



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ผลกระทบของอุณหภูมิในน้ำยางที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด %DRC ด้วย SPR ที่ความถี่ 1, 1.5, 2.16 GHZ

The study of temperature effect on %DRC measurement accuracies using a Six-port
Reflectometer technique at frequencies 1,1.5 and 2.16 GHz

ศรัณย์ ดันติวิช ^{1)*} มิตรชัย จงเขียวชำนาญ ¹⁾ และ สหพงศ์ สมวงศ์ ²⁾

Saran Tantiwit ^{1)*} Mitchai Chongcheawchamnan ¹⁾ and Sahapong Somwong ²⁾

¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹⁾ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

²⁾ Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

Received: 16 February 2023

Revised: 23 May 2023

Accepted: 25 May 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิในน้ำยางที่ส่งผลต่อกำลังงานไฟฟ้าที่วัดได้ในการวัดปริมาณยางแห้งในน้ำยาง (%DRC) ด้วยอุปกรณ์รีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต (Six-Port Reflectometer ; SPR) ที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจางในช่วง 20-60 %DRC และมีอุณหภูมิในน้ำยางในช่วง 20-45 °C เพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางที่มีผลต่อค่ากำลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก SPR ซึ่งเทคนิคการวัดด้วย SPR ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟแบบกว้าง วงจรหกพอร์ต วงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ปรับค่าได้ และ ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิ งานวิจัยนี้ใช้ค่าความถี่ 3 ค่า คือ 1, 1.5 และ 2.16 GHz จำให้ SPR สำหรับวัดค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยาง เนื่องจากเป็นค่าความถี่ที่สามารถแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ได้ ผลการศึกษาสามารถสรุปค่าความเป็นเชิงเส้นระหว่างกำลังงานไฟฟ้าของ SPR กับค่า %DRC และ ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อค่ากำลังงานไฟฟ้าของ SPR ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การ

ตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (CV(%)) ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า ที่ความถี่ 1 GHz ค่ากำลังงานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC มากที่สุด จึงเหมาะสำหรับการวัดค่า %DRC ได้ใกล้เคียงกับค่า %DRC จริงของน้ำยางมากที่สุด ส่วนผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR พบว่าที่ความถี่ 2.16 GHz ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนของน้ำยางน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางต่ำสุด

คำสำคัญ: รีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต น้ำยางข้นเจือจาง เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง กำลังงานไฟฟ้า แหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟไวด์แบนด์

Abstract

This research presents the effect of temperature in rubber latex on the measured electrical power. While measuring the dry rubber content in the latex with Six-Port Reflectometer (SPR) at frequencies are 1, 1.5 and 2.16 GHz. This research prepares rubber latex samples from dilute concentrate rubber latexes in the range of 20-60 %DRC and in the temperature range of 20-45 °C. We aim to study the effect of rubber latex temperature cause to reflected power obtained from SPR. The measurement with the SPR technique uses a wide-band microwave oscillator, a six-port circuit, a tunable matching circuit, and a microcontroller for collecting latex temperature. This research uses 3 frequencies value consisting of 1, 1.5 and 2.16 GHz. Those frequencies are transmitted to SPR and measure the %DRC of samples. From the study, we found the linearity between the powers read from SPR and %DRC and the effect of rubber latex temperature on the power read from SPR. With a coefficient of determination (R^2) and coefficient of variation (CV(%)) respectively. From the test results, it was found that at a frequency of 1 GHz, the power value had the most linear relationship with the %DRC value, so it was suitable for measuring the %DRC value as close to the actual %DRC value of latex as possible. As for the effect of latex temperature on the power value read from SPR, it was found that at a frequency of 2.16 GHz, the coefficient of variability of latex was the least. This means it is affected by the lowest latex temperature.

Keywords: Six-port reflectometer (SPR): Dilute concentrate rubber latexes: Dry rubber latex: Electrical power: Wide-band microwave oscillator

1. บทนำ

ยางพาราเป็นสินค้าเกษตรสำคัญของประเทศไทยที่ได้จากการกรีดยางพารา และถูกใช้เป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรมด้วยการนำมาแปรรูปเป็นน้ำยางข้น ยางก้อน และยางแผ่น เป็นต้น โดยน้ำยางพาราธรรมชาติจะมีสีขาวเหมือนนํ้านม และประกอบด้วยส่วนที่เป็นยางแห้ง 25 ถึง 45 %DRC ส่วนที่เป็นโปรตีน 1.5% เรซิน 2% คาร์โบไฮเดรต 1% สารอินทรีย์ 0.5% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำ [1],[2]

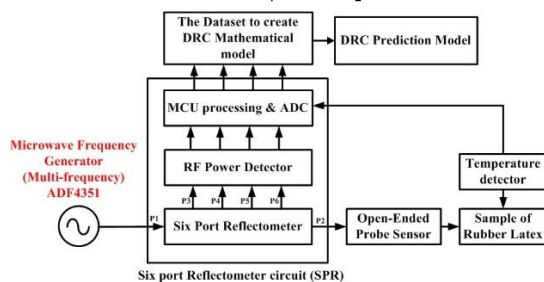
จากองค์ประกอบของน้ำยาง ส่วนที่เป็นตัวกำหนดราคาน้ำยางพารา คือ ปริมาณยางแห้งในน้ำยาง (%DRC) ซึ่งทั่วไปสามารถวัดได้ด้วย 2 วิธี คือ การวัดทางตรง และ การวัดทางอ้อม โดยทั้ง 2 วิธีการมีข้อแตกต่างกัน สำหรับวิธีการวัดทางตรง คือ การชั่งน้ำหนักส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำยางพารา ประกอบด้วย เนื้อยางแห้ง และ องค์ประกอบต่าง ๆ ตามองค์ประกอบ ปกติการวัดในเชิงพาณิชย์ จะประมาณน้ำหนักของแข็งในน้ำยางพาราทั้งหมด เป็น %DRC เพราะ องค์ประกอบต่าง ๆ หากนำมาพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ จะน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณ DRC ดังนั้นน้ำยางจึงถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน โดยประมาณ คือ น้ำ และ ปริมาณเนื้อยางแห้งสำหรับการวัดทางตรง นอกจากนี้วิธีการวัดตามมาตรฐาน BS ISO 1 2 6 : 2005 Natural rubber latex concentrate: Determination of dry rubber content. และการอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟจัดเป็นวิธีการวัดทางตรงด้วยเช่นกัน [3],[4]

