การเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยพอลิเมอร์ฉลาด

Harvesting on Ambient Mechanical Energy with Smart Polymers

ชัชชัย พุทซ้อน*
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Chatchai Putson*
Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University.

บทคัดย่อ

พอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกและอิเล็กทรอสตริกทีฟมีความสามารถในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกัน สามารถแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล กลไกที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้ถูกนำไปประยุกต์เป็นอย่างกว้างขวางในลักษณะของตัวกระตุ้นและตัวรับรู้ เป้าหมายของการเก็บเกี่ยวพลังงานก็คือการดึงพลังงานจากแหล่งกำเนิดที่อยู่โดยรอบวัสดุมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเร็วๆ นี้พอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกและอิเล็กทรอสตริกทีฟได้รับความสนใจขึ้นมาใหม่ในฐานะวัสดุฉลาดสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน จากการค้นคว้าพบว่าเป็นไปได้ที่พลังงานที่เก็บเกี่ยวจากการสั่นในสิ่งแวดล้อมด้วยพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกและอิเล็กทรอสตริกทีฟนั้นเพียงพอให้สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เลี้ยงตัวเองได้โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ บทความนี้จึงมุ่งหมายนำเสนอภาพรวมอันประกอบด้วยหลักการของการเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการสั่นในสิ่งแวดล้อมด้วยวัสดุฉลาดโดยเฉพาะพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกและอิเล็กทรอสตริกทีฟ วิธีการต่างๆ ในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าก็ได้นำมากล่าวไว้ ตลอดจนมีการอธิบายพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่น ค่าคุณภาพของการแปลงพลังงาน ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์หรือทำนายความสามารถของการแปลงพลังงานของวัสดุ ในท้ายที่สุดแล้วถึงแม้ว่าจะมีความได้เปรียบของการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยพอลิเมอร์ฉลาดว่าอาจช่วยให้ได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีน้ำหนักเบาและกินไฟน้อยมาก อย่างไรก็ตามยังต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของพอลิเมอร์ต่อไป

คำสำคัญ : ไพอิโซอิเล็กทริก อิเล็กทรอสตริกทีฟ วัสดุฉลาด การเก็บเกี่ยวพลังงาน

Abstract

Piezoelectric and electrostrictive polymers have demonstrated an ability to convert mechanical energy into electrical energy and vice versa. The mechanisms relating to the energy conversion have been exploited in an extensive range of applications, including sensors and actuators. The goal of energy harvesting is to capture the energy surrounding the material and then convert it into usable electrical energy. Recently, piezoelectric and electrostrictive polymer have gained their renewed interest as smart materials for energy harvesting. From the literature, it is possible that the energy harvested on ambient vibration with piezoelectric and electrostrictive polymers can lead to the self-powered electronic devices, e.g., wireless sensors without the battery usage. This article thus aims to present an overview of the principles of the energy harvesting on ambient vibration with smart materials focusing piezoelectric and electrostrictive polymers. Different approaches for converting the mechanical energy into the electrical energy are included. Important parameters such as the figure of merit for analyzing or predicting the energy conversion capability of the material are described. Finally, the advantages of energy harvesting with these smart polymers in order to possibly meet the needs in light-weight and ultra-low power electronics have also been suggested. However, the enhancements in energy conversion of the polymer materials are further needed.

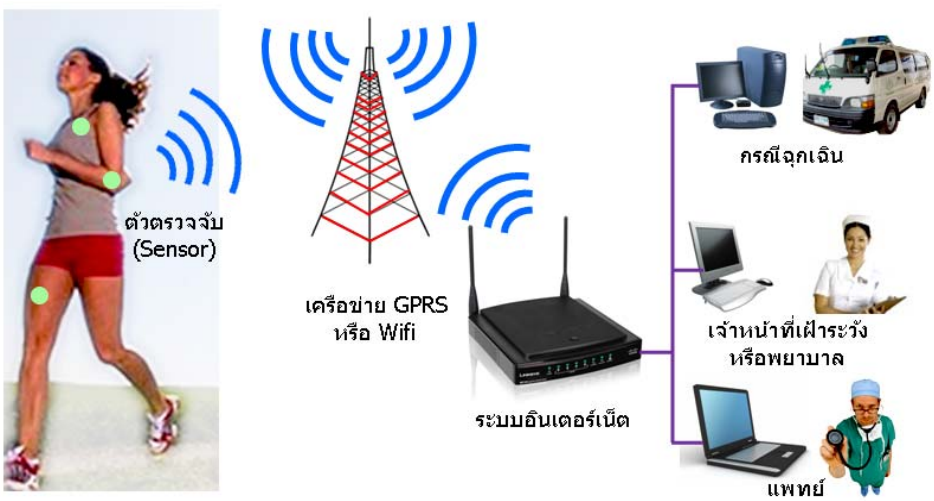
Keywords : piezoelectric, electrostrictive polymer, smart material, energy harvesting

