

โมเดลพื้นกระเบื้องเพียโซอิเล็กทริกจากโครงสร้างโมเลกุลผลึกควอตซ์ ด้วยระบบการแปลงพลังงานกลให้เปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าบนทางเดินและพื้นถนน จากโปรแกรมซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองทางฟิสิกส์หลายมิติ

Piezoelectric Floor Tile Model from Quartz Molecular Structure by Using a System that Turns Mechanical Energy into Electrical Energy on Roads and Pavements by COMSOL Multiphysics

เชมทัต ใจซื่อ, อธิภัทร วุฒิประเวศน์, ศิวกร ว่องเจริญกิจ
จิรคุณ เอ็บอัม*

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย เพชรบุรี, ตำบลเขาใหญ่, อำเภอชะอำ, จังหวัดเพชรบุรี 76120, ประเทศไทย

*อีเมลล์: bori_song@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแผ่นเพียโซอิเล็กทริก PZT-5H โครงสร้างหกเหลี่ยมที่อ้างอิงจากโครงสร้างผลึกของควอตซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีออกแบบโครงสร้างโมเลกุลควอตซ์ และวิธี System-Level Simulation (SLS) ของ Juan J. และ Nan Chen กระบวนการวิจัยเริ่มจากการแปลงข้อมูลผลึกศาสตร์เป็นโครงสร้างเรขาคณิตด้วยโปรแกรม GeoGebra ก่อนสร้างแบบจำลองสามมิติด้วย SolidWorks และจำลองการทำงานผ่าน COMSOL Multiphysics เพื่อวิเคราะห์การลดพื้นที่ช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพการสร้างกระแสไฟฟ้า และได้มีการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้าของ Lennard Jones และค่ากระแสไฟฟ้า ผลการวิจัยพบว่าค่าพื้นที่ว่าง f.Quartz (8.433×10^{-11} ตารางมิลลิเมตร), Juan J. (0.6×10^{-3} ตารางมิลลิเมตร) และ Nan Chen (0.106×10^{-4} ตารางมิลลิเมตร) โดยค่าความต่างศักย์ที่ได้ f.Quartz (0.1291 โวลต์) ซึ่งให้ค่าความต่างศักย์สูงมากกว่าแบบจำลองของ Juan J. (0.03841 โวลต์) และ Nan Chen (0.0502 โวลต์) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างหกเหลี่ยมสร้างพลังงานไฟฟ้าและสามารถกระจายความเค้นได้ดีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นนี้มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกในพื้นที่ที่มีการสั่นไหวสูง โรงงานอุตสาหกรรม และสถานพยาบาล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานและเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดในอนาคต

คำสำคัญ: เพียโซอิเล็กทริก, ควอตซ์, PZT-5H, COMSOL Multiphysics

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้านั้นเป็นสิ่งที่สำคัญ และต้องการใช้ในชีวิตประจำวันของทุกคนเป็นจำนวนมาก ซึ่งได้มีการผลิตและพัฒนาวิธีการสร้างพลังงานไฟฟ้านั้นมาหลากหลายวิธี โดยที่วิธีการสร้างพลังงานไฟฟ้านั้นมีการทำการแปลงพลังงานชนิดหนึ่งไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อน, พลังงานลม, พลังงานน้ำ, พลังงานแสงและอื่นๆ ซึ่งพลังงานนี้มีการผลิตไฟฟ้าได้

อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากสภาพอากาศและพื้นที่ภูมิประเทศ จึงมีการศึกษาและพัฒนาการสร้างพลังงานไฟฟ้า แล้วพบว่าพลังงานกลนั้นสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และได้ทำการผลิตเทคโนโลยีในการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานกล ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีนั้นก็คือเทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Technology) [1] เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) คือการที่วัตถุหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงาน

ไฟฟ้า และการเปลี่ยนกลับพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เพียโซอิเล็กทริกได้มีการนำมาใช้ประยุกต์ในชีวิตประจำวัน และในทางการแพทย์ ซึ่งการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริกนั้นมีการกระบวนการเกิดโดยมีการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาเป็นตัวสร้างพลังงานไฟฟ้า ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถเป็นคริสตัล เซรามิก หรือโพลิเมอร์ได้ [2]

