

เพียโซอิเล็กทริกในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับเซนเซอร์ไร้สาย

Piezoelectric in Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Nodes

ธงชัย โชติวัฒนกานต์กุล (Thongchai Chotwattanankul)* ดร. ชัชชัย คุณบัว (Dr. Chatchai Khunboa)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ ทดสอบ และพัฒนาอุปกรณ์สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการเคลื่อนไหวเพื่อใช้งานกับเซนเซอร์ไร้สาย โดยจะใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลนี้ ผ่านวงจรสำหรับการพลังงานเพื่อนำไปจ่ายให้กับตัวเซนเซอร์ไร้สาย หรือชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่ของเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งจากการวิจัยจะพบว่าการคิดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาด $12.7 * 31.8 * 0.51$ มิลลิเมตร³ 1 ครั้ง จะให้แรงดันสูงสุดที่ 21.3 โวลต์ และได้พลังงานเฉลี่ยที่ประมาณ 25.94 ไมโครจูล ซึ่งสามารถเป็นพลังงานให้กับเซนเซอร์ไร้สายที่อยู่ในสภาวะหลับ(Sleep) ได้ 1.44 วินาที หรือใช้ในการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ไร้สายได้ 1 แพ็กเก็ต ต่อการคิดประมาณ 32.29 ครั้ง

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a mechanical energy harvesting system using piezoelectric materials in order to support a wireless sensor node. This system is composed of a piezoelectric material for harvest mechanical energies, a power management circuit and an energy storage device attached to a sensor node. Our study shows that a strum of $12.7 * 31.8 * 0.51$ millimetre³ piezoelectric plate is able to generate the maximum voltage 21.3 volts and average energies 25.94 microjoule. This energy can supply a wireless sensor node to enter system sleep mode about 1.44 seconds or 32.29 strums to transmit a packet.

คำสำคัญ: ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน เพียโซอิเล็กทริก เซ็นเซอร์ไร้สาย

Key Words: Energy harvesting systems, Piezoelectric, Wireless sensor node

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) เป็นการนำเซนเซอร์ในจำนวนมากเพื่อทำการสร้างเครือข่ายในการตรวจวัดค่าต่างๆของสิ่งแวดล้อมที่สนใจ และนำข้อมูลเหล่านั้นมาประมวลผลเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ หรือเพื่อตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมโดยอัตโนมัติ (ซัชชัย, 2554)

การติดตั้งเซนเซอร์โนดจะต้องติดตั้งกับสิ่งที่ต้องการตรวจวัดค่า ซึ่งส่วนมากจะติดตั้งในตำแหน่งที่ตัวเซนเซอร์โนดไม่สามารถอาศัยพลังงานจากสายไฟฟ้าได้ (Yang and Guo, 2010) ดังนั้นตัวเซนเซอร์โนดจึงจำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ จึงได้มีการศึกษาในด้านพลังงานของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เพื่อให้สามารถติดตั้งตัวเซนเซอร์โนดไว้ได้นานที่สุด โดยไม่ต้องเก็บกลับมาชาร์จพลังงานใหม่ รวมถึงการปรับปรุงโปรโตคอลเพื่อลดการใช้พลังงานในการรับ-ส่งข้อมูล การปรับปรุงตัวเซนเซอร์โนดให้ใช้พลังงานน้อยลงเมื่อไม่มีการทำงาน และการเก็บเกี่ยวพลังงานจากภายนอกมาชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่ (Vijay *et al.*, 2005) เป็นต้น

พลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มีอยู่หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานแสงอาทิตย์(solar power) (Vijay *et al.*, 2005), พลังงานความร้อน(thermal energy) (Xin and Shuang-Hua, 2010) และพลังงานกล(biomechanical energy) (Donelan *et al.*, 2010) เป็นต้น ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีปัญหาหลายประการ เช่น กลางวัน/กลางคืน สภาพอากาศ เป็นต้น ส่วนการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนมาใช้นั้นยังทำได้น้อยมาก แต่ในด้านของพลังงานกล ถ้าเป็นสิ่งที่มีการเคลื่อนที่ การเคลื่อนไหว หรือการสั่นสะเทือน เราสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานกลนี้มาเป็นพลังงานทางเลือกเพื่อชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่ของตัวเซนเซอร์โนดไร้สายได้ (Boram and Kwang-Seok, 2011)