***E-mail:** chatchai.p@psu.ac.th

บทนำ

ทุกวันนี้วิกฤตการณ์ด้านพลังงานมีผลกระทบต่อการเติบโตของประเทศทั้งภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม แหล่งเชื้อเพลิงหลักหรือพลังงานเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil source) ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ที่กล่าวมานี้นับวันจะมีปริมาณน้อยลงทุกที และคงหมดไปในอนาคต อีกทั้งราคาของแหล่งพลังงานเหล่านี้มีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้แหล่งพลังงานเหล่านี้ยังก่อผลเสียโดยเฉพาะเรื่องปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) นำไปสู่สภาวะโลกร้อน การมองหาพลังงานทดแทนซึ่งนำมาใช้แทนแหล่งเชื้อเพลิงหลักและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นพลังงานสะอาดหรือพลังงานสีเขียว (Green energy) มีความสำคัญและมีความต้องการอย่างต่อเนื่อง การเก็บเอาพลังงานจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ล้อมรอบ (Ambient energy) หรือพลังงานที่เหลือใช้ (Waste energy) นำมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าและกักเก็บสะสมไว้เพื่อป้อนอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting หรือ Energy scavenging) จัดเป็นอีกช่องทางหนึ่งสำหรับพลังงานทดแทนในอนาคต ในปัจจุบันการเก็บเกี่ยวพลังงานมีบทบาทอย่างมากสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ (ตัวรับรู้) แบบไร้สาย (Wireless sensor network) และได้รับความสนใจเพิ่มมากยิ่งขึ้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เข้ากับระบบติดตามเฝ้าระวังผู้ป่วย (Health care monitoring system) โดยอาศัยเครือข่ายพลังงานเลี้ยงตัวเอง (Self power network) เข้ากันกับตัวตรวจจับ (Sensor)โดยไม่อาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ แสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้ในพื้นที่หรือบริเวณที่เข้าถึงได้ยาก หลีกเลี่ยงข้อจำกัดของแบตเตอรี่ที่ต้องเติมหรืออัดไฟ (Recharge) การเปลี่ยนแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุการใช้งาน และอีกทั้งความเป็นพิษของสารองค์ประกอบในตัวแบตเตอรี่ เทคโนโลยีการเฝ้าระวังผู้ป่วยนี้กำลังเป็นที่นิยมแพร่หลาย เพื่อแก้ปัญหาเรื่องจำนวนแพทย์หรือเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์มีไม่เพียงพอต่อผู้ป่วย อีกทั้งเป็นเพิ่มความสามารถในการเฝ้าติดตามดูแลผู้ป่วยหรือผู้ที่อยู่ในสภาวะเสี่ยงต่อโรคอย่างใกล้ชิดซึ่งสามารถกระทำได้ทุกสถานที่ทุกเวลาไม่เฉพาะแต่ในโรงพยาบาลเท่านั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องมีระบบเฝ้าสังเกตและระบบเตือนเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับผู้ป่วย ระบบเฝ้าระวังนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยชุดตรวจจับแบบเครือข่ายไร้สาย ซึ่งสามารถติดตัวผู้ป่วยไปได้ทุกที่ทุกเวลาแบบตามเวลาจริง (Real time) และไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อผู้ป่วย ตัวตรวจจับจะคอยตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้น เช่น ตรวจการเต้นของหัวใจ การเคลื่อนไหว อุณหภูมิของร่างกายผู้ป่วย และอ่านข้อมูลจากตัวตรวจจับแล้วส่งข้อมูลไปยังศูนย์กลางของโรงพยาบาล ซึ่งแพทย์หรือพยาบาลสามารถแก้ไขได้ทันท่วงที เพื่อลดปัญหาที่อาจจะลุกลามมากยิ่งขึ้น ระบบติดตามและเฝ้าระวังยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสิ่งไม่มีชีวิต เช่น ระบบติดตามเฝ้าระวังตัวตึกหรือสะพาน (Structural health monitoring system) อีกด้วย