ส่วนวิธีการวัดทางอ้อม คือ การหาปริมาณ DRC โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ DRC กับปริมาณฟลักซ์ของน้ำยางพารา เช่น ความ

ถ่วงจำเพาะ การหักเหแสง [5] คุณสมบัติทางไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [6] คุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [7] และอื่น ๆ ซึ่งวิธีการวัดโดยอ้อมนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ใช้พลังงานและเวลาในการวัดน้อยลง และ ขนาดกะทัดรัดพกพาได้สะดวก สำหรับงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการวัดทางอ้อม โดยอาศัยคุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของน้ำยางพารา ในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยอาศัยการวัดพลังงานคลื่นสะท้อนของน้ำยางข้นเจือจางด้วย SPR [8],[9] และ น้ำยางข้นเจือจางที่นำมาใช้ทดสอบจะผ่านการเจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้มีค่า DRC ที่หลากหลาย

จากการศึกษางานวิจัย เรื่องการหาปริมาณความชื้นในน้ำยาง หากบ่อนคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่ X (X-Band) พบว่าค่าความชื้นเป็นอิสระจากอุณหภูมิของน้ำยางพารา [10] และจากองค์ประกอบของน้ำยางพาราหากทราบความชื้น หรือปริมาณน้ำในน้ำยางพารา ก็จะสามารถหาส่วนที่เป็นของแข็ง หรือ DRC ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัด %DRC ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิของน้ำยาง อย่างไรก็ตามการสร้างเครื่องมือวัดในย่านความถี่ X นั้นมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน โดยใช้งานได้เฉพาะการสื่อสารทางการทหารและดาวเทียม ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้งานเนื่องจากราคาแพงและยากที่จะผลิต เมื่อเทียบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมทำให้ทราบว่า หากจ่ายคลื่นไมโครเวฟความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ไปตกกระทบน้ำยางพารา พลังงานคลื่นส่วนมากไปหมุนโมเลกุลของน้ำ หากต่ำกว่า 2 GHz พลังงานคลื่นจะถูกแบ่งออก ส่วนหนึ่งไปหมุนโมเลกุลของน้ำ

และอีกส่วนถูกลดทอนโดยการเหนี่ยวนำของเซิร์ม
น้ำยาง ดังนั้น พฤติกรรมที่แตกต่างกันของการใช้
พลังงานคลื่นไมโครเวฟ จะต่างกันตามความถี่ที่จ่าย
คลื่นไมโครเวฟสู่ตัวอย่างน้ำยาง [11] จากผลงานวิจัย
ที่ได้ศึกษาทำให้ผู้วิจัยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบ
จากอุณหภูมิที่มีผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก
เทคนิคการวัด %DRC ด้วย SPR ตามแผนผังระเบียบ
วิธีวิจัยได้แสดงประเด็นที่มุ่งเน้นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

จากรูปที่ 1 ผู้วิจัยอาศัยแหล่งจ่ายสัญญาณคลื่น
ไมโครเวฟแบบหลายความถี่ (Microwave Frequency
Generator) เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณความถี่ให้วงจร
หกพอร์ต เมื่อจ่ายสัญญาณคลื่นความถี่ให้วงจร
หกพอร์ต แล้วคลื่นดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังโพรบ
ปลายเปิด เพื่อตกกระทบกับตัวอย่างน้ำยาง หลังจาก
ที่คลื่นตกกระทบกับตัวอย่างน้ำยาง จะทำให้โมเลกุล
ของน้ำเกิดการหมุนและสะท้อนค่าพลังงานที่ได้จาก
การหมุนของโมเลกุลน้ำกลับมายังโพรบปลายเปิดอีก
ครั้ง โดยคลื่นสะท้อนนี้จะถูกส่งผ่านไปยังพอร์ต
ตรวจวัดกำลังงานทั้ง 4 ในวงจรหกพอร์ต จากนั้น
พอร์ตตรวจวัดกำลังงานทั้ง 4 จะแปลงสัญญาณคลื่น
สะท้อนเป็นกำลังงานไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยัง
ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ค่า
%DRC ในน้ำยางตัวอย่าง และจากการศึกษางานวิจัย
ที่ผ่านมา ชี้ให้เห็นถึงอุณหภูมิมีผลต่อการหมุนของ

โมเลกุลน้ำต่างกันตามความถี่ของสัญญาณคลื่นที่ไป
ตกกระทบกับน้ำยาง

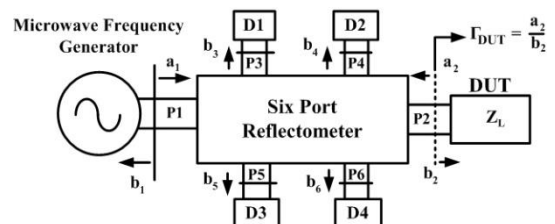
ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้มีการกำหนดช่วง
ความถี่ที่จะใช้ทดสอบขณะวัด %DRC ในช่วง 1-3
GHz จากนั้นนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์เพื่อศึกษา
ความเป็นเชิงเส้นระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก
SPR กับค่า %DRC และผลกระทบจากอุณหภูมิของ
น้ำยางต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR โดยมี
วัตถุประสงค์ในการนำไปพัฒนาแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์สำหรับหาค่า %DRC ที่มีประสิทธิภาพสูง
บนเทคนิคการวัดด้วย SPR ในอนาคต

