

# การพัฒนาระบบการวัดแบบเรียลไทม์สำหรับการส่งผ่านพลังงานไร้สายแบบเคลื่อนที่

## Development of Real-Time Measurement System for Dynamic Wireless Power Transfer

พัฒนา อินทนิ และ จันทร อัญญะโพธิ์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน  
เลขที่ 833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทรศัพท์ 084-4592155

E-mail: chan@pit.ac.th

Pattana Intani and Chan Anyapo\*

Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,

Pathumwan Institute of Technology

833 Rama 1 Road Wangmai Pathumwan Bangkok 10330, Thailand.

E-mail: chan@pit.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดแบบเรียลไทม์สำหรับการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายเคลื่อนที่ ระบบนี้ใช้สำหรับการวัดซึ่งคล้ายกับการใช้เครื่องมือวัดเสมือนจริงเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าโดยค่าเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลให้กับผู้ใช้งานและสำหรับการวิเคราะห์ในอนาคต ระบบหลักประกอบด้วยฮาร์ดแวร์สำหรับรับข้อมูลและซอฟต์แวร์วัดเสมือนจริง สำหรับซอฟต์แวร์นั้นจะใช้โปรแกรม LabVIEW® ในการพัฒนาระบบการวัดแบบเรียลไทม์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบจึงมีการทดสอบหลายอย่าง จากการศึกษาเปรียบเทียบค่า R-Squared ระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นมากับการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.8595 และระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นมากับเครื่องมือวัดมาตรฐานเท่ากับ 0.9354 ดังนั้นระบบที่พัฒนามีความถูกต้องน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดมาตรฐานทั่วไปได้

**คำสำคัญ:** ระบบการวัดแบบเรียลไทม์ การส่งผ่านพลังงานไร้สายแบบเคลื่อนที่ ซอฟต์แวร์วัดเสมือนจริง

### Abstract

This paper presents a development of real-time measurement system for a dynamic wireless power transfer. This system is utilized as a virtual-measurement to monitor various electrical parameters, which can be applied these values for the user's information and the future analysis. The main system consists of a data

acquisition hardware and a virtual-measurement software. For the software, the LabVIEW<sup>®</sup> program was used to develop the real-time measurement system. The electrical parameter values such as the output power, voltage and current can be measured. To confirm the accuracy of the system, several experimental tests have been done by a laboratory scaled-down prototype. From comparative study, the R-squared value of scatter plot between the real-time monitoring system versus calculation and real-time monitoring system versus standard measurement were 0.8595 and 0.9354, respectively. Then, the developed real-time monitoring system is accurate and can be used in conjunction with standard measuring instruments.

**Keywords:** real-time measurement system, dynamic wireless power transfer, virtual-measurement software

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานสะอาดเริ่มมีมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเราจะพบว่าในเมืองใหญ่ๆ เช่น กรุงเทพมหานครเริ่มประสบปัญหาหมอกพิษในอากาศ การเกิดหมอกควันปกคลุม ซึ่งมีสาเหตุที่เกี่ยวข้องหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ไอเสียที่ถูกปลดปล่อยจากรถยนต์ที่มีการใช้เครื่องยนต์แบบสันดาปตัวเอง เนื่องจากปริมาณรถยนต์จำนวนมากในเมืองใหญ่ ดังนั้นรถยนต์ไฟฟ้าจึงถูกกล่าวถึงและได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากพาหนะเหล่านี้ไม่มีการปล่อยมลพิษ แต่อย่างไรก็ดีรถยนต์ไฟฟ้าก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง ประการหลักๆ ก็คือ แบตเตอรี่ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักนั่นเอง ราคาแบตเตอรี่ ระยะเวลาในการประจุ และระยะทางที่เดินทางไปได้ต่อการประจุหนึ่งครั้ง เป็นสาเหตุที่ทำให้รถไฟฟ้ายังไม่สามารถเข้ามาแทนที่รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปทั่วไปได้ เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นระบบประจุไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีของการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น [1]-[3] แต่การที่จะตรวจสอบและวัดค่าต่างๆ ทางฝั่งตัวรับค่อนข้างทำได้ลำบากเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนที่และจำเป็นที่จะต้องใช้การเชื่อมต่อเพื่อส่งสัญญาณแบบไร้สายมายังระบบมอนิเตอร์ทางด้านฝั่งด้านส่ง