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าหัวใจของระบบเฝ้าติดตามนั้นคือวัสดุฉลาด (Smart material) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดและในขณะเดียวกันวัสดุฉลาดนี้ได้ทำหน้าที่เป็นวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน (Harvesting energy materials) สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไปพร้อมกันโดยแปลงพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานทางกล (แรงดันเลือด) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเลี้ยงตัวเองโดยไม่พึ่งพาแบตเตอรี่ ในบทความนี้จะกล่าวถึงหลัก



ภาพที่ 1 แสดงระบบติดตาม เฝ้าระวังสุขภาพ (Health care monitoring system)

การเก็บเกี่ยวพลังงานกลหรือการสั่นด้วยวัสดุฉลาดชนิดพอลิเมอร์ (Smart polymer) อธิบายปรากฏการณ์ไฟฟ้ากลของพอลิเมอร์ฉลาดเพื่อให้เข้าใจหลักการแปลงพลังงานการสั่นเป็นพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งแสดงตัวบ่งชี้ความสามารถการเก็บเกี่ยวพลังงานซึ่งจะนำไปสู่การค้นคว้าวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าและประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานให้สูงยิ่งขึ้น

แหล่งพลังงานเก็บเกี่ยว

การเก็บเกี่ยวพลังงานนั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดพลังงานและวัสดุอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานทดแทนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามแหล่งที่มา คือพลังงานทดแทนชนิดสิ้นเปลือง ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น และพลังงานทดแทนชนิดหมุนเวียน ซึ่งสามารถหมุนเวียนใช้ได้อีก แหล่งพลังงานทดแทนชนิดหลังนี้จัดเป็นพลังงานสะอาดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับตามขนาดของพลังงานที่ได้รับ คือ (1) ระดับมหัพภาค ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น และ (2) ระดับจุลภาค ได้แก่ พลังงานที่เหลือใช้ เช่น พลังงานความร้อนหรือพลังงานการสั่นจากร่างกายของคน เครื่องยนต์ เครื่องจักร เป็นต้น แหล่งพลังงานทดแทนระดับมหัพภาคที่ได้รับความสนใจคือพลังงานแสงอาทิตย์อาศัยเซลล์สุริยะ (Solar cell) แปลงพลังงานจากแสงแดดเป็นพลังงานไฟฟ้า จัดเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ค่าความหนาแน่นพลังงานมากสุด (ในกรณีรับแสงโดยตรง) มีค่า 15,000 ไมโครวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($\mu W/cm^3$) แต่เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์มีข้อจำกัดในเรื่องความสม่ำเสมอของความเข้มแสงที่ได้รับ อีกทั้งยังขึ้นกับสภาพภูมิอากาศอีกด้วย จะเห็นได้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีมีเมฆให้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 150 ไมโครวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งลดลงถึง 100 เท่า (Roundy *et al*., 2003) ดังนั้นการมองหาแหล่งพลังงานที่ให้ความสม่ำเสมอและหลีกเลี่ยงข้อจำกัดด้านสภาพภูมิอากาศนั้นถูกมองมายังทางพลังงานทดแทนระดับจุลภาคเช่นพลังงานจากการเคลื่อนที่หรือการสั่นไหวโดยอาศัยวัสดุฉลาด หากนิยามวัสดุฉลาดคือวัสดุที่มีกระบวนการรับรู้หรือตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก สามารถปรับตัวได้และซ่อมแซมตัวเองได้ รวมถึงวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุ เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า ทางแม่เหล็ก หรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างองค์ประกอบภายในวัสดุ เมื่ออยู่ภายใต้สิ่งเร้าภายนอก เช่น ความร้อน ความเค้น เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงสมบัติหนึ่งไปเป็นอีกสมบัติหนึ่งอาจเป็นได้ทั้งในทิศทางเดียวหรือสามารถกลับทิศไปมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุฉลาด การเก็บเกี่ยวพลังงานกลหรือการสั่นด้วยอาศัยวัสดุฉลาดทำหน้าที่เป็นแปลงพลังงานทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้า วัสดุฉลาดในช่วงแรกที่รู้จักกันคือวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials) ซึ่งมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางกลไปเป็นพลังงานทางไฟฟ้าและในทางกลับกัน แสดงค่าความหนาแน่นพลังงานขณะให้แรงกดเท่ากับ 330 ไมโครวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ได้สามาถนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่น นาฬิกาแบบตัวเลขและเครื่องอ่านฉลากอิเล็กทรอนิกส์ (RFID reader, RFID: Radio Frequency Identification) ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 10 ไมโครวัตต์ เครื่องช่วยฟัง (Hearing aid) ใช้กำลังไฟฟ้า 100 ไมโครวัตต์ การพัฒนาความสามารถการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงยิ่งขึ้นก็สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้เครื่องเล่นวิทยุ FM แบบพกพา ตัวรีโมทของโทรทัศน์ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าในหน่วยมิลลิวัตต์ เป็นต้น

การแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ฉลาด

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานกลหรือการสั่นนั้นสามารถจำแนกออกเป็นสองจำพวก พวกแรกคือการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุฉลาด และไม่อาศัยวัสดุฉลาด การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุฉลาดเป็นที่นิยมได้แก่ วิธีพิไซอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric harvesting energy) และวิธีอิเล็กทรอสตริกทีฟ (Electrostrictive harvesting energy) เนื่องจากสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากวัสดุไม่พึ่งพาอุปกรณ์เสริม เช่น ขดลวด แท่งแม่เหล็ก ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์เข้ากับระบบกลไกขนาดเล็กประกอบด้วยโครงสร้างทางกลและวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน (MEMS : Micro electro mechanical systems) หรืออุปกรณ์ที่มีขนาดกระทัดรัด พกพาและเคลื่อนย้ายได้ง่าย วัสดุฉลาดที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางได้แก่ เซรามิกไพอิโซอิเล็กทริก แม้ว่ามีสมบัติไฟฟ้ากลที่ดีแต่จากคุณลักษณะเฉพาะตัวของเซรามิก ที่มีข้อเสียคือเป็นวัสดุเปราะ ง่ายต่อการแตกหัก และมีขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูปที่ยุ่งยาก ดังนั้นปัจจุบันวัสดุชนิดเซรามิกถูกแทนที่ด้วยพอลิเมอร์ ซึ่งคุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น โค้งงอ สามารถเตรียมขึ้นรูปได้ง่าย ราคาไม่แพง และสามารถเตรียมบนพื้นที่ใหญ่ๆหรือบนรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย อีกทั้งสามารถปรับเปลี่ยนวิธีการสังเคราะห์เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการได้ง่าย

1. พอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริก

พอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกเป็นที่นิยมได้แก่ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) และโคพอลิเมอร์

พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอธีลีน (Polyvinylidene fluoride with Trifluoroethylene, PVDF – TrFE) ซึ่งแสดงปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถให้กระแสไฟฟ้า เมื่อได้รับแรงกด บีบหรือดึง เนื่องจากเกิดความเค้นภายในวัสดุ ทำให้วัสดุมีการกระจัดทางไฟฟ้า (Electrical displacement) สามารถก่อให้เกิดประจุไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าบวก (Positive charge) อยู่ที่ผิวด้านหนึ่งและประจุลบ (Negative charge) อยู่ที่ผิวอีกด้านหนึ่งของวัสดุ ปริมาณของการกระจัดทางไฟฟ้านี้จะแปรผันตามความเค้น เรียกว่า ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct piezoelectric effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกนำใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบอ้อม (Converse piezoelectric effect) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุในลักษณะยืดออก (Extension) หรือหดเข้า (Contraction) สัมพันธ์กับทิศทางการกระจัดของไดโพลภายในวัสดุ วัสดุเกิดความเครียด (Strain) อันเป็นผลจากการกระจัดในสนามไฟฟ้า และความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ ซึ่งปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบอ้อมนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกระตุ้น การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกนั้นอาศัยปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบตรง เมื่อวัสดุได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงกลซ้ำๆ ต่อเนื่องกันเท่ากับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (Dewei & Jing, 2009) สามารถอธิบายด้วยสมาการความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่าย

$$S = sT + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \varepsilon E \quad (2)$$

เมื่อ D คือเวกเตอร์การกระจัดทางไฟฟ้า S คือความเครียด T คือความเค้น E คือความเข้มสนามไฟฟ้า ε คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) s คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic compliance coefficient) และ d คือสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการแปลงความเค้นเป็นไฟฟ้าหรือบอกถึงประจุที่เกิดขึ้นเมื่อให้แรงกระทำ ค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกนั้นสามารถเขียนในเทอมของศักย์ไฟฟ้า g เรียกว่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกศักย์ไฟฟ้า โดยค่าสัมประสิทธิ์ d และ g มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน $d = \varepsilon g$ ดังนั้นจากสมการที่ (2) เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความเค้น (T) พอลิเมอร์จะให้กระแสไฟฟ้า (I) ไหลในวงจรอาศัยความสัมพันธ์กับค่าการกระจัดทางไฟฟ้าตามสมการ

$$I = \int \frac{dD}{dt}\, dA \quad (3)$$

โดยไม่จำเป็นต้องให้สนามไฟฟ้าภายนอก จะเห็นได้ว่าหากต้องการกระแสไฟฟ้าสูงพอลิเมอร์ควรมีค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกสูง

2. พอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟ

พอลิเมอร์อิเล็กโทรสตริกทีฟจัดเป็นพอลิเมอร์ทางไฟฟ้า (Electroactive polymers, EAPs) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดตอบสนองกับสนามไฟฟ้า การประยุกต์ใช้วัสดุ EAPs ส่วนใหญ่ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกระตุ้น พอลิเมอร์อิเล็กโทรสตริกทีฟยังสามารถนำมาใช้แปลงพลังงาน (Energy conversion) อาศัยปรากฏการณ์อิเล็กโทรสทิกทีฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัดทางไฟฟ้าเป็นแบบกำลังสอง (Quadratic effect)

$$S = sT + ME^2 \quad (4)$$

$$D = \varepsilon E + 2ME \quad (5)$$

เมื่อ D คือเวกเตอร์การกระจัดทางไฟฟ้า S คือความเครียด T คือความเค้น E คือความเข้มสนามไฟฟ้า ε คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า s คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic compliance coefficient) และ M คือสัมประสิทธิ์อิเล็กทรอสตริกทีฟ (Electrostrictive coefficient) เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความเค้น (T) พอลิเมอร์จะให้กระแสไฟฟ้า (I) ไหลในวงจรอาศัยความสัมพันธ์กับค่าการกระจัดทางไฟฟ้า ($I = \int_A \frac{dD}{dt} dA$ โดย A เป็นพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (Electrode) บนพอลิเมอร์) เช่นเดียวกันกับพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกแต่จากสมการที่ 5 นั้นการเกิดกระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟจำเป็นต้องให้สนามไฟฟ้าภายนอกด้วยเพื่อเหนี่ยวนำโพลาไรเซชั่นให้พอลิเมอร์เสมือนเป็นพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกเทียม (Pseudo piezoelectric) (Cottinet *et al*., 2010) จากสมการข้างต้นค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟภายใต้การสั่นแสดงโดยสมการ (Guyomar *et al*., 2009)

$$I = 2MYE_{dc} \int_A \frac{dS_1}{dt} dA \quad (6)$$

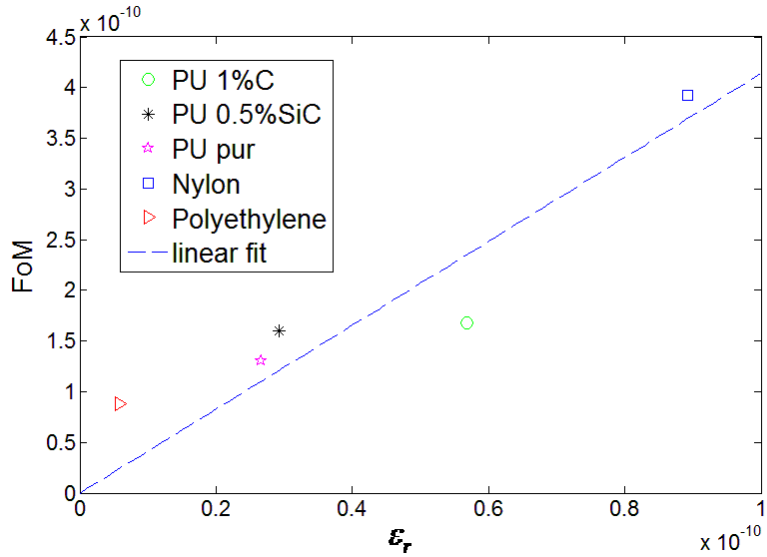
และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานของพอลิเมอร์ชนิดนี้ (Figure of merit, *FoM*) เท่ากับ MY ซึ่งเป็นตัวแปรบ่งบอกความสามารถในการแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้า โดย Y คือค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) Guillot และ Balizer (Guillot & Balizer, 2003) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กทรอสตริคทีฟและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น

$$M = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)^2}{\varepsilon_r Y} \quad (7)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานของพอลิเมอร์สามารถเขียนใหม่เป็น

$$FoM = MY = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)^2}{\varepsilon_r} \quad (8)$$

