wireless sensor network, which is powered by a piezoelectric energy harvester to optimize the algorithms used in wireless sensor network. In this work, difference aspects related to piezoelectric energy harvester, characteristic of power consumption in Zigbee based wireless sensor node and concept of optimizing algorithms to balance input and output power in the integrated system are proposed.

I. Introduction

In recent years, a highly advancement in technology such as embedded system and wireless network have made it possible to integrate a micro-processor, sensor and wireless communication module into a wireless sensor node, which, can be utilized in a wireless sensor network for monitoring the region of interest. Wireless sensor network is widely used in various applications whether in industry or agriculture due to its flexibility of communication without wiring and the ability to trace significant information in harsh and inaccessible environment. Therefore, in many sensor networks the life span of sensor nodes is very important. However, they are mostly depending on batteries [1], which, are always limited by some constrains like weight and size of the node. To overcome this issue, many researches on energy harvesting from environment are proposed. The available primary energy sources that can be harvested and integrated to sensor node are solar energy, thermal gradient, kinetic energy and vibrations [2-6]. Of all energy sources, vibration energy harvesting is the most interesting and can provide most advantage for industrial because most operating machines vibrate with a wide range of frequencies [7]. There are three types of transduction methods for harvesting vibration energy; electromagnetic [8], electrostatic [9], and piezoelectric [10] conversions. The piezoelectric transduction is the most interesting method due to its conversion efficiency with simple structure and mass manufacturability [11].

The concept of using energy harvesting technique to prolong the battery life has been proposed by many researchers [12-14], which mainly emphasize on the concept of energy harvesting, energy management circuit or applications for the sensor node. However, the study of the energy consumption of wireless sensor network integrated with energy harvesters is rarely reported. Hence, this paper will focus on analyzing of energy utilization in the system to optimize the algorithm of wireless communication. A Zigbee base sensor node is utilized, which is a network and application layer specification for low-power radio device based on IEEE 802.15.4. It has a standard, widely use and high reliability. The research aims at integrating this Zigbee based sensor node with a piezoelectric energy harvester to replace a battery or prolong its life span and to analyze an input and output energy in the system. Different aspects related to piezoelectric energy harvesting concept, electrical characteristic of energy harvester and sensor node, integration of energy harvester with sensor node and application are addressed in this paper.

II. Piezoelectric Energy Harvester: Structure and Characteristic

Piezoelectric energy harvester can be significantly divided into two types; resonant type and impact type. The resonant type harvester is types that need to be excited at its resonant frequency in order to obtain the maximum displacement leading to the maximum power generation. On the other hand, the impact type harvester operates without concerning about resonant frequency, though, the output power from the impact type harvester will vary with the magnitude of vibrations. In this work, impact type piezoelectric energy harvester is used because in practical the frequency mostly varies in a wide range and it can harvest energy at wider frequency range than resonant type one. The proposed energy harvester [15] used piezo-buzzer with 2.6 kHz resonant frequency as shown in Fig.1 (a). The piezoelectric energy harvester is mounted onto a vibration source that imitates the machine vibration by using a DC motor and a cam. The peak acceleration of vibration source is around 4000 mm/s^2 with the first dominant frequency of vibration at 2190 Hz. When the vibration source operates, the mechanical impact is transferred to the energy harvester causing piezoelectric ceramic vibrates, consequently, the piezoelectric generates the electrical energy. Figure 1 (b) shows the output voltage from the piezoelectric energy harvester, which is alternative signal around 22 Vp-p, 7.5 Vrms and 35.46 Hz.

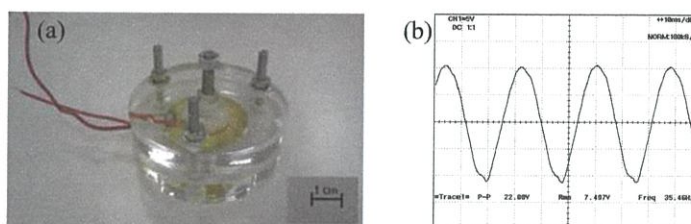


Fig.1 (a) Photograph of piezoelectric energy harvester (b) Voltage output from the piezoelectric

Most of electronic devices need direct current and constant voltage to operate but as shown in Fig.1 (b), the output voltage from piezoelectric conversion is alternative current. For this reason, an energy management circuit is needed to rectify and regulate the output from the piezoelectric energy harvester. In this paper, the LTC3588-1 energy management circuit is used to convert unusable output from the piezoelectric energy harvester and store that energy in a $2200\mu\text{F}$ electrolyte capacitor. In Fig.2 (a), the voltage across the storage capacitor is shown when being charged by output from piezoelectric energy harvester for 40 minute without load. Figure 2 (b) shows the characteristic of power input charging to capacitor depending on voltages in no load condition.