การสร้างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ทำมาจาก PZT ซึ่งจะอ้างอิงรูปร่างแผ่นจากโครงสร้างหกเหลี่ยมของควอตซ์ ซึ่งควอตซ์นั้นมีการแบ่งการกระจายความเค้นหรือเครียดที่ดี ทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรับแรงได้ทุกที่เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยจะสร้างรูปหกเหลี่ยมจากการเอาจากไฟล์ผลึกศาสตร์ของควอตซ์ที่มีพิกัดมาใส่ใน COMSOL Multiphysics ซึ่งแผ่นนี้จะมีขนาดเล็ก จะใช้ความหนาตามการผลิตไฟฟ้าได้ดีโดยทดสอบบน COMSOL Multiphysics [3] ซึ่งสามารถนำแผ่นนี้มารวมกันแล้วสามารถนำไปใช้เป็นกระเบื้องพื้นได้จะเป็นโมเดลดิจิทัล และแผ่นนี้ต้องมีชิ้นส่วนต่างๆในการทำเป็นกระเบื้องอย่างอื่นมาติดด้วย ในการใช้ไฟฟ้า โดยโครงงานนี้จะสร้างตัวแผ่น PZT ในการทดสอบ

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การสร้างรูปโดยอ้างอิงจากโครงสร้างโมเลกุลควอตซ์

2.1.1 หาพิกัดเศษส่วน

พิกัดเศษส่วน (Fractional Coordinate) และเวกเตอร์แลตทิซ (Lattice Vector) ได้จากไฟล์ข้อมูลผลึกศาสตร์ (Crystallographic Information File) ซึ่งมีพิกัดเศษส่วนของ $Si = (0.446970, 0.00)$ และพิกัดเศษส่วนของ $O = (0.41350, 0.26690)$

```

database_code amcsd 0000789
chemical_formula_sum 'Si O2'
cell_length_a 4.916
cell_length_b 4.916
cell_length_c 5.4054
cell_angle_alpha 90
cell_angle_beta 90
cell_angle_gamma 120
cell_volume 113.111
expt_crystal_density_diffn 2.646
symmetry_space_group_name_H-M 'P 32 2 1'
loop_
space_group_symop_operation_xyz
'x,y,z'
'y,x,z/2+z'
'-y,x,y/2+z/2'
'-x,-y,-z/2+z'
loop_
atom_site_label
atom_site_fract_x
atom_site_fract_y
atom_site_fract_z

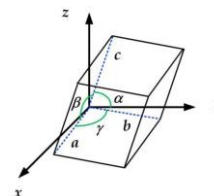
```

ภาพ 2.1 ไฟล์ผลึกศาสตร์ของควอตซ์

ที่มา: <https://www.crystallography.net/cod//1011097.html>

2.1.2 หาเวกเตอร์แลตทิซ (Lattice vector)

โดย $a = (a, 0)$ และ $b = (b \cos g, b \sin g)$ จากค่าคงที่ของแลตทิซซึ่งมีค่า $a = b = 4.916 \text{ \AA}$ และ $g = 120.0^\circ$



ภาพ 2.2 หน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกที่กำหนดโดยพารามิเตอร์แลตทิซ
ที่มา: <https://doi.org/10.3390/s19061295>

2.1.3 ใช้พิกัดเศษส่วนของ Si และ O มา

ดำเนินการสมมาตร (Symmetry Operation) โดยแทนค่า (x, y) เป็นพิกัดเศษส่วน ซึ่งไฟล์ข้อมูลผลึกศาสตร์ได้กำหนดมาเพื่อจะได้พิกัดเศษส่วนของทุกอะตอม (x, y, z)

$$\begin{aligned}
 &(y, x, 2/3 - z) \\
 &(-y, x - y, 2/3 + z) \\
 &(-x, -x + y, 1/3 - z) \\
 &(-x + y, -x, 1/3 + z) \\
 &(x - y, -y, -z)
 \end{aligned}$$

2.1.4 นำพิกัดเศษส่วนใหม่ทั้งหมด มาแปลงให้

เป็นระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate System) โดยสมการ $x = u \cdot a_x + v \cdot b_x$ และ $y = u \cdot a_y + v \cdot b_y$ โดย u, v คือพิกัดเศษส่วน a_x, a_y คือเวกเตอร์แลตทิซ a และ b_x, b_y คือเวกเตอร์แลตทิซ b และนำพิกัดคาร์ทีเซียนที่ได้มาสร้างกราฟ