2.วิธีการวิจัย

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง หลักการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต
การประยุกต์ใช้วงจรหกพอร์ตในการวัดตัวอย่างน้ำ
ยาง และการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 หลักการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต

ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรหกพอร์ตแบบรีเฟลกโตมิเตอร์
[12] โดยองค์ประกอบและหลักการทำงานของวงจร
หกพอร์ตแสดงดังรูปที่ 2



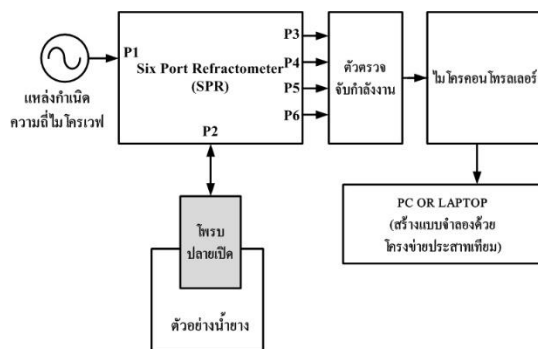
รูปที่ 2 วงจรหกพอร์ต

จากรูปที่ 2 วงจรหกพอร์ตประกอบด้วย
พอร์ตเชื่อมต่อทั้งหมด 6 พอร์ต โดยพอร์ต P1 ของ
วงจรหกพอร์ต จะต่อแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ
P1 (GEN) จะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

ให้วงจรถนุพอร์ท เพื่อส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟไปวงจรถนุพอร์ท และ จากวงจรถนุพอร์ทไปยังพอร์ทอุปกรณ์ทดสอบ P2 (DUT) ซึ่งคลื่นส่งผ่านถูกแทนด้วยอักษร a จากนั้นพอร์ท P2 จะให้ค่ากำลังงานคลื่นสะท้อนกลับมายังวงจรถนุพอร์ท ซึ่งกำลังงานคลื่นสะท้อนกลับถูกแทนด้วยอักษร b โดยพอร์ท P2 ให้ค่ากำลังงานคลื่นสะท้อนกลับตามค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ของอุปกรณ์ทดสอบ หรือ DUT จากวงจรถนุพอร์ท เมื่อได้รับกำลังงานคลื่นสะท้อนแล้วจะส่งผ่านกำลังงานไปสู่พอร์ท P3-P6 โดยทั้ง 4 พอร์ททำหน้าที่เป็นเอาต์พุตของวงจรถนุพอร์ทที่ให้ค่ากำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ทต่างกัน ตามค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากอุปกรณ์ทดสอบที่ต่ออยู่กับพอร์ท P2 โดยทั้ง 4 พอร์ทนี้จะต่อไปยังตัวตรวจจำลังงาน เพื่อนำไปแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้งานสร้างแบบจำลองต่อไป

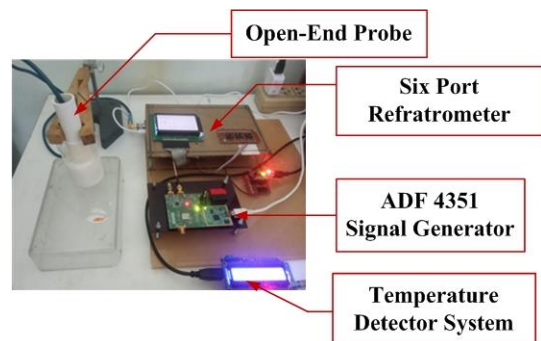
2.2 การประยุกต์ใช้วงจรถนุพอร์ทในการวัดตัวอย่างน้ำยาง

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วงจรถนุพอร์ท ในการวัดตัวอย่างน้ำยาง ดังนั้นแผนผังระบบการวัดด้วยวงจรถนุพอร์ทแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบการวัดน้ำยางด้วยวงจรถนุพอร์ท

จากรูปที่ 3 สำหรับงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วงจรถนุพอร์ทสำหรับการวัดกำลังงานสะท้อนในน้ำยาง โดยมีการเชื่อมต่อโพรบปลายเปิดที่พอร์ท 2 (P2) สำหรับจุ่มในน้ำยาง โดยแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟจะปล่อยสัญญาณคลื่นมายังพอร์ทที่ 1 (P1) จากนั้นสัญญาณจะเคลื่อนไปพอร์ทที่ 2 (P2) โดยมีโพรบปลายเปิดจุ่มในน้ำยาง จากนั้นเมื่อสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านโพรบปลายเปิดไปตกกระทบกับโมเลกุลน้ำยาง จะทำให้เกิดสัญญาณเกิดการสะท้อนกลับเข้ามายังพอร์ทที่ 2 และส่งผ่านไปยังพอร์ท 3 4 5 6 ทั้ง 4 พอร์ท ซึ่งเป็นค่ากำลังงานคลื่นสะท้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลแข็งหรือน้ำยางสด และจะถูกนำมาแปลงด้วยโดยวงจรรวม ADL5505 เพื่อแปลงกำลังงานคลื่นสะท้อนเป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งการทดสอบการวัดตัวอย่างน้ำยางด้วยวงจรถนุพอร์ทในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรถนุพอร์ทที่ใช้ในงานวิจัย

