



การวัดปริมาณยางแห้งด้วยวงจรหกพอร์ต
Dry Rubber Content Measurement Using A Six-Port Circuit

ศรัณย์ ตันติวิช์

Saran Tantiwit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การวัดปริมาณยางแห้งด้วยวงจรหกพอร์ต
Dry Rubber Content Measurement Using A Six-Port Circuit

ศรัณย์ ตันติวิช์
Saran Tantiwit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2565

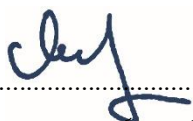
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวัดปริมาณยางแห้งด้วยวงจรถักพอร์ต

ผู้เขียน นาย ศรัณย์ ตันติวิชช์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

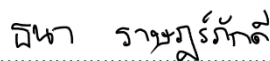


(รองศาสตราจารย์ ดร. มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)

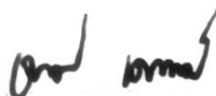
คณะกรรมการสอบ




.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. โกสินทร์ จำนงไทย)



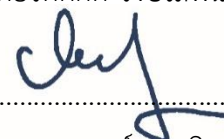
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนา ราชภูริภักดี)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ เคารพพวงศ์)



.....กรรมการ
(ดร. เกียรติศักดิ์ วงษ์โสภนากุล)



.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)

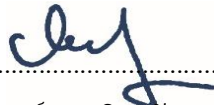
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

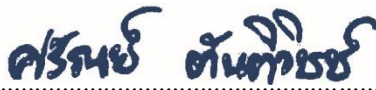
.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ 
(รองศาสตราจารย์ ดร. มิตรชัย จงเชี่ยวชาญานาญ)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ 
(นาย ศรัณย์ ตันตวิซซ์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ **ศรัณย์ ตันตวิรัช**

(นาย ศรัณย์ ตันตวิรัช)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวัดปริมาณยางแห้งด้วยวงจรถนุพอร์ต
ผู้เขียน นาย ศรัณย์ ตันติวิเศษ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง (%DRC) ของเทคนิคการวัดค่ากำลังงานสะท้อนของตัวอย่างน้ำยางด้วยวงจรถนุพอร์ต (SPR) จากเดิมที่ใช้ข้อมูลกำลังสะท้อนกลับความถี่ 1 GHz ความถี่เดียว วิทยานิพนธ์จะศึกษาการพัฒนาแบบจำลองจากชุดข้อมูลกำลังงานคลื่นสะท้อน 3 ความถี่ได้แก่ 1 GHz , 1.5 GHz และ 2.16 GHz ในการพัฒนาแบบจำลอง ผู้วิจัยจะทดลองกับน้ำยางชั้นเจือจางในช่วงค่า 20 – 60 %DRC และ ทุกค่า %DRC ที่นำมาทดสอบ จะปรับค่าอุณหภูมิของน้ำยางในช่วง 20-45 °C ค่ากำลังงานสะท้อนที่ได้จากการวัดจะถูกแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับพัฒนาแบบจำลองทำนายค่า %DRC ด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมด้วยอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม ได้แก่ Bayesian Regularization algorithm (BRA), Levenberg-Marquardt algorithm (LMA) และ Scaled Conjugate Gradient (SCG) จากผลการพัฒนาแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาด้วยอัลกอริทึม BRA กับชุดข้อมูลกำลังงานคลื่นสะท้อนทั้ง 3 ค่าความถี่ จะสามารถทำนาย %DRC ที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสอง (MSE) ต่ำสุดเท่ากับ 0.1264 ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) กับข้อมูลค่า DRC แท้จริงของน้ำยางชั้นเท่ากับ 0.9997

คำสำคัญ: ปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง (%DRC), วงจรถนุพอร์ต (SPR), เทคนิคการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม, Bayesian Regularization algorithm (BRA), Levenberg-Marquardt algorithm (LMA), Scaled Conjugate Gradient (SCG)

Thesis Title	Dry Rubber Content Measurement Using A Six-Port Circuit
Author	Mr. Saran Tantiwit
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

A development of a mathematical model for measuring dry rubber content (%DRC) based on reflected waves collected from a six-port reflectometer technique (SPR) is presented. The conventional model was developed based on single frequency reflected-wave datasets. Instead, this thesis proposes a model using reflected powers obtained from three frequencies (1, 1.5, and 2.16 GHz). Several dilute concentrate latex samples of 20-60 %DRC were prepared and the reflected powers were measured using the fabricated SPR. To develop the temperature-independent model, several latex samples from 20-45°C were prepared to measure reflected powers. The reflection powers are converted to DC voltages, digitized, and stored in the microcontroller embedded in the SPR. These datasets are split into three subsets for training, validating, and testing. Three neural algorithms; The Bayesian Regularization algorithm (BRA), The Levenberg-Marquardt algorithm (LMA), and The Scaled Conjugate Gradient (SCG); are applied as a learning tool for developing the models. It is found that the model uses three-frequency datasets and trained by the BRA algorithm is the best model among others. Compared with the true DRC datasets, the least mean square error (MSE) and the correlation coefficient (R) of the model are 0.1264 and 0.9997, respectively.

Keywords: Dry rubber content (%DRC), The six-port reflectometer technique (SPR), The Neural Network technique, Bayesian Regularization algorithm (BRA), Levenberg-Marquardt algorithm (LMA), Scaled Conjugate Gradient (SCG)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือของหลายบุคคล และในที่นี้ผู้วิจัยขอแสดงความนับถือ รศ.ดร. มิตรชัย จงเชียวชำนาญ และ ผศ.ดร. สหพงศ์ สมวงศ์ สำหรับคำแนะนำในการทำงาน จัดหาอุปกรณ์สำหรับทดสอบ ตลอดจนองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้รับถ่ายทอดมาขณะศึกษาเล่าเรียน นอกจากนี้ผู้วิจัยขอแสดงความนับถือทางบริษัท ไทย-ตรังรับเบอร์ ที่เป็นผู้จัดหาตัวอย่างสำหรับทดสอบ ตลอดจนทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่เป็นผู้อำนวยการควบคุมทั้งด้านสถานที่ และทุนการศึกษา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ศรัณย์ ตันติวิเศษ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) [1,6]	5
2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ	6
2.1.2 น้ำยางข้น [9]	8
2.2 วิธีการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง [2]	9
2.2.1 การทดสอบหาโดยวิธีการวัดทางตรง	9
2.2.2 การทดสอบหาโดยวิธีการวัดทางอ้อม	10
2.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบโครงข่ายประสาทเทียม [18,19]	21
2.3.1 ความรู้เกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม	21
2.3.2 ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม	23
2.3.3 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม	25
2.3.4 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม	25
2.3.5 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม MATLAB	26
สำหรับทำนาย %DRC	
2.4 สรุปแนวคิดงานวิจัย	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบ และ เก็บข้อมูล	29

3.1	อธิบายขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด	29
3.2	ขั้นตอนการเตรียมการ	30
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง	31
3.2.2	การแมทชิงอิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ต	33
3.2.3	การกำหนดความถี่ที่ใช้ในการทดสอบและเหตุผล	36
3.3	ขั้นตอนการวัดและทดสอบตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง	39
บทที่ 4	การสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC	43
4.1	ผลการวัดน้ำยางชั้นเจือจางที่ได้จากวงจรหกพอร์ต	43
4.1.1	จำนวนชุดข้อมูลจากการทดสอบวัดน้ำยางชั้นเจือจาง และ องค์ประกอบสำคัญของชุดข้อมูล	43
4.1.2	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนของแต่ละพอร์ตกับค่า %DRC	44
4.2	ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเจือจางที่มีผลต่อค่ากำลังงานของวงจรหกพอร์ต	49
4.2.1	ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1 GHz	50
4.2.2	ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1.5 GHz	51
4.2.3	ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 2.16 GHz	52
4.3	การสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายค่า %DRC ด้วยวิธีการสอน	53
4.3.1	อธิบายรายละเอียดของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือด้วยวงจรหกพอร์ต	53
4.3.2	การสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC ด้วยการสอน และ แสดงผลบนโปรแกรม MATLAB	56
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	60
5.1	สรุปผลงานวิจัย	60
5.1.1	แบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณ %DRC	60
5.1.2	การเปรียบเทียบทุกแบบจำลอง	62
5.2	ข้อเสนอแนะ	63
5.2.1	การแมทชิงอิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ต	63
5.2.2	การเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้จ่ายให้วงจรหกพอร์ต	63
5.3	งานวิจัยในอนาคต	63
5.3.1	การเพิ่มผลการทดสอบแบบจำลองทำนาย %DRC กับตัวอย่างน้ำยางสด	63