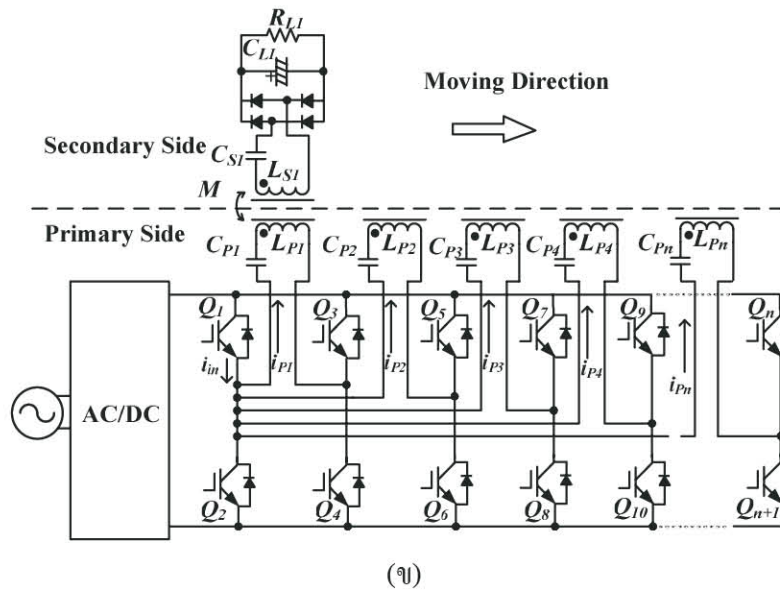
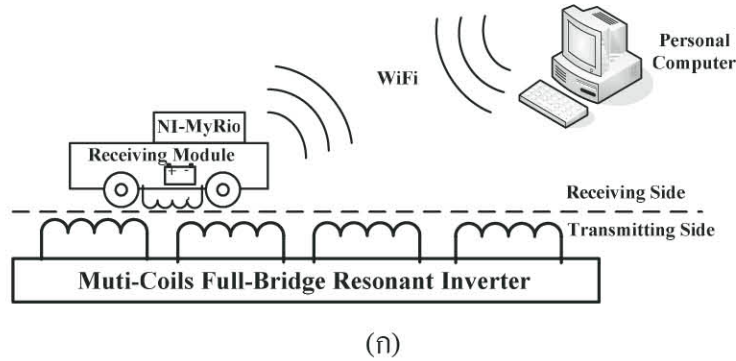
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบวัดแบบเรียลไทม์ขึ้นมาซึ่งมีแนวคิดตามรูปที่ 1 โดยพัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัยเดิมคือ การส่งพลังงานไร้สายแบบเคลื่อนที่ [4] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) โดยมีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ แบบเรียลไทม์ เช่น พลังงาน แรงดัน หรือ กระแสที่ฝั่งตัวรับ เป็นต้น

## 2. วิธีดำเนินการ

### 2.1 ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายเคลื่อนที่

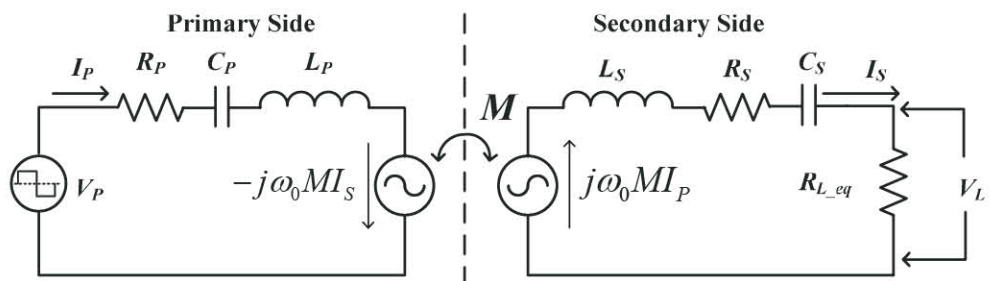
เพื่อความถูกต้องในการวัดค่าทางไฟฟ้าต่างๆ จึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณค่าของระบบส่งผ่านพลังงานไร้สายแบบเคลื่อนที่ โดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งได้จากวงจรในรูปที่ 1 (ข) โดยสมมติให้