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

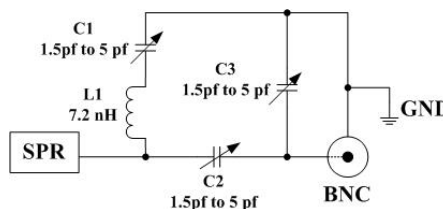
สำหรับตัวอย่างทดสอบที่เป็นน้ำยางข้นที่มีค่า %DRC 20,25,30,35,40,45,50,55 และ 60 จำนวน 9 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างเหล่านี้ได้จากการนำน้ำยางข้นค่า 60 %DRC มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นด้วยสูตรร้อยละ โดยปริมาตร (%V/V: Volume Percent) [13] ในกระบวนการทดสอบ ผู้วิจัยได้มีการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางให้อยู่ในช่วง 20-45 °C และวัดซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้งทีละค่าอุณหภูมิ และ ค่า %DRC หนึ่ง ๆ จากนั้นนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ผล โดยน้ำยางข้นเจือจางที่ใช้เป็นของเหลวที่นำมาบรรจุลงในบีกเกอร์แก้วขนาด 100 ml โดยบรรจุน้ำยางปริมาตร 70 ml เพราะ หากบรรจุมากกว่านี้บีกเกอร์จะเต็มและล้นออกภายนอกภาชนะ ซึ่งมีผลทำให้การทดสอบครั้งต่อไปที่ค่าอุณหภูมิ น้ำยางอื่นมีปริมาตรไม่เท่าเดิม เนื่องจากสูญเสียจากการล้นออกจากแก้ว และสาเหตุที่เลือกใช้บีกเกอร์แก้วเพราะสะดวกในการตวง และไม่สะท้อนคลื่นไมโครเวฟเหมือนบีกเกอร์โลหะ

2.3.1 การเตรียมวงจรหกวอร์ตก่อนการวัด

การเตรียมวงจรหกวอร์ตก่อนการวัด เป็นการทำให้วงจรหกวอร์ตพร้อมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้วัดตัวอย่างน้ำยาง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ แมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกวอร์ต และการทดสอบกำเนิดค่าความถี่

ในส่วนของการแมทซ์อิมพีแดนซ์เป็นขั้นตอนที่ต้องดำเนินการทุกครั้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้จ่ายให้วงจรหกวอร์ตเนื่องจากวงจรหกวอร์ตเดิมถูกออกแบบให้ทำงานที่ 1 GHz [8],[9] และ เพื่อให้สามารถทดสอบได้ในช่วง 1-3 GHz จึงต้องเพิ่มวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างพอร์ต P2 ของวงจรหกวอร์ตกับหัวต่อ BNC ที่ต่อกับ

โพรบปลายเปิด วงจรที่ผู้วิจัยใช้ คือ วงจรแมทซ์โครงข่ายแบบพาดรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์แบบพาด

จากรูปที่ 5 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าปรับค่าได้ 3 ตัว และตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว โดยตัวเก็บประจุไฟฟ้า C3 ต่อแบบขนาน ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C2 ต่อแบบอนุกรมและตัวเก็บประจุไฟฟ้า C1 ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและขนานกับหัวต่อ BNC

โดยผลการทดสอบที่ได้จากการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกวอร์ต คือ การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ระหว่างวงจรหกวอร์ตกับโพรบปลายเปิดขณะป้อนคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ต่าง ๆ ตกกระทบบตัวอย่างน้ำยางข้นเจือจาง ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับ มีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกความถี่ไมโครเวฟสำหรับนำมาเป็นแหล่งกำเนิดให้วงจรหกวอร์ตเพื่อวัดและทดสอบน้ำยางข้นเจือจาง การทดสอบแมทซ์อิมพีแดนซ์ ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการส่งความถี่ไมโครเวฟที่ค่าความถี่ใด ๆ จากแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟผ่านไปยังวงจรหกวอร์ต โดยมักจะพิจารณาจากค่า VSWR โดยในงานวิจัยมักกำหนดให้ค่า $VSWR < 2$ ถึงจะยอมรับได้ว่ามีการเชื่อมต่อมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานงานวิจัย และเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบกับผลวัดของเครื่อง

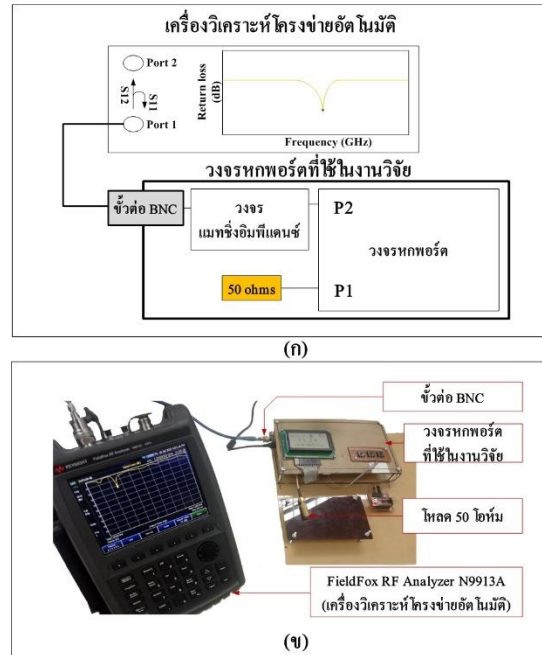
วิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ จึงต้องทำการแปลงจาก VSWR เป็น Return loss (R_L) ตามสมการ