5.3.2 การทดสอบจ่ายค่าความถี่ค่าอื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้ดำเนินการไปในงานวิจัย	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก องค์ประกอบของระบบวัด %DRC แบบหลายความถี่	68
ประวัติผู้เขียน	71

รายการตาราง

ชื่อตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางพารา	7
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการ	20
ตารางที่ 3.1 ค่า %DRC ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง	32
ตารางที่ 3.2 ค่า Return loss ณ ความถี่ต่าง ๆ ขณะแมทชิงอิมพีแดนซ์ ด้วยสเปกตรัมอนาไลเซอร์	34
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติสำคัญของวงจรกำเนตความถี่ ADF4351 ที่ถูกนำมาพิจารณา	36
ตารางที่ 3.4 ค่ากำลังงาน ณ ความถี่ต่าง ๆ ที่กำเนิดโดยวงจรกำเนตความถี่ ADF4351	38
ตารางที่ 4.1 สรุปความเป็นเชิงเส้น และ พิสัย ของค่ากำลังงานสะท้อน P3-P6	48
ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อผลวัดที่ความถี่ 1 GHz	50
ตารางที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อผลวัดที่ความถี่ 1.5 GHz	51
ตารางที่ 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อผลวัดที่ความถี่ 2.16 GHz	52
ตารางที่ 4.5 ผลของการพัฒนาแบบจำลอง	58
ตารางที่ 5.1 ผลของการฝึกที่ได้จากโปรแกรม MATLAB กรณีป้อนคลื่น 1 ความถี่ให้วงจรถูกพอร์ท	61
ตารางที่ 5.2 ผลของการฝึกที่ได้จากโปรแกรม MATLAB กรณีป้อนคลื่น 2 ความถี่ให้วงจรถูกพอร์ท	61
ตารางที่ 5.3 ผลของการฝึกที่ได้จากโปรแกรม MATLAB กรณีป้อนคลื่น 3 ความถี่ให้วงจรถูกพอร์ท	62

รายการภาพประกอบ

ชื่อภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย	3
รูปที่ 2.1 อนุภาคของยางธรรมชาติ	6
รูปที่ 2.2 เมโทรแลค [11]	11
รูปที่ 2.3 การวัดค่า DRC ด้วยเมโทรแลค [11]	11
รูปที่ 2.4 ระบบวัดปริมาณ DRC ด้วยแสง [12]	13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบวัดน้ำยาโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก [13]	14
รูปที่ 2.6 วงจรไมโครเวฟสองพอร์ต [16]	16
รูปที่ 2.7 การกระเจิงของคลื่นตกกระทบ α ในวงจรไมโครเวฟ [16]	16
รูปที่ 2.8 แผนภาพหลักการของรีเฟลคโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต [16]	18
รูปที่ 2.9 แผนผังการวัดปริมาณ DRC ด้วยวงจรหกพอร์ต [7]	19
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบเซลล์ประสาทมนุษย์กับโครงข่ายประสาทเทียม [20]	21
รูปที่ 2.11 แบบจำลองเซลล์ประสาทสำหรับอธิบายโครงข่ายประสาทเทียม [19]	22
รูปที่ 2.12 โครงข่ายแบบชั้นเดียว [19]	24
รูปที่ 2.13 โครงข่ายแบบหลายชั้น [19]	24
รูปที่ 2.14 ระบบการวัดด้วยรีเฟลคโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต	27
รูปที่ 3.1 ผังงานขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดในภาพรวม	29
รูปที่ 3.2 วงจรแมทชิงอิมพีแดนซ์แบบพาย	33
รูปที่ 3.3 การต่อเพื่อการแมทชิงอิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ตด้วยโหลด 50 โอห์ม	34
รูปที่ 3.4 ผลการวัดแมทชิงอิมพีแดนซ์ของวงจรหกพอร์ต ณ ความถี่ต่าง ๆ	35
รูปที่ 3.5 การตั้งค่าโปรแกรม ADF435x สำหรับกำเนิดความถี่	37
รูปที่ 3.6 การทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ	37
รูปที่ 3.7 ผลการวัดค่าความถี่ที่กำเนิดด้วยวงจร ADF4351	38
รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการวัดและทดสอบ	40
รูปที่ 3.9 การปรับอุณหภูมิของน้ำยาชั้นเจลจาง	41
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1 GHz ให้วงจรหกพอร์ต	45
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1.5 GHz ให้วงจรหกพอร์ต	46

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 2.16 GHz ให้วงจรทกพอร์ต	47
รูปที่ 4.4 ระบบการวัดปริมาณยางแห้ง	54
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างชุดข้อมูล ผลวัดกำลังงานสะท้อน (กรณี 3 ค่าความถี่)	54
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบชุดข้อมูลก่อนและหลังการนอร์มัลไลซ์	56

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ตัวย่อ	ความหมาย
NRL	น้ำยางธรรมชาติ
DRC	ปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง
%DRC	เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง
SPR	วงจรถักพอร์ต
BRA	อัลกอริทึม Bayesian Regularization algorithm
LMA	อัลกอริทึม Levenberg-Marquardt algorithm
SCG	อัลกอริทึม Scaled Conjugate Gradient

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ยางพาราเป็นสินค้าเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากน้ำยางสามารถแปรรูปเป็นน้ำยางข้น ยางแท่ง และยางแผ่น เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม เช่น กาว ยางล้อ ยางยืด และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารามากเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากประเทศอินโดนีเซีย โดยมีพื้นที่ปลูกยางพาราทั้งหมด 19,613,559 ไร่ และมีผลผลิต 4,451,848 ตัน และ พื้นที่ปลูกยางที่มากที่สุดของประเทศอยู่ที่ภาคใต้ของประเทศ เมื่อเทียบกับภาคอื่นของประเทศรวม 12,849,166 ไร่ นอกจากนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกและผลิตน้ำยางธรรมชาติ (NRL ; Natural rubber latex) มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งของโลก เมื่อมีการซื้อขายน้ำยางธรรมชาติเกิดขึ้น ก็ต้องมีการกำหนดคุณภาพของน้ำยางพารา ซึ่งคุณภาพสามารถกำหนดได้ด้วยปริมาณยางแห้งในน้ำยาง หรือ ปริมาณ DRC (Dry Rubber Contents ;DRC) ซึ่งตลาดซื้อขายน้ำยางพาราจากเกษตรกร หรือ บทควมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางพารา จะนิยมปริมาณ DRC ในอัตราส่วนร้อยละกับปริมาณน้ำยาง หรือ %DRC (Percentage of Dry Rubber Contents ;%DRC) และ โดยปกติน้ำยางพาราที่ได้จากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทยมีค่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 45%DRC [1]