คอยล์ตัวรับและคอยล์ตัวส่งทำงานที่ละคู่เท่านั้น และระบบจะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของการส่งพลังงานไร้สายแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Power Transfer) [2]



รูปที่ 1 (ก) แนวคิดของการวัดแบบเรียลไทม์ของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายเคลื่อนที่

(ข) ระบบส่งผ่านพลังงานไร้สายแบบหลายคอยล์ [4]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเคลื่อนที่

โดยสมมุติให้คอยล์ทำงานได้ทีละคู่เท่านั้นแรงดันฝั่งทางด้านขาเข้าสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (1) โดย  $V_{DC}$  คือค่าแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวรีโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ (Resonant Inverter)  $\alpha$  คือค่าความกว้างพัลส์ ของสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับวงจรขดลวดรีโซแนนซ์ โดยปกติของรีโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น(Full-Bridge Resonant Inverter) จะมีค่า  $\alpha$  เท่ากับ 180

$$V_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{DC} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1)$$

ความถี่รีโซแนนซ์  $f_0$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ  $\omega_0$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (2)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (3)$$

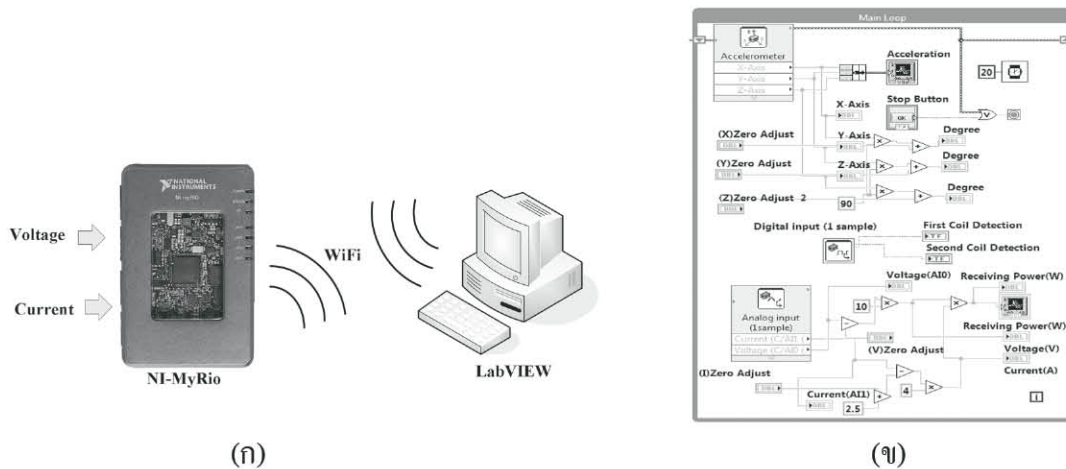
พลังงานที่โหลด  $P_L$  สามารถหาได้จากสมการที่ (4) [5]  $V_p$  หาได้จากสมการที่ 1  $M$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม  $R_{L\_eq}$  คือค่าตัวต้านทานสมมูลที่โหลดกรณีที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์(Bridge Rectifier) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (5)  $R_p$  คือค่าความต้านทานที่ขดลวดฝั่งตัวส่ง  $R_s$  คือค่าความต้านทานที่ขดลวดฝั่งตัวรับ

$$P_L = \frac{\omega_0^2 M^2 R_{L\_eq} V_p^2}{\left[ \left( R_p (R_{L\_eq} + R_s) + \omega_0^2 M^2 \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$R_{L\_eq} = \frac{8R_L}{\pi^2} \quad (5)$$