การเปลี่ยนพลังงานกลจากสัตว์เป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ผลึกของแร่บางชนิดสามารถให้กำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำต่อผลึก(APC International Ltd., 2011) โดยเราสามารถใช้ในการเคลื่อนที่และการเคลื่อนไหว รวมไปถึงการสั่นของสัตว์มาเป็นแรงกระทำต่อผลึกเพียโซอิเล็กทริกเพื่อกำเนิดไฟฟ้า (Boram and Kwang-Seok, 2011)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในด้านการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของสัตว์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพัฒนาต้นแบบด้วย Piezoelectric materials (วัสดุที่เกิด Piezoelectric Effects) แล้วนำมาทดสอบและติดตั้งกับสัตว์เพื่อตรวจสอบพลังงานที่ได้ โดยเป้าหมายคือนำพลังงานจากการเก็บเกี่ยวมาชาร์จแบตเตอรี่ของตัวเซนเซอร์โนด เพื่อให้สามารถติดตั้งเซนเซอร์โนดได้เป็นระยะเวลานาน อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นได้

หัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปคือการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอน พร้อมทั้งแสดงผลการวิจัยที่ได้เก็บข้อมูลจากกระบวนการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก วิเคราะห์ผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัยตามลำดับ

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

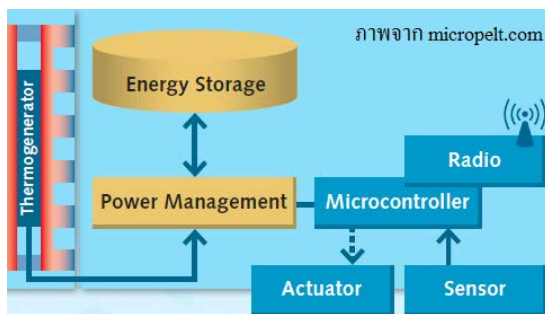
การเก็บเกี่ยวพลังงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากภายนอก จะมีการทำงานของส่วนต่างๆรวมกันดังภาพที่ 1 ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้ (Gyuhae, 2006)

1. Energy Harvester คือส่วนที่ทำการเก็บเกี่ยวพลังงานต่างๆจากภายนอกมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจาก แสง ความร้อน หรือการเคลื่อนไหว เป็นต้น

2. Power Management เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการจัดการพลังงาน ตั้งแต่ในส่วนของการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บเกี่ยวเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ การนำพลังงานไปจ่ายให้กับระบบ รวมไปถึงการจัดการพลังงานของแบตเตอรี่เพื่อป้องกันความเสียหาย

3. Energy Storage หรือแบตเตอรี่เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเก็บสะสมพลังงานไว้เพื่อนำไปใช้งาน

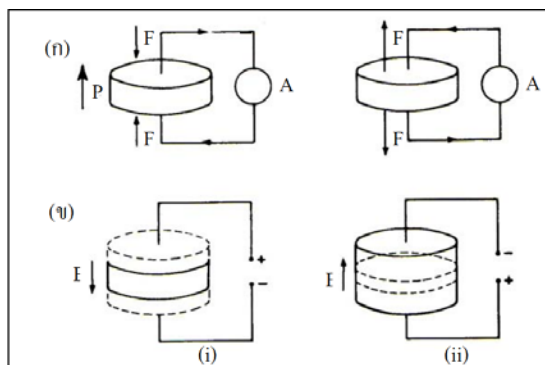


ภาพที่ 1 ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากความร้อน

(ภาพจาก micropelt.com)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Materials)

เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) คือการที่วัสดุสามารถเปลี่ยนแรงเชิงกล (mechanical force) ที่กระทำกับวัตถุเป็นกระแสไฟฟ้างดภาพที่ 2 (ก) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานดังกล่าว เรียกว่า direct effect ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัตถุได้รับพลังงานไฟฟ้าวัตถุก็จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (mechanical deformation) ได้ ดังภาพที่ 2 (ข) เรียกว่า indirect effect. (Moulson and Herbert, 2003)



ภาพที่ 2 (ก)direct effect (ข)indirect effect (i)วัสดุหดตัว

(ii)วัสดุขยายตัว (Moulson & Herbert, 2003)