การวัดปริมาณ DRC มีความสำคัญอย่างมากต่อการกำหนดคุณภาพ และ ราคาของน้ำยางพารา ซึ่งการวัด DRC จะวัด ณ จุดรับซื้อน้ำยาง โดยผู้รับซื้อเป็นผู้กำหนดเกณฑ์คุณภาพของยางพาราที่รับซื้อและราคา ซึ่งเกษตรกรไม่สามารถมีส่วนร่วมในการตรวจสอบการวัดปริมาณ DRC เพราะขาดความรู้ ความชำนาญ และเครื่องมือที่เที่ยงตรงสำหรับวัด DRC นอกจากนี้หากผู้วัดไม่มีความชำนาญในการวัดอาจทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อน สำหรับการหาปริมาณ DRC สามารถหาได้ 2 วิธี คือ วิธีทางตรงและทางอ้อม วิธีทางตรงเป็นวิธีวัดน้ำหนักเนื้อยางแห้งโดยตรง และเป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการวัดปริมาณ DRC (BS ISO 126:2005 Natural rubber latex concentrate : Determination of dry rubber content) ซึ่งมีข้อเสียสำคัญอยู่หลายประการ เช่น ต้องทดสอบวัดภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมตามมาตรฐานทุกประการ เพื่อให้ได้ผลวัดที่แม่นยำและเที่ยงตรง วิธีนี้มีข้อเสียคือ จะต้องเสียตัวอย่างน้ำยางเพื่อใช้ทดสอบ ต้องลงทุนเครื่องมือและเจ้าหน้าที่วัด และใช้เวลาทดสอบนาน จึงไม่เหมาะสำหรับวัดปริมาณ DRC ณ จุดรับซื้อน้ำยาง สำหรับวิธีทางอ้อมเป็นการวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางพารา เช่น วัดการหักเหของแสง [12] ความถ่วงจำเพาะ [2]

และอื่น ๆ รวมถึง คุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ค่าความจุไฟฟ้าของน้ำยาง [14] ผลตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟของน้ำยาง [15] เป็นต้น สำหรับข้อดีของวิธีการวัดทางอ้อมที่ดีกว่าวิธีการวัดทางตรง คือ เป็นวิธีการที่ต้องเสียตัวอย่างน้ำยาง ได้ผลรวดเร็ว และ ใช้พลังงานน้อย [2]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดวิธีการวัดทางอ้อม โดยอาศัยคุณสมบัติการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟหลังจากไปตกกระทบกับน้ำยางด้วยวงจรรเฟกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต (Six Port Reflectometer ; SPR) [17] ซึ่งเป็นวิธีการที่มีข้อดีหลายประการ เช่น อุปกรณ์วัดมีขนาดเล็กพกพาได้สะดวก ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ และ ใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอบด้วยเตาไมโครเวฟ วิธีนี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งาน ณ จุดรับซื้อน้ำยาง แต่เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมภายนอกของบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันออกของประเทศไทย มีอุณหภูมิเฉลี่ย 27.6 องศาเซลเซียส โดยสูงสุดที่ 31.4 องศาเซลเซียส และ ต่ำสุดที่ 23.9 องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้เครื่องมือวัด %DRC ด้วยวงจรรหกพอร์ตทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดในอุณหภูมิแวดล้อมของการทำงานจริง จึงต้องพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC ที่วัด %DRC ได้ได้ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิครอบคลุมทุกช่วงค่า %DRC ของน้ำยางที่ซื้อขาย ในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 45 องศาเซลเซียสซึ่งครอบคลุมอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงในประเทศและค่า %DRC ช่วง 20 ถึง 60%

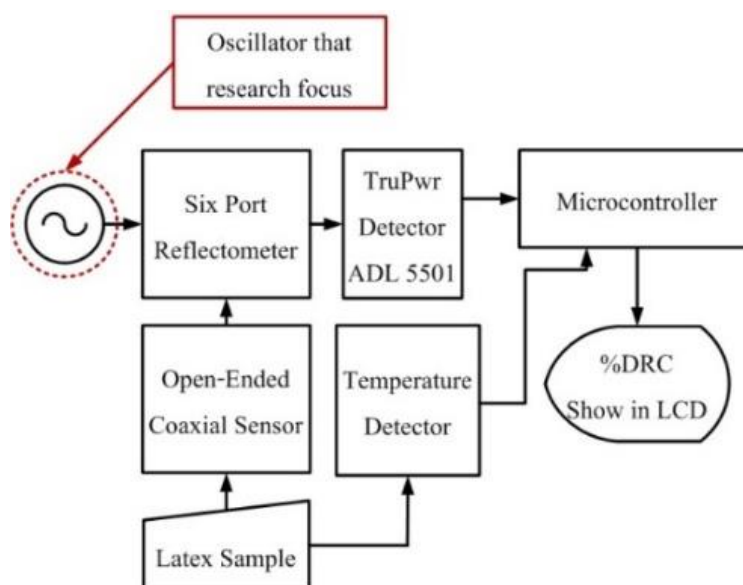
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายความถี่ให้วงจรรหกพอร์ต
- 2) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัด %DRC ของวงจรรหกพอร์ต
- 3) เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงการวัด 20 ถึง 60 %DRC และครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 45 องศาเซลเซียส

1.3 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการหาปริมาณความชื้นในน้ำยางพารา [3,4] พบว่าหากป้อนคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่ X (X-Band) พบว่าค่าความชื้นเป็นอิสระจากอุณหภูมิของน้ำยางพารา และจากองค์ประกอบของน้ำยางพาราหากทราบความชื้น หรือ ปริมาณน้ำในน้ำยางพารา ก็จะสามารถทราบที่เป็นของแข็ง หรือ DRC ได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ %DRC ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิของน้ำยางพารา อย่างไรก็ตามการสร้างเครื่องมือวัดในย่านความถี่ X นั้นมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน โดยใช้งานได้เฉพาะการสื่อสารทางการทหาร และ การสื่อสารผ่านดาวเทียม ดังนั้นจึงมีการควบคุม และ ข้อจำกัดในการนำไปใช้งานใน

ภาคปฏิบัติ ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่ X วิทยุ และ เป็นยุทธโศปกรณ์ที่จำกัดการส่งออก-นำเข้า นอกจากนี้ เครื่องมือวัดที่ใช้งานในย่านความถี่นี้ ราคาแพง และ ยากที่จะผลิต เมื่อเทียบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานได้ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ความถี่ย่าน X ยังไวต่อสภาพแวดล้อม และ ระยะในการตรวจรู้ต่ำ (Short sensing range) ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับใช้ ณ จุดรับซื้อน้ำยาง และ จากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติม ทำให้ทราบว่า หากจ่ายคลื่นไมโครเวฟความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ไปตกกระทบน้ำยางพารา พลังงานคลื่นส่วนมากไป หมุนโมเลกุลของน้ำ หากต่ำกว่า 2 GHz พลังงานคลื่นจะถูกแบ่งออก ส่วนหนึ่งไปหมุนโมเลกุลของน้ำ และ อีกส่วนถูกลดทอน โดยการเหนี่ยวนำของเซรัมน้ำยาง (The conductivity of the latex serum) ดังนั้นพลังงานคลื่นจึงมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันตามช่วงความถี่ เมื่อป้อนคลื่นไมโครเวฟให้ ตกกระทบตัวตัวอย่างน้ำยางที่มีค่า %DRC เหมือนกัน [5] จากผลการทบทวนงานวิจัย ผู้วิจัยมี แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหา %DRC ที่ไม่ไวต่อสภาพแวดล้อม ภายนอก ซึ่งตัวงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณ DRC ด้วยวงจรถูกพอร์ด โดยแสดงจุด ที่ผู้วิจัยมุ่งเน้น คือ การป้อนคลื่นหลายความถี่ เพื่อให้ได้ข้อมูลพร้อมกันหลายชุดเพื่อลดความไม่ แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบวัดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ ดังแผนผังระเบียบวิธี วิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

จากรูปที่ 1 ผู้วิจัยจะใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นที่สร้างได้หลายความถี่เพื่อมาป้อนให้กับให้วงจรทพอร์ต คลื่นความถี่จากแหล่งกำเนิดจะแพร่กระจายเข้าสู่วงจรทพอร์ตและส่งผ่านไปยังโพรบปลายเปิดที่จุ่มน้ำยาง คลื่นจะไปตกกระทบกับน้ำยาง และสะท้อนกลับไปยังพอร์ตที่ต่อกับวงจรตรวจวัดกำลังงานทั้ง 4 วงจร วงจรตรวจวัดกำลังงานจะแปลงคลื่นไมโครเวฟเป็นโวลต์ กระแสตรงโดยระดับโวลต์จะสัมพันธ์กับขนาดกำลังงานที่ปรากฏที่อินพุตของวงจรตรวจวัดกำลังงาน โวลต์กระแสตรงทั้ง 4 ค่าจะป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์และแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและเข้าสู่แบบจำลองทำนาย DRC จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อค่าการหมุนของโมเลกุลน้ำยางและทำให้การแปลงผลค่า DRC ผิดเพี้ยนได้หากไม่มีการชดเชย