ความสัมพันธ์นี้ยืนยันด้วยภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง *FoM* และค่าไดอิเล็กทริก ε_r ของพอลิเมอร์หลายชนิด จากความสัมพันธ์นี้หมายความว่าหากต้องการพอลิเมอร์ให้กระแสไฟฟ้าออกมามากๆ จำเป็นต้องใช้พอลิเมอร์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงๆ จากความสัมพันธ์นี้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาค่ากระแสหรือกำลังจากพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริคทีฟโดยเพิ่งค่าไดอิเล็กทริกให้สูงยิ่งขึ้น (Lebrun *et al*., 2009)



ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า *FoM* และ ε_r ของพอลิเมอร์ EAPs หลายชนิด (Lebrun *et al*., 2009)

การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยพอลิเมอร์ฉลาด

การเก็บเกี่ยวพลังงานโดยอาศัยพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกแสดงดังภาพที่ 3(ก) พอลิเมอร์ถูกติดบนคานจากนั้นให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดทำให้คานสั่น (Rakbamrung *et al*., 2010) สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกนั้นสามารถแปลงพลังงานกลจากการสั่นไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงอาศัยปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบตรงตามที่กล่าวมาแล้ว กระแสที่ให้ออกมาจากพอลิเมอร์เมื่อพอลิเมอร์มีความเค้นถูกแปลงด้วยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) ตัวเก็บประจุ และชุดวงจรรักษาแรงดันก่อนจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากศักย์ตกคร่อมบนโหลดหรือตัวต้านทานโดยอาศัยสมการ

$$P_{out} = V_{DC}^2 / R \quad (9)$$

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้นั้นสัมพันธ์กับแอมปลิจูดของการสั่นของคานแสดงในเทอมเวลาแสดงดังภาพที่ 3(ข) หากมีการเชื่อมต่อกับตัวต้านทานที่เหมาะสม (Optimal load, R_{opt}) ก็จะได้กำลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งตัวต้านทานที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของวัสดุ

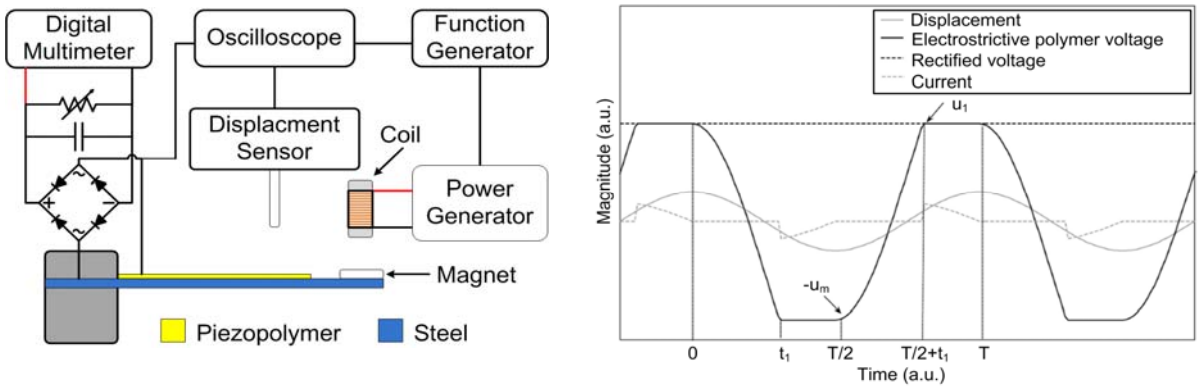
$$R_{opt} = 1/2\pi fC \quad (10)$$

เมื่อ *C* เป็นค่าตัวเก็บประจุของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก และ *f* เป็นความถี่การสั่น ซึ่งกำลังที่ได้เป็นสัดส่วนสัมพันธ์กับความถี่และความเค้น โดยกำลังไฟฟ้ามีค่าพลังงานมากสุดภายใต้การสั่นที่ความถี่กำทอน (Shashank P., 2005)