การบริโภคพลังงานของเซนเซอร์โนดไร้สาย

การที่จะสามารถออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานให้กับเซนเซอร์โนดไร้สายได้อย่างเหมาะสม จำเป็นที่จะต้องทราบว่าเซนเซอร์โนดไร้สายบริโภคพลังงานมากน้อยเพียงใด เพื่อให้ได้สามารถออกแบบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้เพียงพอสำหรับตัวเซนเซอร์โนดไร้สาย โดยมีขนาดไม่ใหญ่เกินความจำเป็น

ในงานวิจัยของ Suyash & Morten (Suyash & Morten, 2011) ได้ทดสอบการบริโภคพลังงานของ CC2530ZNP โดยใช้ CC2530 ZNP Mini Kit (ภาพที่ 3) เป็นหลัก ซึ่งมีเซนเซอร์โนดไร้สายคือ CC2530 ZNP Mini Target board



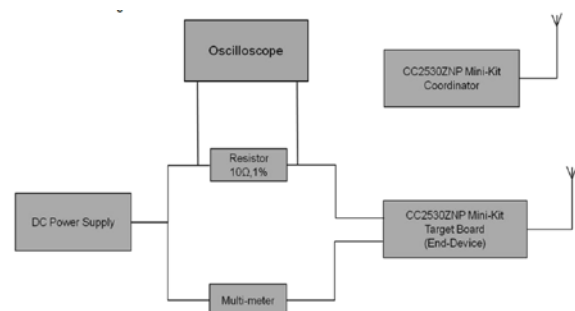
ภาพที่ 3 ZNP Mini Kit (Suyash & Morten, 2011)

(a) ZNP Mini Kit Target board

(b) eZ430 USB Stick with target board

(c) ZNP Mini Kit Battery board

แนวคิดของการวัดการบริโภคพลังงานจะใช้การวัดกระแสที่ไหลผ่าน และวัดแรงดันที่ลดลงบนตัวต้านทานคงที่ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 รูปแบบการวัดการบริโภคพลังงาน

(Suyash & Morten, 2011)

การคำนวณการบริโภคพลังงานสามารถคำนวณได้ดังนี้

เริ่มจากความสัมพันธ์พื้นฐานคือ

$$V = I * R$$

เมื่อ

V คือแรงดัน (โวลต์)

R คือความต้านทาน (โอห์ม)

I คือกระแส (แอมแปร์)

โดยการวัดจะวัดจากส่วนจ่ายพลังงาน (power supply) ซึ่งจะแรงดันบน target board จะถูกทอนลงจากความต้านทาน จะได้

$$V_{\text{Target Board}} = V_{\text{Power Supply}} - (I * R)$$

ทราบเท่าที่กระแสอยู่ในช่วง 10 แอมแปร์ และความต้านทานมีค่าต่ำมาก ความต้านทานจะมีผลต่อการลดลงของแรงดันต่ำมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่นำมาคำนวณ จะได้ว่า

$$V_{\text{Target Board}} = V_{\text{Power Supply}} \quad \text{ก็ต่อเมื่อ } (I * R) \ll V_{\text{Power Supply}}$$

$$(I * R) \ll V_{\text{Power Supply}} \quad \text{ก็ต่อเมื่อ } V_{\text{Power Supply}} > 10 * (I * R)$$

ใช้ R = 10 โอห์ม จะทำให้เงื่อนไขเป็นจริงทราบเท่าที่ I < 30 มิลลิแอมแปร์

เราจะทราบกระแสเฉลี่ยได้จากสูตรทั่วไป

$$I_{\text{avg}} = \sum (T_i / P_i * I) + (1 - \sum (T_i / P_i)) * I_{\text{Sleep}}, \text{ เมื่อ}$$

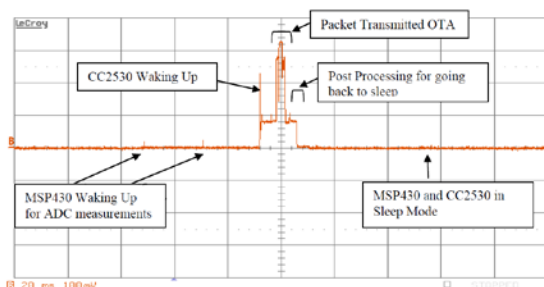
T_i = เวลาที่อุปกรณ์บริโภคกระแสเฉลี่ย I_i