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้กำหนดช่วงความถี่ที่จะใช้ทดสอบขณะวัด %DRC ไว้สองช่วง คือ ช่วง 1-2 GHz และ 2-3 GHz จากนั้นนำผลทดสอบไปวิเคราะห์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่า %DRC ที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายค่า DRC โดยนำแบบจำลองที่ได้พัฒนาข้างต้นไปติดตั้งในวงจรทพอร์ต เพื่อสร้างเป็นเครื่องวัดปริมาณ %DRC ที่มีประสิทธิภาพสูงในลำดับถัดไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองที่พัฒนาด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายค่าปริมาณ DRC ด้วยวงจรทพอร์ตที่เที่ยงตรง

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ความถี่ไมโครเวฟทดสอบในช่วง 1.0 GHz ถึง 3.0 GHz ใช้สำหรับจ่ายให้วงจรทพอร์ต
- 2) น้ำยางชั้นที่ทดสอบมีค่า DRC ในช่วง 20 ถึง 60 %DRC
- 3) อุณหภูมิของน้ำยางชั้นขณะทดสอบอยู่ในช่วง 20 ถึง 45 องศาเซลเซียส
- 4) วงจรรีเฟลกโตมิเตอร์เป็นแบบวงจรทพอร์ตและออกแบบมาให้ทำงานหลายความถี่ด้วยการปรับแมทซ์ที่พอร์ตที่ต่อกับโพรบวัดน้ำยาง

บทที่ 2

ทฤษฎี และ หลักการ

งานวิจัยนี้มีการศึกษาทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้อง โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมในหลายองค์ประกอบ ซึ่งในบทนี้ประกอบด้วยหัวข้อสำคัญ ดังนี้ ยางธรรมชาติ วิธีการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง การประยุกต์ใช้การสร้างแบบจำลองแบบโครงข่าย และ สรุปแนวคิดงานวิจัย

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) [1,6]

ยาง (Rubber) คือ สารประกอบพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง และ ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ สำหรับยางที่ได้จากต้นพืช เรียกว่า ยางธรรมชาติสำหรับที่มาของยางธรรมชาติได้จากพืชที่ให้น้ำยางได้ โดยมีพืชหลายชนิด และ แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติและส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างพืชที่ให้น้ำยางได้ ดังนี้ (1) ยางพารา (*Hevea brasiliensis*), (2) กัต-ตาเปอซา และ บาลาตา (*Gutta-percha and Balata*), (3) วายยูเล (*Guayule*) และ (4) ต้น Kok-Saghyz เป็นต้น

ในส่วนของประเทศไทยยางธรรมชาติส่วนใหญ่ได้มาจากการกรีดต้นยางสายพันธุ์ *Hevea Braziliensis* หรือ ต้นยางพารา ซึ่งถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย และในปี พ.ศ. 2559 พบว่าในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารารวมทั้งหมด 19,613,559 ไร่ โดยมีมากเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งพื้นที่ในการปลูกยางพาราส่วนใหญ่อยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากภาคใต้ของประเทศไทยมีลักษณะ ภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งเหมาะสมแก่การปลูกต้นยางพารา และ การดูแลรักษาต้นยางพารา ประกอบกับผลตอบแทนจากผลผลิตที่สูงจากข้อมูลปี 2551 จึงเป็นเหตุให้มีเกษตรกรสนใจเพาะปลูกเป็นจำนวนมาก [6]

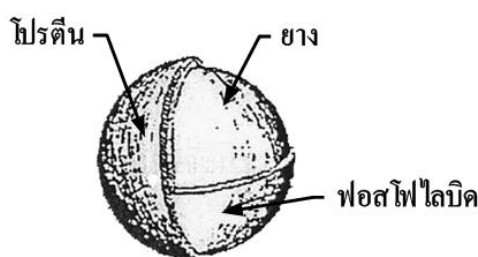
เนื่องจากงานวิจัยเล่มนี้ดำเนินการศึกษา โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนาย %DRC ด้วยวงจรถูกพอร์ด ดังนั้นในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับน้ำยางพารา ผู้วิจัยจะนำเสนอเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำยางเท่านั้น โดยจะขอกกล่าวถึงรายละเอียดของ น้ำยางธรรมชาติ และ น้ำยางข้น (ผู้วิจัยนำน้ำยางข้นมาเจือจาง เพื่อใช้เป็นตัวอย่างแทนน้ำยางสด) ในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ

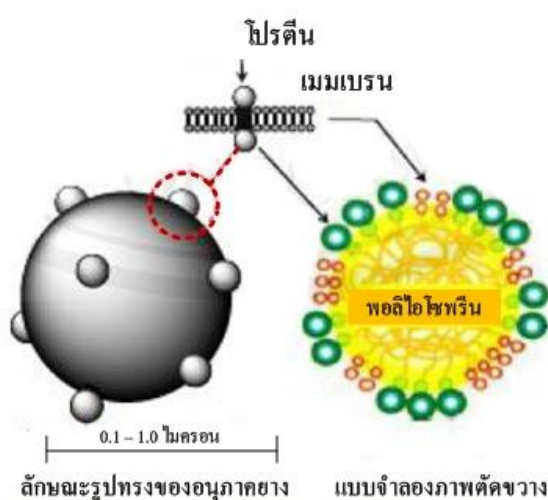
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลผลิตที่ได้จากการกรีดต้นยางพารา โดยน้ำยางธรรมชาติที่ได้นี้ มักถูกเรียกว่า น้ำยางพารา หรือ น้ำยางสด และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะของน้ำยางพารา องค์ประกอบของน้ำยางพารา และ การแปรรูปเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

1) สมบัติของน้ำยางพารา [1,7]

น้ำยางพาราที่ได้จากการกรีดต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเหมือนนํ้านม มีสภาพเป็นสารคอลลอยด์ น้ำยางสดจะมีความหนาแน่นระหว่าง 0.975 – 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า PH โดยประมาณระหว่าง 6.5 – 7.0 ในน้ำยางพาราจะมีอนุภาคของแข็ง ซึ่งเป็นเม็ดยางอยู่ภายในน้ำยาง และ อนุภาคเม็ดยางมีขนาดอยู่ระหว่าง 400-25,00 Å และ มีความหนืดของตัวน้ำยางพาราประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ โดยน้ำยางพารา ซึ่งจัดอยู่ในหมวดหมู่ของน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2.1



(ก) ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยาง [7]



(ข) ลักษณะรูปทรงของอนุภาคยาง และ แบบจำลองภาพตัดขวาง [1]

รูปที่ 2.1 อนุภาคของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 2.1 ปริมาณส่วนประกอบของอนุภาค และ จากคุณสมบัติของน้ำยางพารา ที่กล่าวมาข้างต้นอาจมีค่าที่แปรปรวนขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบของน้ำยาง และอีกหลากหลายปัจจัย เช่น พันธุ์ยาง อายุของต้นยาง ฤดูกาลที่กรีต และ วิธีการกรีต สำหรับส่วนประกอบของน้ำยาง โดยสังเขปจะถูกกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 2) ส่วนประกอบของน้ำยางพารา

นอกจากนี้ น้ำยางที่ได้จากการกรีตต้นยางพาราจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ประจุไฟฟ้าเป็นลบ จึงเกิดการผลักกันระหว่างเม็ดยางตลอดเวลาทำให้สามารถคงสภาพในสถานะของเหลวได้ หากไม่มีการรบกวนจากปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด เป็นต้น เราสามารถทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนยาง (Blackley,1999) ได้เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางชนิดอื่น ๆ และในอุตสาหกรรมยางต่อไป

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยใช้น้ำยางชั้นเจือจาง เพื่อให้ได้ค่า %DRC ต่าง ๆ สำหรับงานวิจัย นี้จึงเป็นเหตุผลให้ต้องยกตัวอย่างน้ำยางชั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการแปรรูปน้ำยางสด