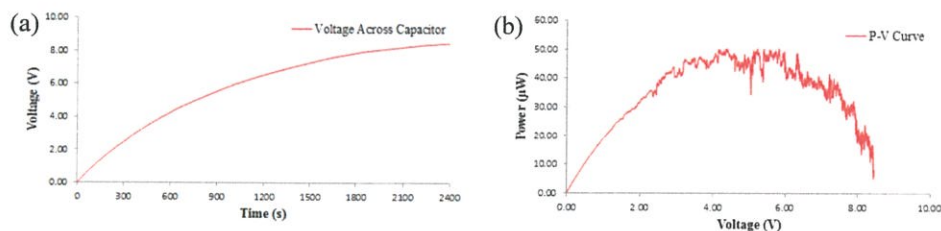


Fig.2 (a) Voltage across capacitor over 40 minute (b) P-V Characteristic of capacitor

From P-V curve in Fig. 2 (b), the power input store in capacitor is not constant. This is due to the current charging to capacitor decrease, while the voltage across the capacitor increase. The P-V curve can be used to optimize the operated voltage range of energy management circuit to provide enough power to the sensor node.

III. Energy Consumption Analysis in Wireless Sensor Node

The sensor node in this work composes of four components; a microcontroller, a temperature sensor, a Zigbee wireless module and an energy management circuit (LTC3588-1). In order to optimize the algorithm for wireless communication, the current consumption of the sensor node in active and hibernate states is needed to be calculated. Table 1 lists the current consumption of the sensor node. In hibernate state, the sensor node consumes the current of $11.45 \mu\text{A}$ ($I_{z,h} + I_{m,h} + I_{m,p} + I_s + I_t$).

Table 1 Current consumption of components in wireless sensor node from datasheet

Device		Current Consumption
Zigbee (Xbee Series 2)	Idle mode ($I_{z,i}$)	10 mA
	Listen and Transmission ($I_{z,t}$)	40 mA
	Hibernate ($I_{z,h}$)	1 μA
Microcontroller (PIC16F688)	Supply Current ($I_{m,t}$)	450 μA @ 4Mhz
	Hibernate Current ($I_{m,h}$)	1.5 μA
	Peripherals Current ($I_{m,p}$)	2 μA
Sensor (MCP9700)	Sensor Supply Current (I_t)	6 μA
Energy Management Circuit (LTC3588-1)	Supply Current (I_s)	0.95 μA

The current consumption of sensor node in active state can be divided into three phases, which are wake up and setting phase, idle phase and listen and transmission phase. The experiment was conducted by connecting a series resistor to sensor node and measuring the voltage across the resistor [16]. Then the current can be calculated by using the Ohm's law. The current consumption characteristic of the sensor node in active state is shown in Fig. 3.

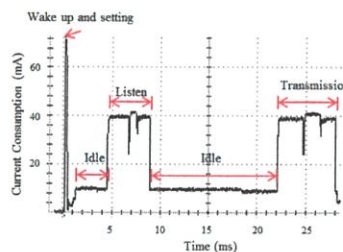


Fig.3 Current consumption characteristic of sensor node in active state

From Fig.3, the average current consumption in active state can be calculated by finding electric charge (area under the current-time graph) and divided it by overall active state time. The average current consumption in active state is 19.8 mA. Then, the average current consumption that include hibernate state and active state can be computed by using equation (1).

$$I_{avg} = \frac{(I_{hibernate} \times t_{hibernate}) + (I_{active} \times t_{active})}{(t_{hibernate} + t_{active})} \quad (1)$$

where I_{avg} is the overall average current consumption, $I_{hibernate}$ is the current consumption in hibernate state, $t_{hibernate}$ is the hibernate time, I_{active} is the current consumption in active state, t_{active} is the active time. From the Equation, the overall current consumption of sensor node is 13.43 μA , where the hibernate and active state time are 300 sec and 30 msec, respectively. With the voltage output fixed at 3.3V, the average load power consumption is around 44.31 μW .

IV Experimental Result and Discussion

Once the characteristics of the energy harvester and the energy consumption of the sensor node have been analyzed, the characterization of integrated system is carried out. In Figure 4 displays the block diagram of the integrated system.

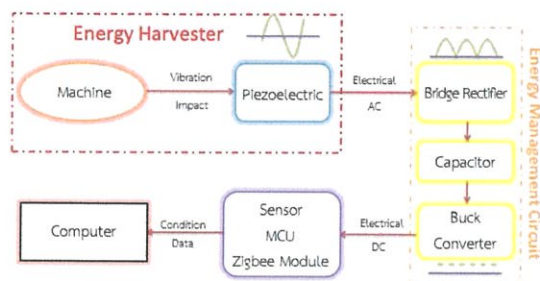


Fig.4 Block diagram of the propose integrated system

From Fig. 4, the vibrations from the machine are converted to electric energy by the piezoelectric energy harvester, which, is rectified by the energy management circuit and stored into the capacitor. The stored energy in capacitor is then regulated to usable DC by the buck converter when the voltage across the capacitor reaches the threshold level. The typical characteristic of voltage across the capacitor from the integrated system is demonstrated in Fig. 5.