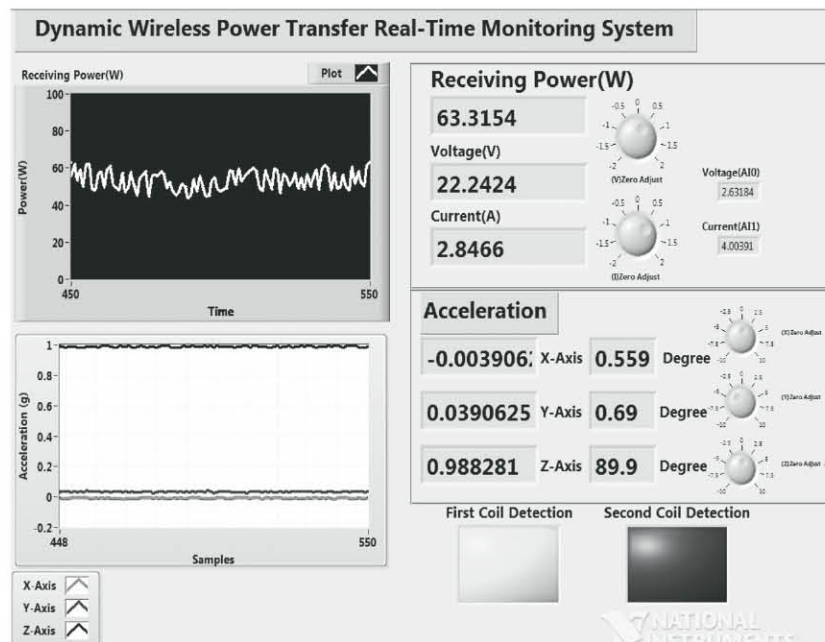
## 2.2 การพัฒนาระบบการวัดแบบเรียลไทม์

ในการพัฒนาระบบการวัดแบบเรียลไทม์นั้นระบบจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ ฮาร์ดแวร์สำหรับรับข้อมูลเพื่อนำเข้ามาประมวลผลดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) โดยจะรับข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากฝั่งตัวรับ และโมดูลสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่าน WiFi โดยเลือกใช้ฮาร์ดแวร์ของ NI LabVIEW® MyRio [6] ซึ่งมีทรัพยากรพื้นฐานตามความต้องการเบื้องต้นของระบบการวัดสัญญาณแบบเรียลไทม์ และ ส่วนของซอฟต์แวร์นั้นจะพัฒนาโดยใช้โปรแกรม LabVIEW® ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภท Graphic Based Programming ซึ่งง่ายต่อการพัฒนา โดยส่วนโปรแกรมภาคควบคุมแสดงในรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 3 (ก) ส่วนของฮาร์ดแวร์ (ข) ส่วนของโปรแกรมควบคุมซึ่งพัฒนาโดยใช้โปรแกรม LabVIEW®

ส่วนของการแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 4 ประกอบไปด้วยการแสดงผลพลังงานที่ถูกส่งไปยังฝั่งตัวรับ ซึ่งจะแสดงเป็นกราฟแบบเรียลไทม์ ส่วนค่าแรงดันและกระแสจะแสดงผลเป็นตัวเลขแบบเรียลไทม์เช่นเดียวกัน ค่าของมุมที่ตัวรับทำกับตัวส่งในขณะนั้นก็จะถูกนำมาแสดงผลแบบเรียลไทม์ เช่นกัน

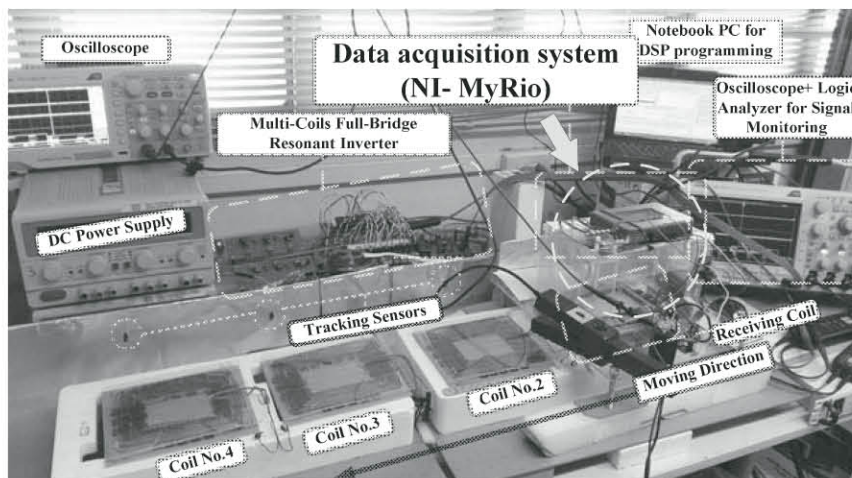


รูปที่ 4 ส่วนของการแสดงผล

### 3. การทดลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความสามารถในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบการวัดแบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นมา จึงได้มีการสร้างระบบจำลองการส่งพลังงานไร้สายแบบเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งใน