$$R_L = -20 \log_{10} \left[\frac{VSWR-1}{VSWR+1} \right]$$

$$R_L = -20 \log_{10} \left[\frac{1}{3} \right] = 9.542 \text{ dB}$$

$$R_L \approx 10 \text{ dB}$$

จากสมการหากมีการปรับแมทซ์อิมพีแดนซ์แล้ว ณ ความถี่ไมโครเวฟที่สามารถให้ค่า R_L ที่ได้มากกว่า 10 dB จะถือว่าการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพระหว่างแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ ณ ค่าความถี่นั้นกับวงจรหกร์ เนื่องจากเป็นค่าสูญเสียการอธิบายว่ามีค่ามากกว่าอาจดูผิดปกติ ดังนั้นให้พิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของผลวัดค่าจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ โดยจะวัดค่าออกมาในรูปแบบ S_{11} โดย $R_L = -|S_{11}|$ ดังนั้นการสะท้อนกลับที่ยอมรับได้ควรมีค่า $S_{11} < -10 \text{ dB}$ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดมักแสดงผลด้วยค่า R_L จึงถือว่ามากกว่า 10 dB เป็นการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานงานวิจัย สังเกตเพิ่มเติมผลวัดค่า R_L จะมีลักษณะลดลงเมื่อมีการสูญเสียน้อย แต่แสดงผลวัดเป็นบวกดังผลวัดดังรูปที่ 7 สำหรับการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกร์ทำได้โดยอาศัยโหลด 50 โอห์ม ต่อเข้ากับขั้ว P1 ของวงจรหกร์ เพื่อแทนค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ และต่อเครื่องวัดสเปกตรัมอนาไลเซอร์เข้ากับขั้ว P2 โดยมีผังการต่อแสดงดังรูปที่ 6

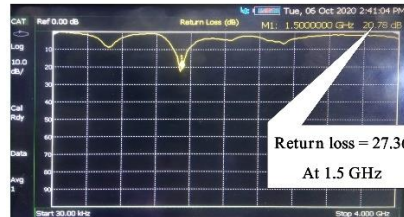


รูปที่ 6 การวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรหกร์
(ก) ผังการต่อเพื่อวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์
(ข) การต่อเพื่อทดสอบจริง

จากรูปที่ 6 ผลการวัดค่าการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกร์แสดงผลเป็นค่า Return loss (RL) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ใช้ FieldFox RF Analyzer N9913A ในโหมด CAT (CAT/vector network analysis) โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1 และ รูปที่ 7 สำหรับการทดสอบผู้วิจัยออกแบบให้ใช้ค่าความถี่เริ่มต้นที่ 1 GHz



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7 ผลการวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรพอร์ต ณ ความถี่ต่าง ๆ (ก) 1 GHz (ข) 1.5 GHz (ค) 2 GHz และ (ง) 2.16 GHz

ตารางที่ 1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ หลังการแมทซ์อิมพีแดนซ์

ความถี่ (GHz)	Return loss
1	27.36
1.5	20.78
2	9.24
2.16	31.63

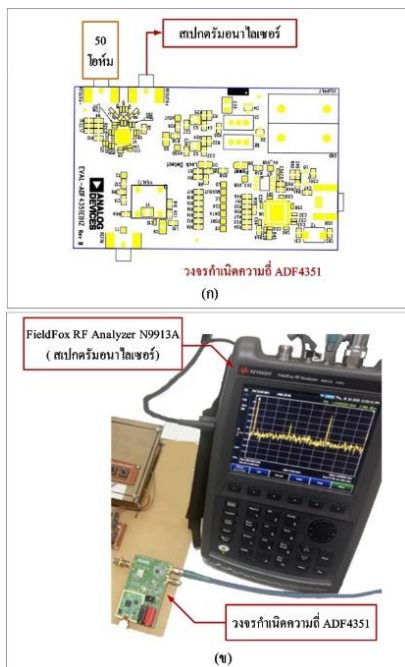
จากตารางที่ 1 และ รูปที่ 7 (ก)-(ง) แสดงผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรพอร์ตกับแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ต่าง ๆ โดยประกอบด้วยผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของวงจรพอร์ตเมื่อทำการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 1, 1.5, 2 และ 2.16 GHz และจากรูปที่ 7 และตารางที่ 1 ค่า Return loss ที่อ่านได้ คือ ค่า S11 จาก Network analyzer มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ซึ่งการทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz โดยต้องการให้กำลังงานคลื่นส่วนใหญ่จากวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 ส่งผ่านไปยังวงจรพอร์ตได้มากที่สุด การกำหนดให้ Return loss ที่ยอมรับได้ต้องไม่ต่ำกว่า 10 dB ที่ความถี่ที่ต้องการทดสอบ หมายถึงการรับประกันว่ากำลังสะท้อนกลับจะมีไม่เกิน 10% ของกำลังงานสูงสุดที่วงจรกำเนิดความถี่นี้สามารถจ่ายให้กับโหลด 50 โอห์ม

จากการแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรพอร์ตพบว่าความถี่ไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้วงจรพอร์ต ประกอบด้วยค่าความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่วงจรพอร์ตสามารถแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรพอร์ตกับแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟได้มากกว่า 20dB ซึ่งแสดงว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถเดินทางจากแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟผ่านวงจรพอร์ตและวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยมีกำลังงานสะท้อนกลับสู่แหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟที่ต่ำหรือเท่ากับร้อยละ 1 และเป็น การส่งผ่านกำลังงานได้มากถึงร้อยละ 99 ณ ความถี่นั้น

เมื่อปรับแมทซ์อิมพีแดนซ์แล้ว กระบวนการถัดไปทำการปรับความถี่ของโมดูลกำเนิดความถี่แบบหลาย

ความถี่ ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยใช้โมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 โดยกำหนดให้ค่ากำลังงานของแต่ละความถี่มีค่าเท่ากับ +5 dBm โดยจะดำเนินการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าความถี่เท่านั้น ซึ่งทำการปรับได้ โดยอาศัยโปรแกรม ADF435x