การเลือกใช้วัสดุไพอิโซอิเล็กทริกและวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงมีผลให้เพิ่มความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของการเก็บเกี่ยวพลังงานพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริก (η) เป็นอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ออกมาต่อพลังงานกลที่ให้พอลิเมอร์ ค่า η เท่ากับผลคูณของสัมประสิทธิ์ *d.g* ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) (Swallow *et al*., 2008) นอกจากนี้ค่า η ยังสามารถบ่งบอกจากค่าสัมประสิทธิ์คัปปลิง (Coupling coefficient, *k*) ซึ่งเป็นอันตรกิริยาคู่ควบระหว่างตัวแปรทางกลกับตัวแปรทางไฟฟ้าและมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกคือ

$$k^2 = \frac{d^2}{s\varepsilon} \quad (11)$$

ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุในการเก็บเกี่ยวพลังงาน พอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกมีค่า *d.g* สูงกว่า



(ก) (ข)

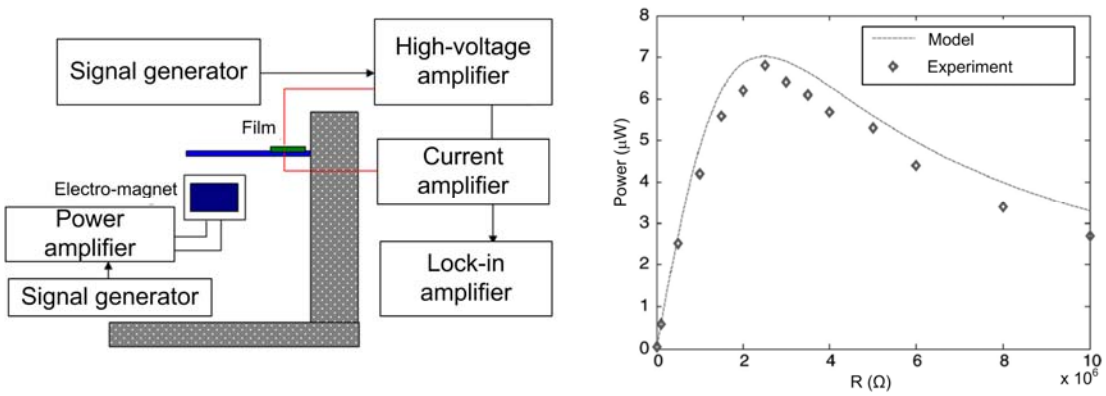
ภาพที่ 3 (ก) แสดงการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นอาศัยพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริก และ (ข) ศักย์ไฟฟ้าของการสั่น (Rakbamrung *et al*., 2010)

กลุ่มเซรามิก จึงทำให้กลุ่มพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น (Dewei & Jing, 2009)

สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นด้วยพอลิเมอร์อิเล็กทรอสติกทีฟ แสดงดังภาพที่ 4(ก) พอลิเมอร์จะถูกติดบนคานเหล็ก คานถูกสั่นด้วยสนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนี่ยวนำ ขณะเดียวกันป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้กับพอลิเมอร์ เมื่อคานสั่นเกิดความเค้นบนพอลิเมอร์ เกิดกระแสไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์กระแสสลับบนตัวต้านทานตกคร่อม กำลังไฟฟ้าสามารถหาได้จากความต่างศักย์ตกคร่อม $P = I^2R$ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าในการเก็บเกี่ยวพลังงานของพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟโดยอาศัยสมการที่ (4) และ (5) มีค่าเป็น

$$P_{Harvesting} = 2\frac{t}{\varepsilon_o \varepsilon_r \omega L w}(M_{31}Y)^2 . E_{dc}^2 . \left[\int_A \left(\frac{\partial \Delta S_1}{\partial t}\right).dA\right]^2 \quad (12)$$

(Cottinet *et al*., 2010 ; Putson *et al*., 2011) จากสมการกำลังไฟฟ้านี้สอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากทดลองของพอลิเมอร์พอลิยูรีเทนแสดงดังภาพ 4(ข) ที่ความถี่ของการสั่น 100 เฮิรตซ์ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง 10 โวลต์ต่อไมครอน จากกราฟพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเข้าใกล้ 7 ไมโครวัตต์ ที่ความต้านทานเหมาะสม 2.5 เมกะโอห์ม แม้ว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานของพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟจำเป็นต้องอาศัยพลังงานภายนอก แต่สามารถปรับปรุงโดยให้พอลิเมอร์มีความเครียดบนพอลิเมอร์สูงขึ้นเพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากพอลิเมอร์มากกว่าสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก และขณะเดียวกันสามารถพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานของพอลิเมอร์โดยการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงยิ่งขึ้นเป็นอีกทางหนึ่งในเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานจากพอลิเมอร์ชนิดนี้ให้มากยิ่งขึ้น