บทความนี้จะมุ่งเน้นเฉพาะระบบการวัดแบบเรียลไทม์เท่านั้น พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1



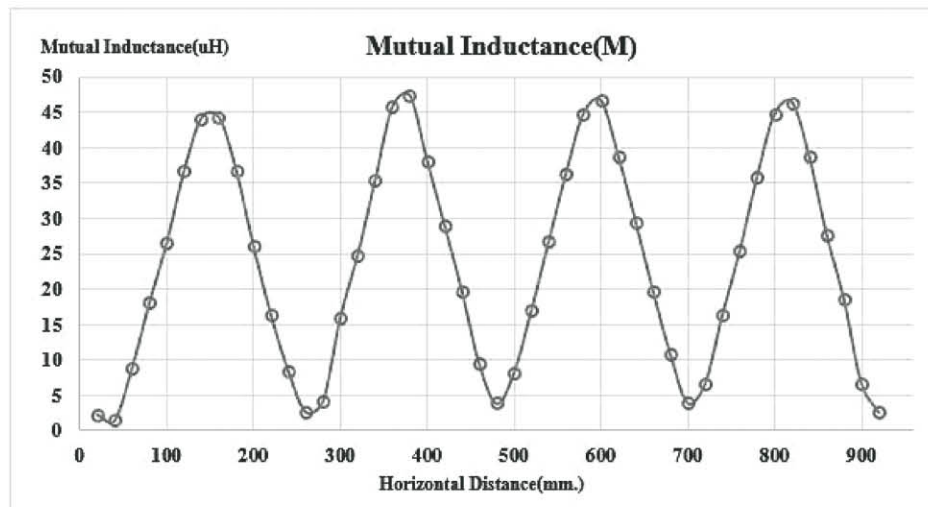
รูปที่ 5 ระบบจำลองการส่งพลังงานไร้สายแบบเคลื่อนที่

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

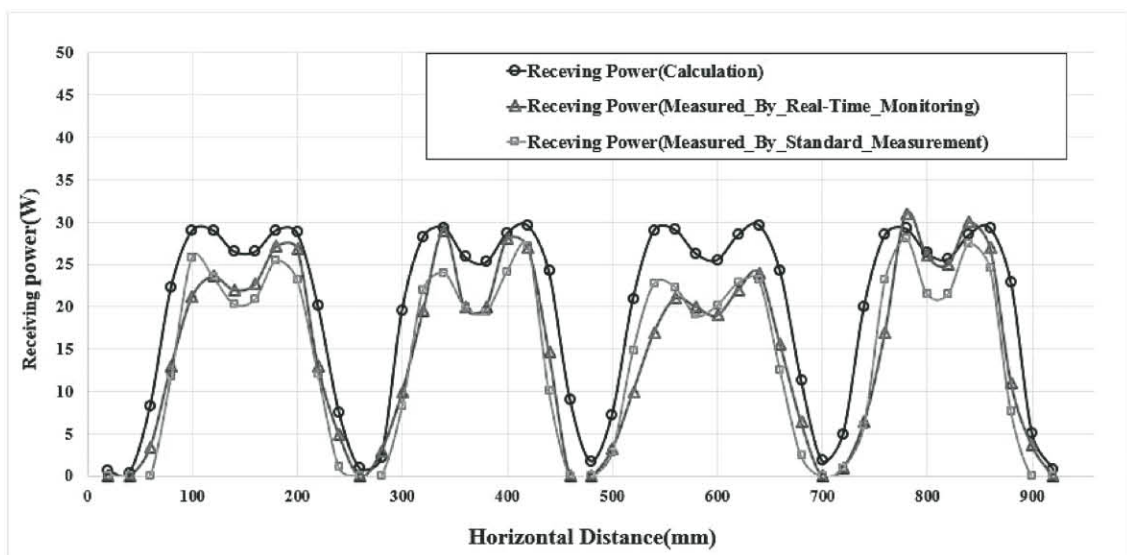
| พารามิเตอร์                              | สัญลักษณ์ | ค่า         |
|------------------------------------------|-----------|-------------|
| แรงดันอินพุต                             | $V_{DC}$  | 12 V        |
| ความถี่รีโซแนนซ์                         | $f_0$     | 15.9 kHz    |
| ขดลวดฝั่งตัวส่ง                          | $L_P$     | 100 $\mu H$ |
| ขดลวดฝั่งตัวรับ                          | $L_S$     | 100 $\mu H$ |
| ตัวเก็บประจุฝั่งตัวส่ง                   | $C_P$     | 1 $\mu F$   |
| ตัวเก็บประจุฝั่งตัวรับ                   | $C_S$     | 1 $\mu F$   |
| โหลดความต้านทาน                          | $R_L$     | 10 $\Omega$ |
| ระยะห่างระหว่างคอยล์ตัวส่งและคอยล์ตัวรับ | D         | 25 mm.      |