สำหรับผลการทดสอบในขั้นตอนนี้ คือ การวัดค่ากำลังงานของความถี่ที่ถูกกำเนิดด้วยเครื่องสเปกตรัมอานาไลเซอร์ โดยติดตามผังการทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟและการต่อทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ
(ก) ผังการต่อทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ
(ข) การต่อทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟจริง

จากรูปที่ 8 เมื่อมีการต่อตามผังการต่อและดำเนินการวัดกำลังงานด้วยสเปกตรัมอานาไลเซอร์ ผลการวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 9



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9 กำลังงานของความถี่ (ก) 1 GHz , (ข) 1.5 GHz และ (ค) 2.16 GHz

จากรูปที่ 9 แสดงผลการกำเนิดความถี่ของโมดูล ADF4351 ด้วยการแสดงค่ากำลังงาน ณ ความถี่ที่ต้องการกำเนิด สำหรับผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังงานของแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz

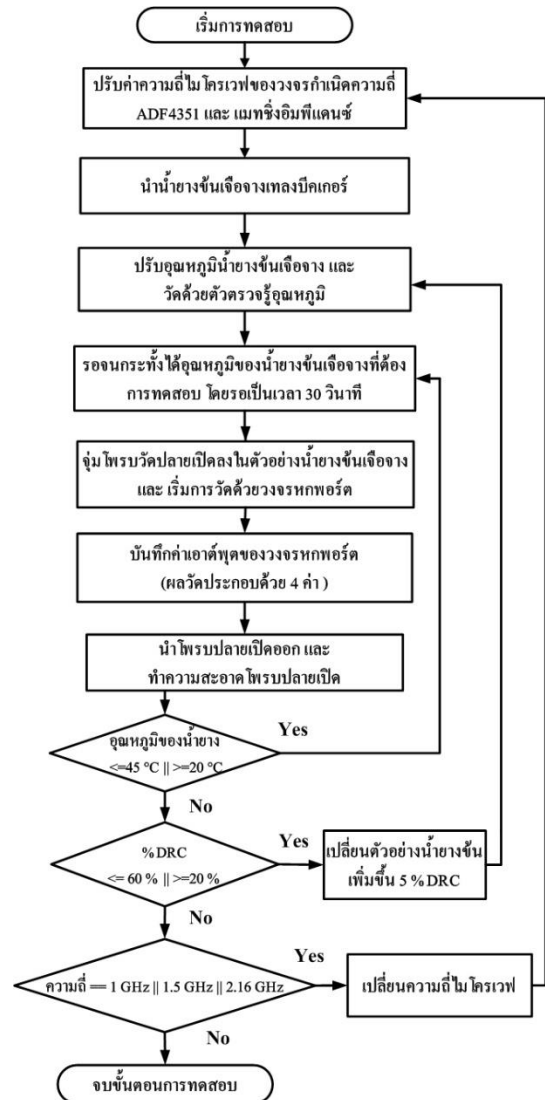
ความถี่ (GHz)	กำลังงาน (dBm)
1	3.344
1.5	4.645
2.16	3.550

จากตารางที่ 2 พบว่าโมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 สามารถกำเนิดความถี่ 1 GHz, 1.5 GHz และ 2.16 GHz ได้ค่าความถี่ตรงตามต้องการ โดยมีการสูญเสียกำลังงานเล็กน้อยจากที่โปรแกรมไว้ +5 dBm นอกจากนี้หากใช้โมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 กำเนิดความถี่ต่ำกว่า 2.2 GHz จะมีความถี่ฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 (กรณีค่าความถี่ 3 เท่าของความถี่ที่ต้องการไม่เกิน 4.4 GHz) จะเกิดขึ้นมาพร้อมกับความถี่ที่ต้องการ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของโมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 ที่ระบุมาจากทางบริษัท Analog devices

2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างน้ำยางด้วย วงจรหกพอร์ต

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการวัดและทดสอบการวัดค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรหกพอร์ตในตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจากที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz ซึ่งกระบวนการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 ขั้นแรกของขั้นตอนการวัดและทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟของวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 โดยในการทดสอบนี้เริ่มจาก 1 GHz, 1.5 GHz และ 2.16 GHz ตามลำดับ



รูปที่ 10 แผนผังขั้นตอนการวัดและทดสอบ

ทุกครั้งที่เปลี่ยนความถี่ จะต้องปรับแมทซ์เพื่อให้เกิดการส่งผ่านกำลังงานจากแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ (วงจรกำเนิดความถี่ ADF4351) ไปสู่โพรบได้มากที่สุด สำหรับขั้นตอนการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจากที่นำมาใช้ในการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต โดยงานวิจัยนี้ทดสอบที่อุณหภูมิ 20 25 30 35 40 และ 45°C

ข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางข้นเจือจางในช่วงค่า 20-60 %DRC ที่แต่ละค่า %DRC จะถูกควบคุมอุณหภูมิของน้ำยางในช่วง 20-45 °C ผู้วิจัยจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และการวัด 1 ครั้งผู้วิจัยได้ชุดข้อมูลประกอบด้วยการวัดข้อมูล 4 รายการดังนี้

- 1) ค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 4 ค่า คือ P3-P6 โดยทั้ง 4 ค่าเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกอ่านด้วยตัวแปรอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 16 บิต ทำให้มีค่าอยู่ในช่วง 0-65535
- 2) ค่า %DRC ของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ
- 3) ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางข้นเจือจางที่ตรวจจับด้วยตัวตรวจรู้อุณหภูมิ (DS18B20)
- 4) ค่าความถี่ที่ใช้จ่ายให้วงจรพอร์ต

โดยรายการข้อมูลที่กำลังจะประกอบอยู่ในหนึ่งชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางข้นเจือจางด้วยวงจรพอร์ต