P_i = รอบเวลาทั้งหมดสำหรับการวัดการบริโภค

I_{Sleep} = กระแสที่บริโภคขณะ Sleep mode

I_{avg} = การบริโภคกระแสเฉลี่ยในรอบ P_i

ทำการวัดการบริโภคกระแส โดยให้เซนเซอร์โนดไร้สายส่งแพ็คเกจ ต่อเนื่องทุก ๆ 10 วินาที แล้วใช้ออสซิลโลสโคป วัดแรงดันได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แรงดันขณะเซนเซอร์โนดส่งข้อมูล

(Suyash & Morten, 2011)

จากแรงดันที่วัดได้ตามภาพที่ 5 จะได้ข้อมูลที่จะนำมาคำนวณการบริโภคพลังงานดังตารางที่ 1

จากข้อมูลที่ได้มาคำนวณกระแสเฉลี่ยเมื่อทำการส่งข้อมูล โดยการบริโภคพลังงานของเซนเซอร์โนดไร้สายเมื่อ sleep mode เป็น 4.8 ไมโครแอมแปร์ จะได้

$$((58.5)/10000 * 3.46) + (1 - (58.5)/10000) * 4.8 * 10^{-6}$$

$$= 0.0249 \text{ มิลลิแอมแปร์}$$

ดังนั้นจะได้การบริโภคพลังงานเมื่อทำการส่งข้อมูลเฉลี่ยเป็น 0.0249 แอมแปร์

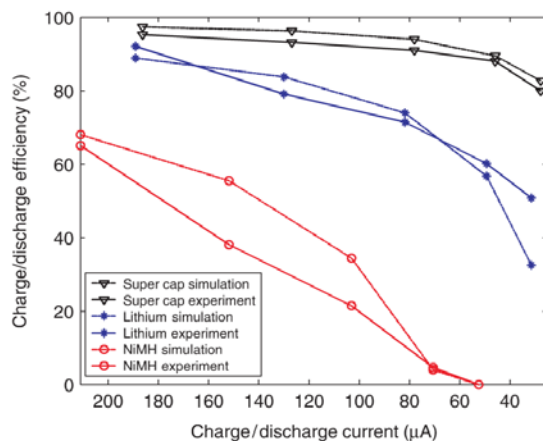
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการวัดแรงดันและกระแสขณะส่งข้อมูล (Suyash & Morten, 2011)

id	Description	Duration [ms]	Current [mA]	Power [ms*mA]
1	ADC Conversion	44	0.17	7.48
2	Synchronize and processing data	6	8.5	51
3	transmit packet and receive ACK	3.5	28.9	101.15
4	Post processing and deep sleep	5	8.5	42.5
	Sum	58.5		202.13
	Average		3.46	

งานวิจัย Characteristics of Energy Storage Devices in Piezoelectric Energy Harvesting Systems

งานวิจัย (Guan and Liao, 2007) ของ M.J. Guan และ W.H. Liao ได้ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์เก็บพลังงานที่สามารถบรรจุพลังงานเข้าไปใหม่ได้เช่น nickel metal hydride (NiMH), lithium ion (Li-ion) และ Supercapacitor เพื่อนำไปใช้สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยระบบเพียโซอิเล็กทริก พบว่า Supercapacitor มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการเก็บพลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยว รองลงมาเป็น Li-ion และ

สุดท้ายคือ NiMH ตามภาพที่ 6 แต่ความจุพลังงานเทียบกับขนาดของ Supercapacitor ต่ำมากซึ่งจะทำให้ต้องใช้ Supercapacitor ที่มีขนาดใหญ่หรือจำนวนมากจึงไม่เหมาะสมสำหรับเซนเซอร์ไร้สายเนื่องจากจำเป็นต้องทำให้มีขนาดเล็ก ดังนั้นถ้ามองในแง่ของประสิทธิภาพและความจุพลังงานต่อขนาดแล้ว อุปกรณ์สำหรับเก็บพลังงานที่เหมาะสมที่สุดจะเป็น Li-ion



ภาพที่ 6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์

(Guan & Liao, 2007)

วิธีการวิจัย

1. ทำการทดสอบ Piezoelectric Bending Sensor ของบริษัท Piezo System, Inc. เบื้องต้นซึ่งมีขนาดของแผ่น Piezoelectric เป็น $12.7 \times 31.8 \times 0.51$ มิลลิเมตร³ ตามภาพที่ 7 โดยทำการติดแผ่น Piezoelectric ให้เกิดการโค้งงอและสั่น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้ง 2