รูปที่ 6 (ก) แสดงข้อมูลข้อมูลค่าความเหนี่ยวนำรวม  $M$  ที่ได้จากการวัดและวิธีการคำนวณโดยใช้วิธีการตาม B. Hesterman [7] ได้ใช้สำหรับคำนวณค่าพลังงานที่ฝั่งตัวรับ การเปรียบเทียบผลของการวัดพลังงานทางด้านตัวรับ ได้ทดลองเปรียบเทียบการวัดค่าพลังงานที่ได้จากเครื่องมือวัดแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) คือ 1) ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5 (เส้นกราฟจุดวงกลม) 2) ค่าที่วัดได้โดยใช้เครื่องมือวัดมาตรฐาน (เส้นกราฟจุดสี่เหลี่ยม) และ 3) ค่าที่วัดได้โดยใช้ระบบการวัดแบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นมา (เส้นกราฟจุดสามเหลี่ยม) จากการ

ทดสอบพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดได้ใกล้เคียงกัน และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำได้ทำการพล็อตค่า R-Squared (โดยค่านี้จะมีค่าจาก 0-1) ทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จากการศึกษาเปรียบเทียบค่า R-squaredระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.8595 และระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือวัดมาตรฐานเท่ากับ 0.935 ดังนั้นระบบที่พัฒนามีความถูกต้องน่าเชื่อถือในระดับที่ยอมรับได้ (โดยทั่วไปในทางสถิติค่า R-Squared จะต้องมากกว่า 0.7 ถึงจะถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ [8])



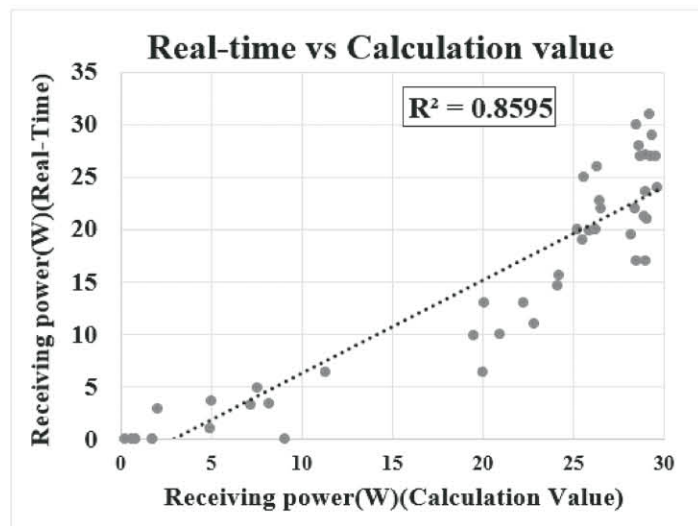
(ก)