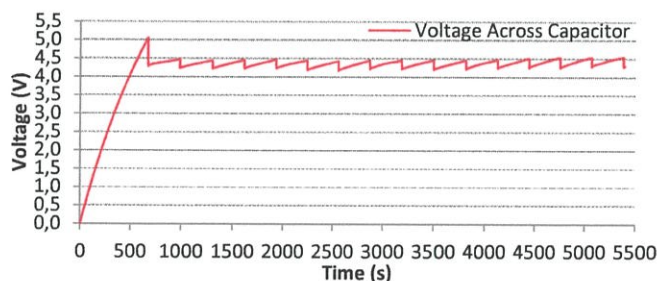


Fig.5 Voltage across capacitor when the sensor node was integrated to energy harvester

In Fig. 5, the capacitor is charge for 672 second to reach the threshold voltage (around 5V). Then, the energy in capacitor is discharged through the buck converter to supply the energy to the sensor node in the active state. This makes voltage across the capacitor rapidly dropping to around 4.3V. After that, the capacitor is gradually charged to around 4.5V before the sensor node wakes up from the hibernate state. The voltage across the capacitor can stay at around 4.3V-4.5V due to the fact that average power input from the piezoelectric energy harvester approximately equals to the output power required by the load. From Fig. 2 (b), this graph can be used to estimate the average power of the capacitor being around $48.4 \mu\text{W}$ at the voltage of 4.3V to 4.5V. Therefore, the output power after passing the LTC3588-1 is around $44.5 \mu\text{W}$ considering the 92% efficiency of the LTC3588- This amount of energy is enough to provide to the sensor node ($44.31 \mu\text{W}$).

In this research, the LTC3588-1 is set to have the operative voltage range at 3.6V-5V. If the voltage across the capacitor stays at around 4.3V-4.5V, the system can operate without any problem. However, if the LTC3588-1 is set to have a higher operative voltage range such as 7V to 8V, the average load power consumption must be adjust (decreased) to balance the input and output power. In most applications, the power consumption of components in the active state cannot be changed. Therefore, it is suggest that the hibernate time could be adjusted to obtain the proper average power consumptions.

Conclusions

This paper presents the energy analysis in Zigbee based wireless sensor node powered by piezoelectric energy harvester. The characteristics of the piezoelectric energy harvester and the energy consumption of the sensor node have been analyzed aiming to optimize the lifetime of wireless sensor node. Based on the analysis, the hibernate time must be properly adjusted in order to balance between the power generation from the energy harvester and the power required by the sensor node. The outcome of this study should incite the establishment of the design protocol for Zigbee-based energy harvesting wireless sensor networks. It should be noted that the analysis presented in this paper is not restricted to piezoelectric energy harvesters: it can be applied to any energy harvesting systems in general.

Reference

- [1] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, Oct. 2009.
- [2] 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.
- [3] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2641-2654, 2011.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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
- [10] 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.
- [11] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart. Mater. Struct.*, vol. 13, pp. 1131-1142, 2004.
- [12] Yen Kheng Tan and Sanjib Kumar Panda, "Energy Harvesting From Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 58, NO. 9, SEPTEMBER 2011, pp. 4424 - 4435
- [13] Paul D. Mitcheson and *et al.*, "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices", Vol.96, No.9, *Proceeding of the IEEE*, pp. 1457-1486, 2008.
- [14] Jianmin Hou and Yi Gao, "Greenhouse Wireless Sensor Network Monitoring System Design Based on Solar Energy", 2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, pp. 475-479, 2010.
- [15] 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.
- [16] Rajeev Piyare and Seoung-ro Lee, "Performance Analysis of XBee ZB Module Based Wireless Sensor Networks", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 4, April-2013, pp. 1615-1621.

KKU International Engineering

10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932

Energy Analysis in Zigbee Based Wireless Sensor Node Powered by Piezoelectric Energy Harvester

10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1328

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายธำปนนท์ สุธาวิยางกูร
วัน เดือน ปีเกิด	7 กันยายน 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
ที่อยู่	57/15 หมู่ 9 ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1. การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (Energy Harvesting) 2. การบริหารพลังงาน (Energy Management) 3. ระบบจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Electromechanical System)

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Thapanun Sudhawiyangkul and Subhawatt Jayasvasti, “The implementation of Ultrasonic Technology for Biofouling Mitigation”, PTT Public Company Limited, 2015.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang and Thapanun Sudhawiyangkul, “Machine Condition Monitoring System for Preventive Maintenance”, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2014.
- Songmoung Nundrakwang, Don Isarakorn, Thapanun Sudhawiyangkul, and Subhawatt Jayasvasti, “Impedance analyzer for laboratory”, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2014.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, and Thapanun Sudhawiyangkul, “Wireless Sensor Networks Powered by Energy Harvesting from Machine”, Thailand Research Organizations Network, National Research Council of Thailand, 2014.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Ratchanee Gullayanon and Thapanun Sudhawiyangkul, “E2-Cart: Eco & Energy Cart”, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2013.