2) ส่วนประกอบของน้ำยางพารา [7]

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงส่วนประกอบของน้ำยางพารา โดยปกติน้ำยางพาราที่ได้จากการกรีตต้นยางพารามีส่วนประกอบแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางพารา

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27-48
เนื้อยางแห้ง	25-45
สารจำพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-2.5
ซีเล้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

จากตารางที่ 2.1 พบว่าส่วนของสารที่เป็นของแข็งทั้งหมด มีปริมาณใกล้เคียงกับเนื้อยางแห้ง ดังนั้นจากตารางที่ 2.1 จึงสามารถประมาณว่าสารที่เป็นของแข็งทั้งหมด คือ ปริมาณเนื้อยางแห้งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น การหาปริมาณยางแห้ง หรือ หา %DRC จึงเป็นการหาปริมาณของแข็ง

ทั้งหมด จึงนำหลักการนี้มาประยุกต์หาปริมาณยางแห้งในน้ำยางด้วยวิธีการอบด้วยเตาไมโครเวฟซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ วิธีการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง

นอกจากตารางที่ 2.1 ยังสามารถแยกองค์ประกอบของน้ำยางได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และ ส่วนที่ไม่ใช่ยาง สำหรับส่วนที่เป็นเนื้อยาง คือ อนุภาคยาง ซึ่งมีคุณสมบัติตามที่กล่าวมาแล้วในส่วนของสมบัติของน้ำยางพารา โดยส่วนของอนุภาคยางยังประกอบด้วย สารพวกโปรตีนที่ห่อหุ้มตัวอนุภาค ซึ่งโปรตีนนี้อาจมีโลหะ เช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียม และทองแดง ปะปนอยู่เล็กน้อยเพียง 0.5% ของปริมาณโปรตีนในน้ำยางพารา และ ส่วนที่เป็นเนื้อยางอีกส่วน คือ ไขมัน (Lipid) เป็นไขมันที่อยู่กับอนุภาคของเม็ดยาง ส่วนใหญ่เป็นพวกฟอสโฟไลปิด (ฟอสโฟไลปิดที่สำคัญของน้ำยางเป็นชนิด เลซิทีน (Lecithin)), Eicosyl alcohol, สเตอรอล และ เอสเทอร์ของสเตอรอล สำหรับส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง ประกอบด้วย น้ำหรือเซรัมของน้ำยาง โปรตีนและกรดอะมิโน และ ส่วนของลูทอยด์และสารอื่น ๆ

3) การแปรรูปเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม [7,8]

แม้ว่ายางธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่นหลายอย่าง แต่ยางธรรมชาติยังมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางสังเคราะห์ เช่น การเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อน หรือ การบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทาลละลายอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นในการส่งออกยางธรรมชาติ หรือ การขนย้ายส่วนมากมักจะแปรรูปยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน หรือ ยางแท่ง และ ยางเครป เพื่อความสะดวกในการขนย้าย และการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในงานอุตสาหกรรม เช่น การผลิต ยางล้อรถยนต์ หรือ ชิ้นส่วนรถยนต์ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ปะเก็นยาง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รองเท้า ถุงมือยาง เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นรายละเอียดของน้ำยางข้นเพราะน้ำยางข้นสามารถเก็บรักษาได้นานกว่าน้ำยางสด และไม่มีสิ่งเจือปนมากจึงเหมาะสำหรับนำมาใช้สร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC

2.1.2 น้ำยางข้น [9]

น้ำยางสดจากต้นยางพาราไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมโดยตรง เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางต่ำ ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำยางได้โดยง่าย ประกอบกับน้ำยางจากสวนจะต้องมีการขนส่งจากสวนยางสู่โรงงานแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงต้องมีการแปรรูป เพื่อความสะดวกในการขนส่ง ซึ่งน้ำยางข้นก็เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแปรรูปยางสดเพื่อความสะดวกดังกล่าว สำหรับน้ำยางข้นโดยความหมาย หมายถึง คือ น้ำยางที่ผ่านการกำจัดน้ำบางส่วน เพื่อให้ได้ปริมาณเนื้อยางแห้งเป็น 60 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเดิมก่อนการแปรรูปเป็นน้ำยางข้นมีปริมาณยางแห้งเพียง 30-40 % โดยน้ำหนัก

น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการชุบ หรือจุ่ม (dipping products) เช่น ถุงมือทางการแพทย์ ถุงมือใช้งานในบ้าน ถุงยางอนามัย และ ลูกโป่ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำยางข้นปริมาณสูงในการทำผลิตภัณฑ์สายยางยืด และยางพองน้ำ ปัจจุบันน้ำยางข้นมีความต้องการในตลาดที่สูงจึงมีการพัฒนาวิธีการผลิตน้ำยางหลายวิธีการ ซึ่งประกอบด้วย วิธีทำให้เกิดครีม วิธีการปั่นโดยเครื่องหมุนเหวี่ยง วิธีทำให้น้ำระเหย และ วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า ซึ่งจากวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมา วิธีการปั่นโดยเครื่องหมุนเหวี่ยง หรือ Centrifuged Process เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้น้ำยางข้นสูตร HA ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.980-2552

เมื่อทราบรายละเอียดเบื้องต้นเกี่ยวกับน้ำยางพารา และ น้ำยางข้นที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบแล้ว ในหัวข้อถัดไป ผู้วิจัยขอนำเสนอองค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง

2.2 วิธีการทดสอบหาความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง [2]

ในอดีต เกษตรกรสวนยางพารานิยมแปรรูปน้ำยางพาราเป็นยางแผ่นก่อนนำไปขาย แต่ปัจจุบันเกษตรกรสามารถขายน้ำยางพาราได้โดยไม่ต้องแปรรูป ซึ่งการขายน้ำยางพารามีข้อดีกว่าการขายยางแผ่นอยู่หลายประการ เช่น สามารถลดต้นทุนในการผลิตยางแผ่น อีกทั้งยังสามารถรับเงินจากการขายน้ำยางได้ทันทีหลังการขาย และเกณฑ์ในการกำหนดคุณภาพของน้ำยางที่ซื้อขายกันในตลาดยางพาราถูกกำหนดด้วยปริมาณ DRC ของน้ำยาง ดังนั้นการวัดปริมาณ DRC จึงสำคัญอย่างมากในการกำหนดราคาน้ำยาง ซึ่งการหาปริมาณ DRC สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การหาทางตรงและทางอ้อม

2.2.1 การทดสอบหาโดยวิธีการวัดทางตรง

วิธีการหาทางตรงอาศัยการหาน้ำหนักของยางแห้งในน้ำยาง กล่าวคือ การชั่งน้ำหนักของเนื้อยางแห้งโดยตรง วิธีการหาทางตรงมีข้อเสีย คือ เป็นวิธีที่ทำลายน้ำยาง และใช้เวลาในการวัดนาน ซึ่งผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างวิธีการหาทางตรงดังต่อไปนี้

- 1) วิธีมาตรฐานในการวัดปริมาณ DRC โดยการอบด้วยเตาอบหมุนเวียนอากาศ
- 2) วิธีการหาปริมาณ DRC โดยอบด้วยเตาไมโครเวฟ

1) วิธีการมาตรฐานในการวัดปริมาณ DRC โดยการอบด้วยเตาอบหมุนเวียนอากาศ [2]

วิธีการนี้เริ่มจากการเติมกรดอะซิติกเพื่อทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนกลายเป็นยางแผ่น จากนั้นนำยางแผ่นไปอบเพื่อให้โมเลกุลน้ำระเหยออก และคำนวณหาปริมาณ DRC โดยการหา

อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักหลังการอบระเหยโมเลกุลน้ำ กับ น้ำหนักตัวอย่างน้ำยาก่อนการจับตัวเป็นก้อน