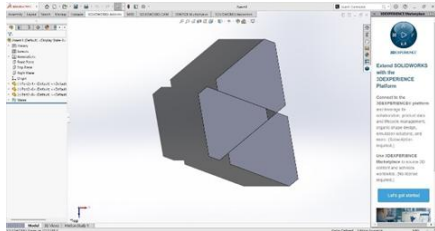
2.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพการสร้าง

ไฟฟ้าในโปรแกรม COMSOL Multiphysics

2.2.1 Import พิกัดคาร์ทีเซียน ลงใน

Solidworks แล้วทำความเข้าใจ 2 มม. และทำ 3 แผ่นต่อกัน เลือก Model Wizard แบบ 3D แล้วเลือกที่จะเพิ่มฟิสิกส์ Solid Mechanics(solid), Electrostatics (es) แล้วเลือก Piezoelectricity กดที่ Study เลือก General Studies และ Time Dependent เลือก Geometry แล้ว

Import ไฟล์รูปทรงเหลี่ยม โดยอ้างอิงจากโครงสร้างโมเลกุลควอตซ์ เลือก Parameter โดยจะสร้างตัวแปร p0 ที่ Expression 22050 และ Material แล้วใช้เป็น Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)



ภาพ 2.3 แบบจำลองโมเดลนำ 3 แผ่นต่อกัน

2.2.2 เลือก Solid Mechanics แล้วเลือกเพิ่ม Fixed Constraints แล้วเลือกด้านที่อยู่บนพื้น เพิ่ม Boundary Load แล้วเลือกด้านที่อยู่ด้านบน โดยใช้ Load type เป็น Pressure ที่ step1(t)*p0 Pa

2.2.3 เลือก Electrostatics เพิ่ม Ground แล้วเลือกด้านที่อยู่บนพื้นเพิ่ม Floating Potential แล้วเลือกด้านที่อยู่ด้านบน โดยมี Charge, Initial value เท่ากับ ศูนย์

2.2.4 เลือก Mesh แล้วเปลี่ยนเป็น Physics controlled mesh แล้วเลือกเป็น Finer แล้วใช้คำสั่ง Build All เลือก Definitions แล้วเพิ่ม Step ต่อมาเปลี่ยน Location = 0.05, From = 0, To = 1 และ เปลี่ยนให้ตั้งค่าของระบบ Size of Transition Zone ในค่าเป็น Smoothing = 0.01 เลือก Time Dependent เปลี่ยนให้ค่า Output times = range(0, 0.01, 1) แล้วสร้าง 1D Plot Group เลือก Global แล้วใช้แกน x เป็น Solid Displacement และแกน y เป็น Electric Potential แล้ว เลือก Compute

2.3 การเปรียบเทียบโมเดล

โดยจะทำการตรวจสอบพื้นที่ว่างจากทฤษฎีของ Lennard Jones

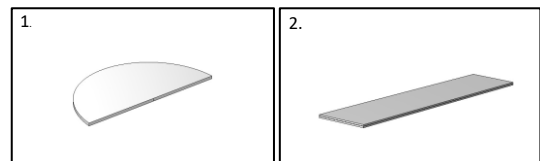
$$U(r) = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6}$$

สูตร Lennard-Jones Potential

ต่อมาจะทำการดูกราฟที่ได้จากการจำลองโมเดลและสภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยค่าที่ได้จากกราฟจะดูที่บริเวณจุดต่ำสุดของกราฟเพื่อใช้แทนในค่า และเมื่อได้ค่าจะทำการแทนลงในสมการ

$$s = \frac{d}{\frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6}}$$

จึงแทนเข้าไปในสมการของ Lennard Jones หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้จากสมการมาเปรียบเทียบกับรูปร่างที่ได้หาข้อมูลจากงานวิจัยอื่นๆ นำโมเดลของในงานวิจัยมาจำลองในสภาพแวดล้อมเดียวกัน



ภาพ 2.3 โมเดลที่นำมาเปรียบเทียบ Juan J. และ Nan Chen ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ตาราง 3.1 ค่าพื้นที่ช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้าของ Lennard Jones