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

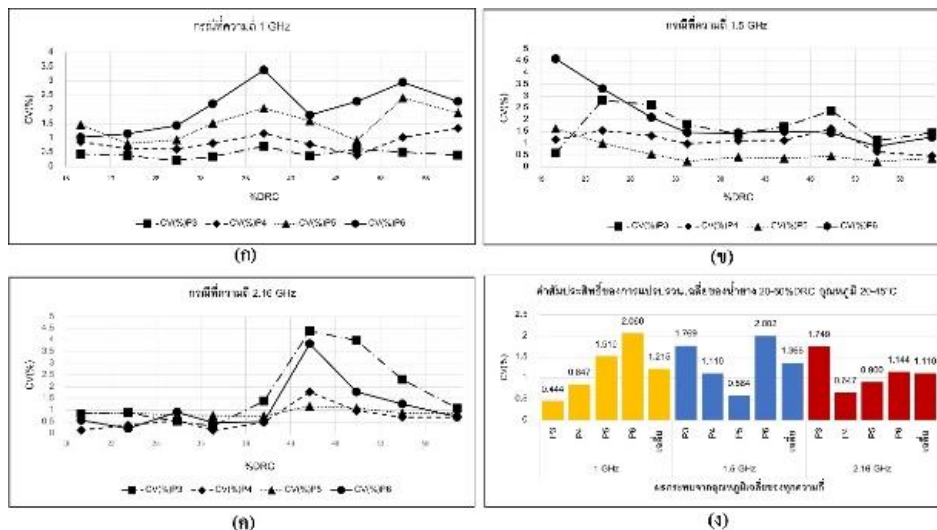
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ 2 ส่วนสำคัญ คือ ความเป็นเชิงเส้นระหว่าง %DRC กับค่ากำลังงานไฟฟ้าของ SPR และ ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR โดยสรุปได้ดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าที่ความถี่ 1 GHz ค่ากำลังงานที่อ่านได้จากพอร์ต P5 มีความเป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC มากที่สุด โดยมีค่า $R^2 = 0.928$ ซึ่งหมายความว่าที่ความถี่ 1 GHz ผลการวัดค่ากำลังงานของ SPR มีความเป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยางที่ใช้ในการทดสอบมากที่สุด

ตารางที่ 3 ความเป็นเชิงเส้นระหว่าง %DRC กับค่ากำลังงานไฟฟ้าของ SPR

ความถี่ (GHz)	พารามิเตอร์	ค่า R ²	ค่าผลต่างของเลขดิจิทัล
			16 บิตที่อ่านได้จากพอร์ต เมื่อทดสอบวัดน้ำยาง 20 % และ 60 % DRC
1.000	P3	0.723	686.000
	P4	0.000	1851.000
	P5	0.928	5685.000
	P6	0.901	5334.000
1.500	P3	0.300	1035.000
	P4	0.028	1351.000
	P5	0.134	1182.000
	P6	0.402	3154.000
2.160	P3	0.413	331.000
	P4	0.742	994.000
	P5	0.277	501.000
	P6	0.856	969.000

และจากตารางที่ 3 พบว่าทั้ง 3 ค่าความถี่สามารถหาความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า %DRC ที่นำมาทดสอบได้ 4 ความสัมพันธ์ต่อหนึ่งค่าความถี่ โดยแสดงความเป็นเชิงเส้นของค่ากำลังงานแต่ละพอร์ต กับ %DRC ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และผลการทดสอบพบว่าที่ความถี่ 1 GHz ค่า P5 ให้ค่า R^2 สูงสุด ส่วนความถี่ 1.5 GHz ค่า P6 ให้ค่า R^2 สูงสุด และที่ความถี่ 2.16 GHz ค่า P6 ให้ค่า R^2 สูงสุด และจากการทดสอบพบว่าพอร์ตที่ให้ค่าความเป็นเชิงเส้นสูงสุดเปลี่ยนไปเมื่อทดสอบที่ความถี่ 1.5 GHz ซึ่งเกิดจากวงจรดีเทคเตอร์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง สำหรับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR

จากรูปที่ 11 (ก) – 11 (ค) พบว่าที่ความถี่ 1 GHz อุณหภูมิของน้ำยางที่ค่า %DRC ต่าง ๆ เฉลี่ยทุกค่ามีผลกระทบต่อกำลังงานพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 คิดจากค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนของน้ำยางที่มีค่า %DRC เดียวกันขณะทำการวัดทดสอบที่อุณหภูมิต่างกันเป็น 0.444% , 0.847%, 1.510% และ 2.06 % ส่วนที่ความถี่ 1.5 GHz ผลกระทบต่อกำลังงานพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 คิดเป็น 1.769%, 1.110%, 0.584% และ 2.002% และที่ความถี่ 2.16 GHz ผลกระทบต่อกำลังงานพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 คิดเป็น 1.749%, 0.647%, 0.900% และ 1.144% เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบค่าผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยาง ผู้วิจัยจึงเฉลี่ยค่ากำลังงานทั้ง 4 พอร์ต ของกรณีความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz ให้ค่า CV(%) เป็น 2.06 % , 2.00 % และ 1.14 % ตามลำดับ ดังรูปที่ 11 (ง) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิส่งผลกระทบท่อการวัดที่ความถี่ 2.16 GHz น้อยที่สุด