(ก) (ข)

ภาพที่ 4 (ก) แสดงการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นอาศัยพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริก และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและค่าต้านทานของพอลิเมอร์ PU (Cottinet *et al*., 2011 ; Putson *et al*., 2011)

บทสรุป

จากภาพรวมที่นำเสนอในบทความนี้ จะเห็นว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการสั่นในสิ่งแวดล้อมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นจัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนซึ่งน่าจะได้รับความสนใจมากขึ้นๆ ในอนาคต ทั้งนี้เพราะพลังงานที่ได้จัดเป็นพลังงานสะอาด แม้ว่ากำลังไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้จะอยู่ในระดับไมโครวัตต์ แต่ก็อาจพอเพียงสำหรับป้อนสิ่งประดิษฐ์หรืออุปกรณ์พกพาซึ่งกินไฟต่ำมาก เช่น นาฬิกาข้อมือแบบตัวเลข เครื่องอ่านฉลากอิเล็กทรอนิกส์ เซนเซอร์จิ๋วสำหรับตรวจสุขภาพ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายชนิดต่างๆ ฯลฯ นอกจากนั้น เทคโนโลยีต่างๆ ในปัจจุบันต่างมุ่งเน้นพัฒนาอุปกรณ์พกพาและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ให้มีน้ำหนักเบาและขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยลงไปเรื่อยๆ พอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกและพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟจึงคาดว่าจะเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงาน ทั้งนี้เพราะมีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นดี เตรียมง่าย ราคาไม่แพง ในการพิจารณาความสามารถในการแปลงพลังงานของพอลิเมอร์ไพอิโซอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ ไพอิโซอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบ ในขณะที่การแปลงพลังงานของพอลิเมอร์อิเล็กทรอสตริกทีฟต้องการพอลิเมอร์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง สัมประสิทธิ์และค่าคงที่เหล่านี้คือพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางให้นักวิจัยคิดค้นพัฒนาวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกและวัสดุอิเล็กทรอสตริกทีฟชนิดใหม่ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานให้มากขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Cottinet, P.-J., Guyomar, D., Guiffard, B., Putson, C., & Lebrun, L. (2010). Modeling and experimentation on an electrostrictive polymer composite for energy harvesting. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 57*(4), 774-784.

Cottinet, P.-J., Lallart, M., Guyomar, D., Guiffard, B., Lebrun, L., Sebald, G. & Putson, C. (2011). Analysis of ac-dc conversion for energy harvesting using an electrostrictive polymer P(VDF-TrFE-CFE). *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 58*(1), 30-42.

Dewei, J., & Jing, L. (2009). Human power-based energy harvesting strategies for mobile electronic devices. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 3*(1), 27-46.

Guillot, F. M., & Balizer, E. (2003). Electrostrictive effect in polyurethanes. *Journal of Applied Polymer Science, 89*, 399-404.

Guyomar, D., Lebrun, L., Putson, C., Cottinet, P.-J., Guiffard, B., & Muensit, S. (2009). Electrostrictive energy conversion in polyurethane nanocomposites. *Journal of Applied Physics, 106*, 014910.

Lebrun, L., Guyomar, D., Guiffard, B., Cottinet, P.-J., & Putson, C. (2009). The characterisation of the harvesting capabilites of an electrostrictive polymer composite. *Sensors and Actuators A: Physical, 253*, 251-257.

Putson, C., Lebrun, L., Guyomar, D., Muensit, N., Cottinet, P.-J., Seveyrat, L., & Guiffard, B. (2011). Effects of copper filler sizes on the dielectric properties and the energy harvesting capability of nonpercolated composites. *Journal of Applied Physics, 109*, 024104.

Rakbamrung, P., Lallart, M., Guyomar, D., Muensit, N., Thanachavanont, C., Lucat, C., Guiffard, B., Petit, L., & Sukwisut P. (2010). Performance comparison of PZT and PMN-PT piezoceramics for vibration energy harvesting using standard or nonlinear approach. *Sensors and Actuators A: Physical, 163*, 493-500.

Roundy, S., Wright, P., & Rabaey, J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications, 26*, 1131-1144.

Shashank, P. (2005). Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. *Applied Physics Letters, 87*, 184101.

Swallow, L. M., Luo, J. K., Siores, E., Patel, L., & Dodds, D. (2008). A piezoelectric fiber composite based energy harvesting device for potential wearable applications. *Smart Materials and Structures, 17*, 025017.