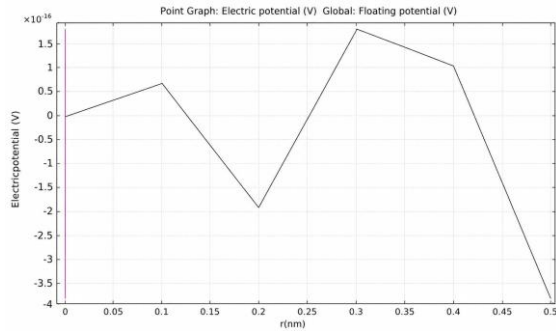
วิธีสร้าง	ค่าของ Lennard Jones (ตารางมิลลิเมตร)
f.Quartz*	8.433×10^{-11}
Juan J.	0.6×10^{-3}
Nan Chen	0.106×10^{-4}

*f.Quartz คือ รูปร่างโมเดลที่ออกแบบโดยอ้างอิงจากโมเลกุลควอตซ์

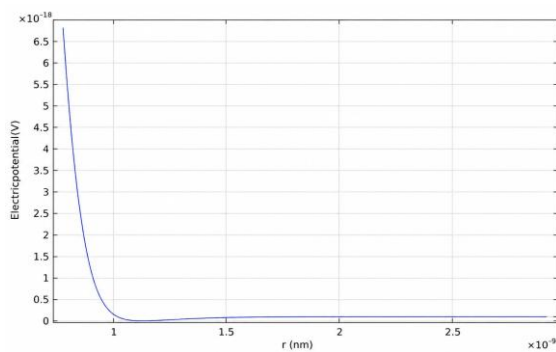
ตาราง 3.2 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้า

วิธีการสร้าง	ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)
f.Quartz*	0.1291
Juan J.	0.03841
Nan Chen	0.0502

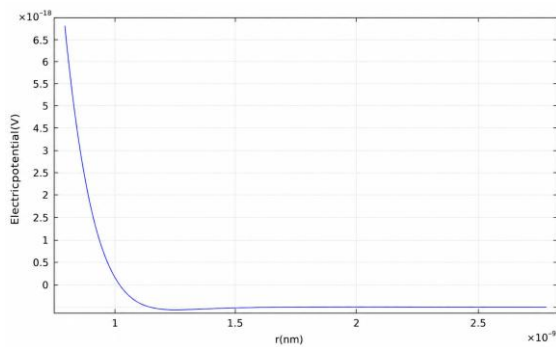
*f.Quartz คือ รูปร่างโมเดลที่ออกแบบโดยอ้างอิงจากโมเลกุลควอตซ์



ภาพ 3.1 กราฟของการแสดงศักย์ไฟฟ้าของ f.Quartz โดย แกน x คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุล แกน y คือความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า



ภาพ 3.2 กราฟของการแสดงศักย์ไฟฟ้าของ Juan J. โดย แกน x คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุล แกน y คือความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า



ภาพ 3.3 กราฟของการแสดงศักย์ไฟฟ้าของ Nan Chen โดย แกน x คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุล แกน y คือความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า

4.สรุปผลและอภิปรายผล

4.1 อภิปรายผลการทดลอง

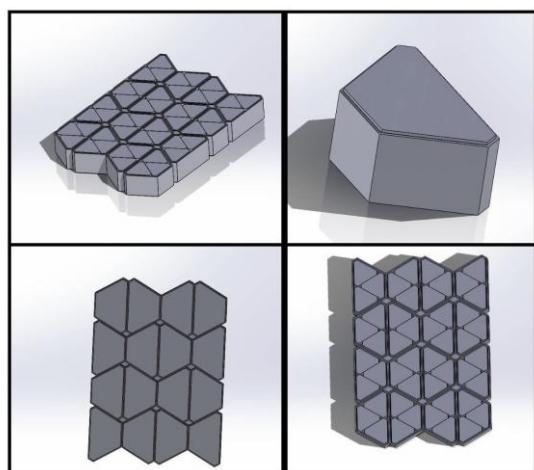
โครงสร้างโมเลกุลควอตซ์มีค่าช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ต่ำที่สุดซึ่งบอกได้ว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นจะแปรผกผันกับค่า Lennard Jones potential และให้ค่าความต่างศักย์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Juan J. และ Nan Chen สาเหตุมาจากความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกควอตซ์ ซึ่งมีรูปแบบการจัดเรียงอะตอมที่ไม่สมมาตรและมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้พื้นที่ที่ไม่เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคมีขนาดเล็กลง จึงช่วยลด

การสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ ความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างดังกล่าวยังช่วยให้การเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกระทำสามารถถ่ายทอดพลังงานไปเป็นความต่างศักย์ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลองเชิงเรขาคณิตทั่วไป โดย Juan J. เป็นรูปร่างครึ่งวงกลม และ Nan Chen เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทางตรงกันข้ามแบบจำลองของ Juan J. และ Nan Chen แม้จะสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมทั่วไปของเพียโซอิเล็กทริกได้แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านความละเอียดของโครงสร้าง ทำให้ช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้ามากกว่าส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมีขนาดต่ำกว่า นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวอาจไม่สามารถจำลองแรงระหว่างอนุภาคภายในวัสดุได้เทียบเท่ากับการอ้างอิงโครงสร้างผลึกจริง จึงเกิดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากโมเดลของควอตซ์และแบบจำลองอื่นโครงสร้างโมเลกุลที่มีความสอดคล้องกับผลึกธรรมชาติมีแนวโน้มประสิทธิภาพที่ดี

4.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างโมเลกุลควอตซ์ ให้ค่าที่แสดงประสิทธิภาพการเกิดกระแสไฟฟ้า และการสร้างความต่างศักย์ได้ดีกว่าวิธีการออกแบบของ Juan J. และ Nan Chen อย่างชัดเจน ค่าพื้นที่ช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้า (Lennard Jones) ของโครงสร้างโมเลกุลควอตซ์มีขนาดเล็กที่สุดอยู่ที่ 8.433×10^{-11} ตารางมิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นของโครงสร้างสูงกว่า กล่าวคือโมเดลสามารถลดบริเวณที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าในขณะที่แบบจำลองของ Juan J. และแบบจำลองของ Nan Chen มีค่าของ Lennard Jones Potential 0.6×10^{-3} , 0.106×10^{-4} ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ให้ค่ามากกว่า ซึ่งหมายความว่าช่องว่างหรือบริเวณที่การกระทำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นได้ไม่ดีเท่าโครงสร้างโมเลกุลควอตซ์ เมื่อพิจารณาความต่างศักย์พบว่า โครงสร้างโมเลกุลควอตซ์ให้ ค่าความต่างศักย์สูงถึง 0.1291 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าของ Juan J. และ Nan Chen ที่มีค่าความต่างศักย์ 0.03841, 0.0502 โวลต์ ตามลำดับ อย่างมาก คำนี้นสะท้อนว่าโครงสร้างโมเลกุลควอตซ์สามารถสร้างความต่างศักย์ได้มีประสิทธิภาพกว่า

และมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้เป็นต้นแบบของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกหรืออุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าจากแรงกด โครงสร้างโมเลกุลควอตซ์มีความเหมาะสมที่สุด ให้ทั้งช่องว่างที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดและค่าความต่างศักย์สูงที่สุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Juan J. และแบบจำลองโมเดลของ Nan Chen แสดงถึงประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างและสมบัติไฟฟ้าที่มากกว่า



ภาพ 4.1 รูปแบบโมเดลในการนำไปพัฒนาต่อ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องนี้ประกอบด้วยการทำงานหลายขั้นตอน นับตั้งแต่ศึกษาค้นคว้าในการทำงาน การแก้ปัญหา จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากคำปรึกษาและชี้แนะ ตลอดจนได้รับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ในการใช้ดำเนินงานได้สะดวกมากขึ้น จาก โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย เพชรบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali, A., Iqbal, S., & Chen, X. (2024). Recent advances in piezoelectric wearable energy harvesting based on human motion: Materials, design, and applications. *Energy Strategy Reviews*, 53, 101422. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101422>
- [2] Bormashenko, E., Legchenkova, I., & Frenkel, M. (2019). Symmetry and Shannon measure of

ordering: Paradoxes of Voronoi tessellation. *Entropy*, 21(5), 452. <https://doi.org/10.3390/e21050452>

[3] Rojas, J. J., & Morales, J. E. (2015). Design and simulation of a piezoelectric actuated valveless micropump. *Proceedings of the COMSOL Conference 2015, Boston*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3184.9688>

[4] Chen, N., & Bedekar, V. (2017). Modeling, simulation and optimization of piezoelectric bimorph transducer for broadband vibration energy harvesting. *Journal of Materials Science Research*, 6(4), 5–18. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v6n4p5>