4.สรุป

จากผลการวัดน้ำยางที่ค่า 20-60 %DRC ในช่วงอุณหภูมิ 20-45°C โดยใช้เทคนิคการวัดด้วย SPR พบว่าที่ความถี่ 1 GHz ค่ากำลังงานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC มากที่สุด หากใช้สมการเส้นตรงในการสร้างแบบจำลองวัด %DRC ที่ค่าความถี่ 1 GHz ให้ผลวัดค่า %DRC ได้ใกล้เคียงกับค่า %DRC จริงของน้ำยางมากที่สุด รองลงมาคือใช้ความถี่ 2.16 GHz และ 1.5 GHz ตามลำดับ ส่วนผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR พบว่าที่ความถี่ 2.16 GHz ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนของน้ำยางน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางต่ำสุด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยสามารถสรุปข้อได้เปรียบของความถี่ที่สูง และ ต่ำกว่า 2 GHz ของเทคนิคการวัดด้วย SPR ได้ว่าหากใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz จะให้ค่าความแม่นยำในการทำนายค่า

%DRC มากกว่าความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz นอกจากนี้ที่ความถี่สูงกว่า 2 GHz จะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำกว่า 2 GHz สำหรับหลักการเลือกความถี่ไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานผู้วิจัย พิจารณาเลือก 2 ค่าความถี่ คือ 1 GHz และ 2.16 GHz มาสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC เนื่องจากที่ความถี่ 1 GHz มีความเป็นเชิงเส้นกับ %DRC มากที่สุด และมีค่าพิสัยสูงสุด ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC ด้วยสมการเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งหมายถึงค่ากำลังงานที่วัดได้นั้นสามารถทำนายด้วยสมการเส้นตรงได้ใกล้เคียงกับค่า %DRC จริงที่นำมาทดสอบ ประกอบกับค่าพิสัยที่สูงเป็นผลให้สามารถวัดค่า %DRC ได้ละเอียดเมื่อเทียบกับค่าพิสัยที่ต่ำกว่า และที่ความถี่ 2.16 GHz แม้จะมีค่าความเป็นเชิงเส้นและพิสัยที่ต่ำกว่า แต่พบว่ามีความแปรปรวนจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้อยกว่าที่นำมาทดสอบต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้น้อยกว่า 1 GHz ผู้วิจัยอาศัยข้อดีของทั้ง 2 ความถี่นี้มาสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC ด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองด้วยแมชชีนเลิร์นนิง (Machine learning) ต่อไปในอนาคต

ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ดำเนินการทดสอบที่ 3 ค่าความถี่ที่ประกอบด้วย 1, 1.5 และ 2.16 GHz เท่านั้น ไม่รวมค่าความถี่อื่นๆ ที่อยู่ระหว่าง 1-2.16 GHz

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2564 และได้รับการสนับสนุนในส่วนของอาคารสถานที่ และอุปกรณ์ทำการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ นอกจากนี้ขอขอบคุณทุนบัณฑิตศึกษา วิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2562 ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยนี้

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Sunheem P. Development of Methodology and Instrument for Measuring Dry Rubber Content in Latex Using Microwave Techniques. [PhD in Physics]. Songkla: Prince of Songkla University; 2015.
- [2] Peter P W Weiss MSc, PhD, C Chem, FRSC. Natural Rubber Latex Protein Allergy [Internet]. International Children's Medical Research Society; 2010 [cited 2022 Jun 20]. Available from : https://www.mambaby.com/uploads/tx_ddownload/Latex_Report.pdf.

- [3] Tillekeratne LMK, Karunanayake L, Sarath Kumara PH and Weeraman S. A rapid and accurate method for determining the dry rubber content and total solid content of NR latex. *Polymer Testing*. 1988; 8(5): 353-8.
- [4] Hamza ZP, Dilfi KFA, Muralidharan MN and Kurian T. Microwave Oven for the Rapid Determination of Total Solids Content of Natural Rubber Latex. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 2018; 57(9): 918-23.
- [5] Zhao Z, Jin X, Zhang L and Yu X. A novel measurement system for dry rubber content in concentrated natural latex based on annular photoelectric sensor. *International Journal of Physical Sciences*. 2010; 5(3): 251-60.
- [6] Kumar RR, Hussain SN and Philip J. Measurement of Dry Rubber Content of Natural Rubber Latex with a Capacitive Transducer. *Journal of Rubber Research*. 2007; 10(1): 17-25.
- [7] Jayanthi T and Sankaranarayanan PE. Measurement of Dry Rubber Content in Latex Using Microwave Technique. *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW*. 2005; 5(3): 50-4.
- [8] Somwong S and Chongcheawchamnan M. A Portable System for Rapid Measurement of Dry Rubber Content With Contaminant Detection Feature. *IEEE SENSORS JOURNAL*. 2018; 18(20): 8329-37.
- [9] Julrat S, Chongcheawchamnan M, Khaorapapong T, Patarapiboolchai O, Kririksh M and Robertson ID. Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application. *IEEE SENSORS JOURNAL* 2012; 12(10): 3019-30.
- [10] Ghretli MM, Khalid K, Grozescu IV, Sahri Mohd H and Abbas Z. Dual-Frequency Microwave Moisture Sensor Based on Circular Microstrip Antenna. *IEEE SENSORS JOURNAL* 2007; 7(12): 1749–56.
- [11] Khalid K, Hassan J and Yusef WDW. Dielectric phenomena in hevea rubber latex and its applications. in *Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*; 1997 May 25-30; Seoul, South Korea; 1997.

- [12] Bilik V. SIX-PORT MEASUREMENT TECHNIQUE: PRINCIPLES, IMPACT, APPLICATIONS [Internet]. Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava: Slovakia; 2016 [cited 2022 Jun 20] . Available from: <https://s-team.sk/docs/SixPortTechnique.pdf>.
- [13] Scott Mackenzie D. Determining Concentration by Weight and by Volume - Application to Polymer Quenchants. Technical Report. Madison and Van Buren Aves. P. O. Box 930 Valley Forge: Houghton International Inc: United States of America; 2014.