วิธีมาตรฐานมีข้อเสีย คือ ใช้เวลาทดสอบนาน กระบวนการอบใช้ระยะเวลาเกินกว่า 6 ชั่วโมง และ ทำลายตัวอย่างน้ำยาก นอกจากนี้ต้องให้ความร้อนที่ 70 ± 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเสร็จกระบวนการ หากต้องการลดเวลาต้องเร่งกระบวนการอบ ซึ่งต้องควบคุมสภาพแวดล้อมภายในเตาอบอย่างระมัดระวัง ด้วยเหตุนี้ทำให้วิธีการมาตรฐานในการวัดปริมาณ DRC โดยการอบด้วยเตาอบหมุนเวียนอากาศ ไม่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการวัดภาคสนาม

2) วิธีการหาปริมาณ DRC โดยอบด้วยเตาไมโครเวฟ [10]

เป็นวิธีการที่พัฒนาจากวิธีมาตรฐาน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณ DRC ได้เร็วขึ้น โดยนำเตาอบไมโครเวฟมาใช้อบตัวอย่างน้ำยากแทนการใช้เตาอบหมุนเวียนอากาศ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ คือ สามารถหาปริมาณ DRC ได้ในระยะเวลา 10 นาที และปริมาณของแข็งทั้งหมดในระยะเวลา 35 นาที โดยตั้งระดับกำลังงานของไมโครเวฟไว้ที่ระดับกลาง ถึง สูง (325-650W) ซึ่งผลการทดลองที่ได้แม่นยำใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐานที่ใช้เวลามากกว่า 6 ชั่วโมง แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย คือ เตามิโครเวฟมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวกแก่การพกพา และไม่ประหยัดพลังงาน

2.2.2 การทดสอบหาโดยวิธีการวัดทางอ้อม

วิธีการทางอ้อมเป็นการวัดคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำยากและนำมาคำนวณหาปริมาณ DRC ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นโดยเฉพาะของแต่ละเทคนิค ซึ่งมีหลายวิธีการ โดยผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างวิธีการวัดโดยอ้อมดังต่อไปนี้

- 1) เทคนิควัดความหนาแน่น [2]
- 2) เทคนิควัดการกระจายของแสง [12]
- 3) เทคนิคการหาปริมาณยางแห้งในน้ำยากโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก [13]
- 4) เทคนิคการหาค่าความจุไฟฟ้า [14]
- 5) เทคนิควัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ [15]

1) เทคนิควัดความหนาแน่น [2]

เทคนิคการวัดความหนาแน่นของน้ำยากด้วยไฮโดรมิเตอร์ ซึ่งไฮโดรมิเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวัด เรียกว่า “เมโทรแลค หรือ ลาเท็กซ์โนมิเตอร์ (Latexometer)” เมื่อความหนาแน่นของน้ำยากแตกต่างกันตามปริมาณ DRC ผลที่ได้ถูกแสดงในลักษณะเป็นสเกลระบุปริมาณ DRC ของน้ำยากในหน่วย กรัม/ลิตร



(ก) เมโทรแลค



(ข) ภาชนะทรงกระบอกสูง

รูปที่ 2.2 เมโทรแลค [11]

จากรูปที่ 2.2 การวัดเริ่มจากการเจือจางน้ำยางกับน้ำ โดยผสมน้ำยางหนึ่งส่วนกับน้ำสองส่วน จากนั้นนำไปบรรจุใส่ภาชนะรูปทรงกระบอกสูงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร เมื่อบรรจุเสร็จจึงสั่นทำการปิดฟองน้ำที่ผิวของน้ำยางออกจนหมด และจุ่มเมโทรแลคลงในน้ำยาง ผลการวัดคือ ระดับที่จมลงไปใต้น้ำยางของเมโทรแลค ขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของน้ำยาง และนำไปสู่ปริมาณ DRC สำหรับการอ่านค่า DRC ด้วยเมโทรแลคแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การวัดค่า DRC ด้วยเมโทรแลค [11]

จากรูปที่ 2.3 การวัดและอ่านค่าปริมาณ DRC ด้วยวิธีนี้ต้องทำซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าสูงถึง 5 – 10 %DRC ซึ่งความผิดพลาด หรือความคลาดเคลื่อน สามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุหลักสองประการ คือ ประการที่หนึ่งจากความไม่แน่นอนของความหนาแน่นของเนื้อยาง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ น้ำยาง 29 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.902 ถึง 0.9035 และ ประการที่สองส่วนที่เป็นซีรัมของน้ำยางไม่ได้มีองค์ประกอบเดียว ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบโปรตีนและเกลือที่ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของน้ำยางในภาพรวมแตกต่างกันตามองค์ประกอบของโปรตีนและเกลือที่ต่างกัน

2) เทคนิคการวัดด้วยแสง [12]

เทคนิคการวัดด้วยแสงเป็นการวัดโดยใช้เลเซอร์และสเปกตรัม โดยมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดหาปริมาณเนื้อของส่วนประกอบ โดย Zhao et al. (2010) ออกแบบระบบสำหรับวัดหาปริมาณ DRC ของน้ำยางโดยอาศัยหลักการของ Lambert กล่าวคือ อาศัยการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบบนตัวอย่างน้ำยางที่มีปริมาณ DRC ต่างกันทำให้ปริมาณแสงที่สะท้อนกลับมามีความแตกต่างกันตามปริมาณ DRC

เนื่องจากน้ำยางประกอบด้วยโครงสร้างพันธะ C-H,N-H, และ O-H ที่ทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์ซึมซับแสง เมื่อนำตัวอย่างน้ำยางมาผ่านกระบวนการทดสอบด้วยเทคนิคการวัดด้วยแสง ผลการทดสอบจะสอดคล้องกับส่วนกลับการส่งผ่านคลื่นในตัวกลางที่มีการดูดซับตามกฎของ Lambert-Beer

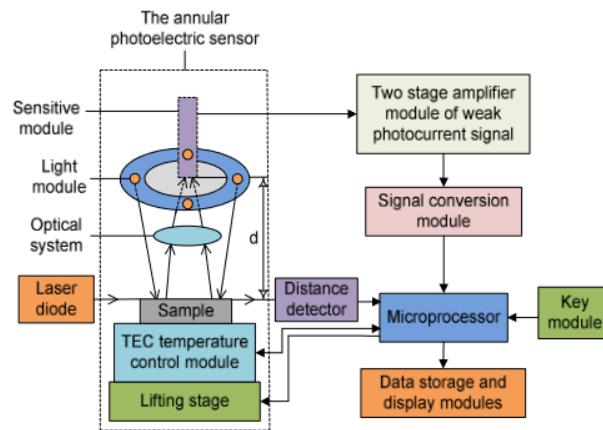
$$\log\left(\frac{1}{T}\right) = Kbc \quad (2.1)$$

c คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ทดสอบในตัวอย่างเนื้อยาง K คือ ปัจจัยการดูดซับซึ่งเกี่ยวข้องกับความยาวคลื่นของแสงตกกระทบและอุณหภูมิของตัวอย่าง b คือ ความยาวของจานสี (colorimetric dish) และ T คืออัตราการส่งผ่านแสง

$$T = \left(\frac{I_t}{I_0}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของแสงตกกระทบ และ I_t คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่าน โดยระบบการวัดประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดแสงแบบวงแหวน (Annular photoelectric sensor) เลเซอร์ไดโอด เครื่องตรวจจับระยะทาง โมดูลขยายสัญญาณสองภาคเพื่อขยายกระแสแสง โมดูลแปลงสัญญาณ ไมโครโปรเซสเซอร์ หน่วยเก็บข้อมูล และจอแสดงผล เมื่อปริมาณ DRC ในตัวอย่างมีผลต่อการกระเจิง และการสะท้อนของแสงตกกระทบ เป็นผลให้กระแสโฟโต ซึ่งเป็นเอาต์พุตมีความไวต่อแสงมากขึ้นเมื่อปริมาณ DRC มากขึ้นขณะที่อุณหภูมิคงที่ ตามหลักการแหล่งกำเนิดแสงของระบบประกอบด้วยมัลติแอลอีดีกับแสงฉุกฉิน (Emergent light obliquely) ซึ่งทำให้แสงเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวอย่าง ระยะยก และ เครื่องตรวจจับระยะ จะถูกควบคุมให้ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์วัดแสงกับผิวของตัวอย่าง จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตไปขยายด้วยโมดูล