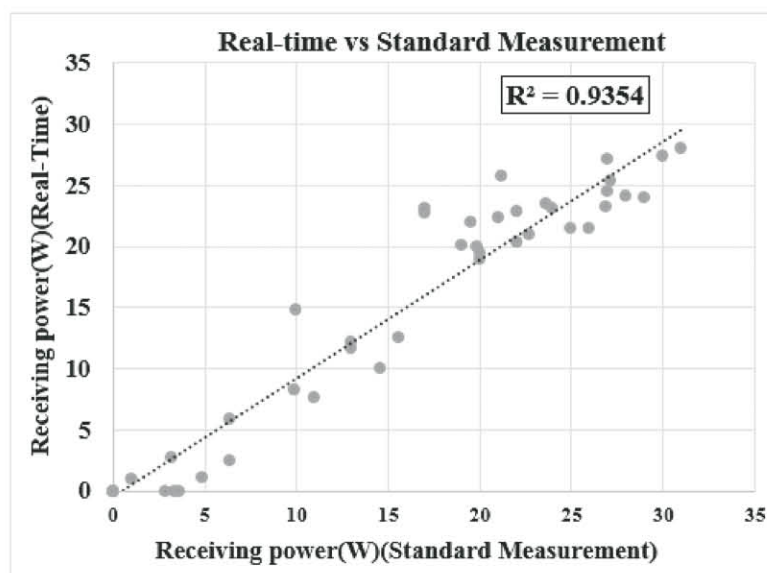
(ข)

รูปที่ 6 (ก) ข้อมูลค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) ได้ใช้สำหรับคำนวณค่า พลังงานที่ฝั่งตัวรับ

(ข) ค่าพลังงานทางฝั่งตัวรับ โดยใช้เครื่องมือวัดแบบต่างๆ



รูปที่ 7 ค่า R-Squared ระหว่างค่าของการวัดที่ได้จากระบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นมาเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 8 ค่า R-Squared ระหว่างค่าของการวัดที่ได้จากระบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นมาเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดแบบเรียลไทม์เพื่อใช้ในการตรวจสอบและแสดงผลของระบบส่งพลังงานแบบไร้สายเคลื่อนที่ เนื่องจากฝั่งตัวรับต้องมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นมาต้องมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลมาแสดงผลทางด้านตัวส่ง เพื่อให้ทราบสถานะรวมถึงแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่สำคัญต่างๆเช่น พลังงาน แรงดัน หรือ กระแสไฟฟ้า จากการทดสอบโดยการจำลองระบบส่งพลังงาน

แบบไร้สายเคลื่อนที่ พบว่าค่าพลังงานที่ได้จากการวัดโดยระบบที่พัฒนา มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณ และจากค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน ดังนั้น ระบบที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งพลังงานแบบไร้สายได้เป็นอย่างดี และในอนาคตอาจมีการพัฒนาต่อยอดเช่น เพิ่มฟังก์ชันในการตรวจสอบสถานะแบตเตอรี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนโดยใช้ฮาร์ดแวร์อื่นๆที่สามารถเชื่อมต่อกับ LabVIEW® ได้มีราคาถูกลงมา เช่น บอร์ด Arduino® เป็นต้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือสำหรับวัดและทดสอบในการทำวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] C.S. Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 5, 2005, pp. 1308-1314.
- [2] J. Huh, S.W. Lee, W.Y. Lee, G.H. Cho and C.T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for on-line electrical vehicles (OLEV)," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 26, No. 12, 2011, pp. 3666–3679.
- [3] Y. Guo, L. Wang, Q. Zhu, C. Liao and F. Li, "Switch-on modeling and analysis of dynamic wireless charging system used for electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 63, No. 10, 2016, pp. 6568–6579.
- [4] C. Anyapo, N. Teerakawanich and C. Mitsantisuk, "Development of multi-coils full-bridge resonant inverter for dynamic wireless power transfer," 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, 2017, pp. 588-591.
- [5] K. Aditya and S.S. Williamson, "A Review of Optimal Conditions for Achieving Maximum Power Output and Maximum Efficiency for a Series-Series Resonant Inductive Link," IEEE Trans. Transp. Electrification, Vol. 3, No. 2, 2017, pp. 303-311.
- [6] LabVIEW® [Online], Available: <http://www.ni.com> [January 15, 2018].
- [7] B. Hesterman, Analysis and modelling of magnetic coupling [Online], Available: [https://www.researchgate.net/publication/239591155\\_Analysis\\_and\\_Modeling\\_of\\_Magnetic\\_Coupling](https://www.researchgate.net/publication/239591155_Analysis_and_Modeling_of_Magnetic_Coupling) [January 15, 2018].

- [8] D.S. Moore, W.I. Notz and M.A. Flinger, The basic practice of statistics, 6th edition, W.H. Freeman and Company, New York, 2013, pp.138.