2. ทำการติดตั้ง Piezoelectric กับวงจรสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน EH301 ของบริษัท Advanced Linear Devices, Inc. ดังภาพที่ 8 แล้วทำการติดแผ่น Piezoelectric ด้วยนิ้วเพื่อทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยการทำงานของวงจรสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานนี้จะเริ่มจากการเก็บสะสมพลังงานจากการเก็บเกี่ยวพลังงานไว้ในตัวเก็บประจุ จนกระทั่งมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 5.2 โวลต์ จึงทำการจ่ายไฟให้กับโหลด จนเหลือแรงดันที่ประมาณ 3.1 โวลต์ ซึ่งในการจ่ายไฟ 1 ครั้งจะได้พลังงานประมาณ 3.9 มิลลิจูล

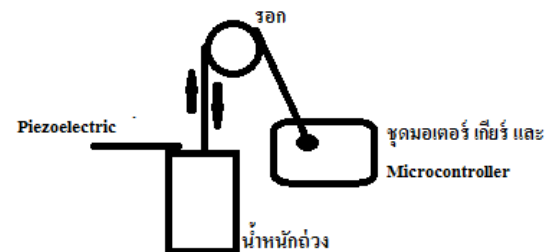


ภาพที่ 7 Piezoelectric Bending Sensor



ภาพที่ 8 วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน (EH301)

3. ทำการออกแบบอุปกรณ์สำหรับจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเดินดังภาพที่ 9 จากนั้นทำการทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนนี้



ภาพที่ 9 อุปกรณ์จำลองแรงสั่นสะเทือนจากการเดิน

4. ติดตั้งชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน กับ Li-ion หรือ Li-Polymer เพื่อทดสอบการนำพลังงานจากการเก็บเกี่ยวไปชาร์จพลังงานให้แบตเตอรี่

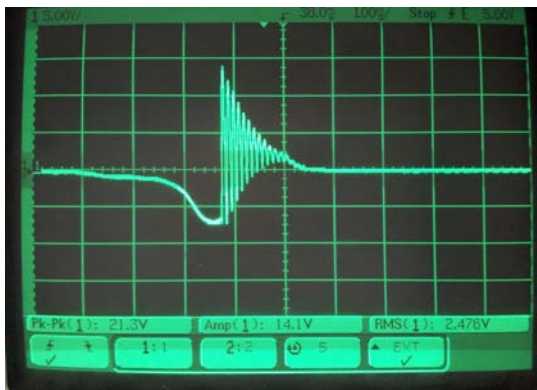
5. ออกแบบและทดสอบอุปกรณ์สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวกับสิ่งมีชีวิต เช่น คน และวัว เป็นต้น

ผลการวิจัย

จากการทดสอบอุปกรณ์เบื้องต้น โดยใช้นิ้วกดแผ่น Piezoelectric พบว่าจะเกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วสูงสุดประมาณ 21.3 โวลต์ ดังภาพที่ 10

จากการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยการติดตั้ง Piezoelectric กับวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน พบว่า จะต้องทำการกดแผ่น Piezoelectric ประมาณ 320 ครั้ง จึงจะทำให้วงจรสามารถสะสมพลังงานจาก 3.1 โวลต์

เป็น 5.2 โวลต์ และจ่ายพลังงานไฟฟ้า 8.3 มิลลิจูลให้กับโหลดได้ 1 ครั้ง



ภาพที่ 10 แรงดันไฟฟ้าจากการติดแผ่น Piezoelectric

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยจะพบว่า การติดแผ่น Piezoelectric ประมาณ 320 ครั้ง จะได้พลังงาน 8.3 มิลลิจูล หมายความว่า การติด 1 ครั้ง จะได้พลังงานประมาณ 25.94 ไมโครจูล ซึ่งการทำงานของเซนเซอร์โนด (CC2530 ZNP Mini Target board) ขณะ Sleep จะใช้กระแส 4.8 ไมโครแอมป์ (Suyash and Morten, 2011) สมมติที่ 3 โวลต์ (CC2530 สามารถทำงานได้ที่ 2-3.6 โวลต์) จะได้ $P = I * V = 4.8 \mu A * 3 V = 14.4$ ไมโครวัตต์

$$\text{จาก } E = P * t$$

$$\text{จะได้ } 20.75 \mu J = 14.4 \mu W * t, t = 1.44 \text{ วินาที}$$

หมายความว่า การติด Piezoelectric 1 ครั้ง จะสามารถเป็นพลังงานให้กับเซนเซอร์โนดที่ Sleep ได้ประมาณ 1.44 วินาที

การส่งข้อมูลของเซนเซอร์โนดไร้สาย 1 แพ็กเก็ต จะใช้กระแสเฉลี่ย 3.46 มิลลิแอมป์ (Suyash and Morten, 2011) และใช้เวลาในการส่งทั้งหมด 58.5 มิลลิวินาที สมมติที่ 3 โวลต์ จะได้

$$E = 3.46 \text{ mA} * 3 \text{ V} * 58.5 \text{ ms} = 0.67 \text{ มิลลิจูล}$$

แสดงว่าการส่งข้อมูลจำนวน 1 แพ็กเก็ต จะใช้พลังงาน 0.67 มิลลิจูล

หมายความว่า การส่งข้อมูล 1 ครั้ง จะต้องใช้พลังงานจากการติด Piezoelectric จำนวน $0.67 \text{ mJ} / 20.75 \mu J = 32.29$ ครั้ง

ถ้าต้องการให้เซนเซอร์โนดที่ Sleep ส่งข้อมูลเมื่อมีพลังงานเพียงพอสำหรับการส่ง และสมมติให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกถูกติด 1 วินาทีต่อครั้ง จะได้พลังงานที่เหลือจากการ Sleep เป็น

$$20.75 - 14.4 = 6.35 \text{ ไมโครจูลต่อวินาที}$$

การส่งข้อมูล 1 แพ็กเก็ต จะใช้พลังงาน 0.67 มิลลิจูล จะได้

$$0.67 / 0.00635 = 105.5 \text{ วินาที}$$

แสดงว่าจะสามารถส่งข้อมูลได้ทีละคาบประมาณ 105.5 วินาทีต่อครั้ง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า พลังงานที่ได้จะเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับเซนเซอร์โนดไร้สายก็ต่อเมื่อมีการสั่นของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมากเพียงพอ และจะต้องปรับความถี่ในการส่งข้อมูลให้เหมาะสม เช่น จากกรณีข้างต้นถ้าเพียโซอิเล็กทริกสั่นอย่างเต็มที่ (เช่น ถูกกด) 1 ครั้ง ใน 1 วินาที เซนเซอร์โนดจะสามารถส่งข้อมูลได้ทีละคาบประมาณ 105 วินาทีต่อ 1 แพ็กเก็ต เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการจัดทำอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ชัยชัย คุณบัว. 2554. เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและการประยุกต์ใช้. วารสารศูนย์บริการวิชาการ, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 19(3-4).
- APC International Ltd. 2011. Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.
- Boram, Y., and Kwang-Seok, Y. 2011. Efficient energy harvesting from human motion using wearable piezoelectric shell structures. Department of Electron. Eng. Sogang University.
- Donelan, JM., Naing, V., and Qingguo, Li. 2009. Biomechanical energy harvesting. Locomotion Lab. Simon Fraser University.
- Guan, MJ., and Liao, WH. 2007. Characteristics of Energy Storage Devices in Piezoelectric Energy Harvesting Systems. Department of Mechanical and Automation Engineering. The Chinese University of Hong Kong. Shatin, N.T. Hong Kong, China.
- Gyuhae, Park. 2006. Overview of Energy Harvesting Systems (for low-power electronics). LANL Institutes. Los Alamos National Lab.
- Moulson, AJ., and Herbert, JM. 2003. Electronicceramics: materials, properties, applications (2nd ed.). Wiley.
- Suyash, J., and Morten, B. 2011. Measuring the Power Consumption on CC2530ZNP Using CC2530 ZNP Mini Kit. Application Note AN108. Texas Instruments.
- Vijay, R., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J., and Mani, S. 2005. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. Department of Electronic Eng. California University.
- Xin, L., and Shuang-Hua Y. 2010. Thermal energy harvesting for WSNs. Department of Computer Science. Loughborough University.
- Yang, W., and Guo, T. 2010. The Non-uniform Property of Energy Consumption and its Solution to the Wireless Sensor Network. College of Engineering. Graduate University of the Chinese Academic of Science.