ขยายสัญญาณสองภาค และส่งไปยังไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อประมวลผลต่อไป สำหรับโครงสร้างของระบบวัดปริมาณ DRC ด้วยแสงแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบวัดปริมาณ DRC ด้วยแสง [12]

จากรูปที่ 2.4 ประกอบกับการศึกษาบทความเกี่ยวกับการวัดปริมาณ DRC ด้วยแสง ทำให้ผู้วิจัยพบจุดอ่อนของเทคนิคการวัดด้วยแสง คือ ระยะห่างระหว่างโมดูลมีความละเอียดอ่อน หากคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบต่อารวัด และ อุณหภูมิของตัวอย่างต้องถูกควบคุมด้วยเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์โมดูล (TEC) ขณะวัด

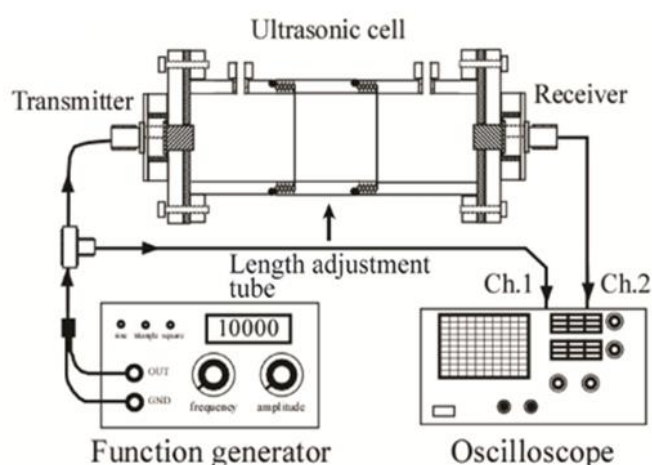
3) เทคนิคการหาปริมาณยางแห้งในน้ำยางโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก [13]

การส่งคลื่นอัลตราโซนิกพัลส์ผ่านกระบอกที่บรรจุน้ำยาง ซึ่งความเร็วของอัลตราโซนิกและการลดทอนเชิงพื้นที่ (Spatial attenuation) จะเกิดขึ้นและมีค่าแตกต่างกันตามปริมาณ DRC ซึ่งผลทดลองพบว่าความเร็วอัลตราโซนิกและการลดทอนเชิงพื้นที่เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับปริมาณ DRC ทำให้เราสามารถคำนวณหาปริมาณ DRC ด้วยความแม่นยำที่เทียบเคียงกับเทคนิคการทำให้แห้งด้วยไมโครเวฟได้ โดยอาศัยการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่น เมื่อเดินทางได้ระยะหนึ่งในที่กำหนดให้เป็นระยะ X

หากกำหนดให้คลื่นอัลตราโซนิกเท่านั้นที่เดินทางในกระบอกบรรจุน้ำยาง จะได้ค่าการลดทอนของพัลส์ที่ไม่พิจารณาคลื่นสะท้อนดังสมการที่ 2.3

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.3)$$

เมื่อ A_x คือ แอมพลิจูดของคลื่นเมื่อเดินทางได้ระยะ X เซ็นติเมตร ส่วน A_x คือ แอมพลิจูดค่าเริ่มต้น และ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวม จะเป็นค่าที่ใช้สำหรับนำไปคำนวณหาปริมาณ DRC สำหรับโครงสร้างของระบบวัดน้ำยางโดยการใช้คลื่นอัลตราโซนิกแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งวิธีนี้ยังต้องติดตั้งเครื่องมือขนาดใหญ่ และไม่เหมาะต่อการใช้งานในภาคสนาม



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบวัดน้ำยางโดยการใช้คลื่นอัลตราโซนิก [13]

4) เทคนิคการหาค่าความจุไฟฟ้า [14]

อาศัยการกำหนดค่าความจุไฟฟ้าด้วยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือ ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่น และค่าความจุไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยขึ้นอยู่กับการวางแผ่นโลหะสองแผ่นและฉนวนที่อยู่กึ่งกลาง หากพิจารณาถึงโครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่นวางแยกกัน โดยมีฉนวนอยู่กึ่งกลาง ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้า (C) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของแผ่นโลหะ (A) ค่าซึมซาบความเป็นฉนวนของฉนวนกึ่งกลาง และ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่น (t) โดยค่าความจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.4 ดังต่อไปนี้

$$C = K \left(\frac{A}{t} \right) \quad (2.4)$$

หากคงระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ กำหนดขนาดของแผ่นโลหะ และลักษณะการจัดวางแผ่นโลหะให้คงที่ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามฉนวนที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นโลหะ

เมื่อนำน้ำยางมาบรรจุไว้กึ่งกลางระหว่างแผ่นโลหะจะพบว่าให้ค่าความจุไฟฟ้าค่าหนึ่ง ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณ DRC ในน้ำยางได้ [14]

วิธีนี้จะไม่มีความไม่แน่นอนในการวัดสูงถึง $\pm 2\%$ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อิทธิพลขององค์ประกอบที่ไม่ใช่น้ำยางและสิ่งเจือปน

5) เทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ [15]

หลักการของเทคนิคไมโครเวฟ พิจารณาถึงสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำ (Permittivity of water) เป็นหลัก เพราะมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสูงกว่าสภาพยอมไฟฟ้าของเนื้อยาง โดยสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำถูกกำหนดให้มีค่าเป็น $\epsilon_w = 60 - j0.34$ ขณะที่สภาพยอมไฟฟ้าของเนื้อยาง มีค่าดังนี้ $\epsilon_s = 2.3 - j0.02$ เมื่อ ϵ_w สภาพยอมไฟฟ้าของน้ำ และ ϵ_s คือ สภาพยอมไฟฟ้าของเนื้อยาง ดังนั้นหมายถึง สัมประสิทธิ์การดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (Absorption coefficient of microwaves) ขึ้นอยู่กับน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นเนื้อยางในน้ำยาง หากมีปริมาณน้ำในน้ำยางมากจะเป็นผลให้สามารถลดทอนคลื่นไมโครเวฟได้มาก อย่างไรก็ตามส่วนที่ไม่ใช่น้ำยางที่เป็นของแข็งก็ยังคงเป็นส่วนประกอบของน้ำยาง โดยปริมาณของของแข็งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ปลูกยาง ดังนั้นความแม่นยำของเทคนิคไมโครเวฟที่ความถี่ต่ำจะได้รับผลกระทบจากการแปรผันเนื่องจากส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของน้ำยางพบว่าส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำยางมีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับปริมาณเนื้อยางแห้ง ดังนั้นวิธีการทางตรงด้วยทั่วไปแล้วจะถือว่า %DRC เป็นส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมดโดยประมาณ ดังนั้นสำหรับวิธีการวัด %DRC ทางอ้อมอย่างเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟก็จะอาศัยการวัดปริมาณน้ำเป็นหลัก เพื่อหักลบหาส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมด หรือ ปริมาณ %DRC โดยประมาณต่อไป

เทคนิคนี้มีการประยุกต์ใช้สำหรับวัดปริมาณยางแห้งในน้ำยางที่หลากหลาย สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาต่อขององค์ความรู้จากเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยอาศัยการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนด้วยวงจรถ่วงพอร์ต โดยมุ่งเน้นไปที่เทคนิคการวัด %DRC ด้วยวงจรถ่วงพอร์ตแบบหลายความถี่

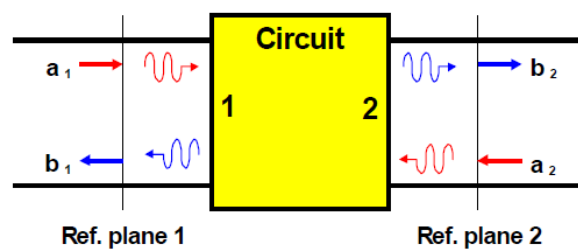
6) เทคนิควัดด้วยวงจรถ่วงพอร์ต [16]

ในหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงทฤษฎีที่สำคัญของวงจรถ่วงพอร์ต ซึ่งเทคนิคการวัดด้วยวงจรถ่วงพอร์ตถูกคิดค้นขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1977 โดยนักประดิษฐ์ Glenn F. Engen และ Cletus A. Hoer เทคนิคการวัดด้วยวงจรถ่วงพอร์ต คือ วิธีการวิเคราะห์ที่โครงข่าย เช่น การวัดพารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameters) ในกรณีที่น่ามาประยุกต์ใช้วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างเดียวจะเรียกว่า “รีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต (six-port reflectometer ;SPR)” และอีกกรณีคือนำมาวัดทั้งสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเรียกว่า “six-port network analyzer (SPNA)” ซึ่งใน

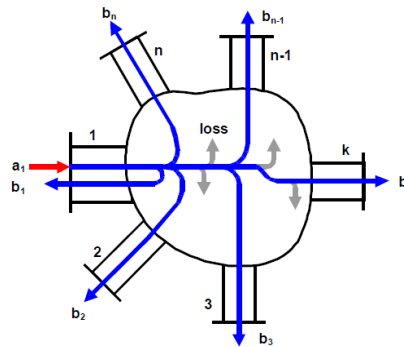
หัวข้อนี้จะอธิบายเฉพาะ SPR เพียงอย่างเดียว ก่อนทำความเข้าใจวงจรทพอร์ตผู้วิจัยขอกล่าวถึงพารามิเตอร์การกระเจิงก่อน เพราะเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานของวงจรไมโครเวฟทั้งหมด

6.1) พารามิเตอร์การกระเจิง (Scattering parameters)

ในงานด้านความถี่วิทยุและไมโครเวฟสัญญาณจะถูกอธิบายในลักษณะตัวแปรคลื่นที่มีความเชื่อมโยงถึงคลื่นที่เคลื่อนที่จริงผ่านสายส่ง โดยวงจรไมโครเวฟ 2 พอร์ต และ n พอร์ต ได้นำมาเขียนแสดงดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 วงจรไมโครเวฟสองพอร์ต [16]



รูปที่ 2.7 การกระเจิงของคลื่นตกกระทบ a ในวงจรไมโครเวฟ [16]

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 กำหนดให้คลื่นเคลื่อนเข้าหาหรือคลื่นตกกระทบที่อุปกรณ์ที่จะถูกทดสอบ (Device Under Test : DUT) ที่พอร์ต i แสดงด้วย a_i คลื่นเคลื่อนออกหรือคลื่นสะท้อนกลับที่ DUT พอร์ต i แสดงด้วย b_i โดยระนาบอ้างอิงเป็นระนาบที่นิยามตำแหน่งที่นิยามการเกิดปรากฏการณ์การรบกวนและสะท้อนกลับดังรูป สมมติให้ DUT มีการทำงานแบบเชิงเส้น ดังนั้น สา

มารอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการตกกระทบและการสะท้อนกลับด้วยพารามิเตอร์การกระเจิง หรือ เอสพารามิเตอร์ (S-parameters) แบบ n พอร์ตได้ในรูปของสมการเมทริกซ์ดังสมการที่ 2.5

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdot & \cdot & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdot & \cdot & S_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdot & \cdot & S_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

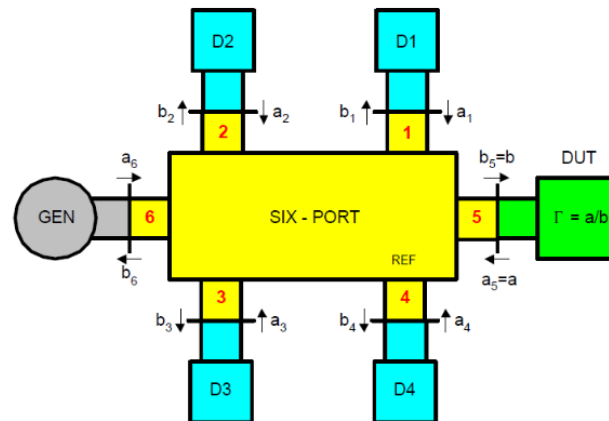
จากสมการที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ทั้งหมดระหว่างฟังก์ชันการถ่ายโอน กับ ตัวแปรคลื่นของวงจรไมโครเวฟจำนวน n พอร์ต โดยตัวแปรคลื่นที่ออกจากอุปกรณ์ หรือ ผลตอบสนอง b เกิดจากผลคูณเวกเตอร์ระหว่างพารามิเตอร์การกระเจิง กับ ตัวแปรคลื่นที่เข้าสู่อุปกรณ์ a นอกจากนี้พารามิเตอร์การกระเจิงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ค่าดังนี้ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (*Reflection coefficients*) และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (*Transmission coefficients*)

- ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน มีฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถเขียนได้เป็น $\Gamma_i = S_{ii}$ โดยผลตอบสนองคือ คลื่นที่เดินทางออกจากวงจรไมโครเวฟที่ถูกทดสอบ โดยเดินทางออกจากพอร์ตเดียวกันกับพอร์ตที่มีคลื่นตกกระทบ
- ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน มีฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถเขียนได้เป็น $t_{ji} = S_{ji}$ โดยผลตอบสนองคือ คลื่นที่เดินทางออกจากวงจรไมโครเวฟที่ถูกทดสอบ โดยเดินทางออกคนละพอร์ตกับพอร์ตที่มีคลื่นตกกระทบ

อย่างไรก็ดี ในวิทยานิพนธ์นี้ จะวิเคราะห์เฉพาะสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพียงอย่างเดียว เพราะทฤษฎีการวัดด้วยวงจรหกพอร์ตจะประยุกต์ใช้หลักการวัดกำลังงานคลื่นสะท้อนเป็นหลัก ซึ่งกล่าวถึงไปแล้วหัวข้อเทคนิคการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต และ ในหัวข้อถัดไปเป็นอธิบายหลักการวัดด้วยวงจรหกพอร์ตเบื้องต้น

6.2) รีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ตเบื้องต้น

หัวข้อนี้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรหกพอร์ตเบื้องต้น และ หลักการทำงานโดยทั่วไปของวงจรหกพอร์ต โดยโครงสร้างของวงจรหกพอร์ตขณะประยุกต์ใช้ทดสอบวัตถุเป้าหมาย (DUT) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพหลักการของรีเฟลคโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต [16]

จากรูปที่ 2.8 หลักการของรีเฟลคโตมิเตอร์หกพอร์ต กำหนดให้ต่อกับวัตถุเป้าหมายหนึ่งพอร์ต ซึ่งเป็นพอร์ตสำหรับต่อวัตถุเป้าหมายที่ต้องการทดสอบ อีกหนึ่งพอร์ตกำหนดให้ต่อกับแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ เพื่อรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่วงจรหกพอร์ตและจ่ายให้วัตถุเป้าหมายต่อไป และ พอร์ตที่เหลืออีกสี่พอร์ตต่อกับตัวตรวจจับกำลังงาน (D1-D4) ซึ่งวัตถุเป้าหมายจะเป็นตัวกำหนดสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ต่อมาสถานะของวงจรหกพอร์ตถูกกำหนดด้วยตัวแปรคลื่นเชิงซ้อน 12 ตัวแปร โดยตัวแปรทั้ง 12 ตัวถูกกำหนด โดยสัญลักษณ์ ดังนี้ a_i, b_i โดย $i = 1 \dots 6$ เนื่องจากมีหกพอร์ต ซึ่งตัวแปรคลื่นแต่ละตัวไม่เป็นอิสระต่อกันและสัมพันธ์กันด้วยพารามิเตอร์การกระเจิงของวงจรหกพอร์ต เช่น วงจรหกพอร์ตมีทฤษฎีการรวมอยู่ในผลการทำงานของวงจรเดียว หากกำหนดให้เอาพอร์ตตรวจจับออก ทำให้โหลดตัวตรวจจับมีการเพิ่มข้อจำกัดอีกสี่แบบตามสมการที่ 2.6 ดังนี้

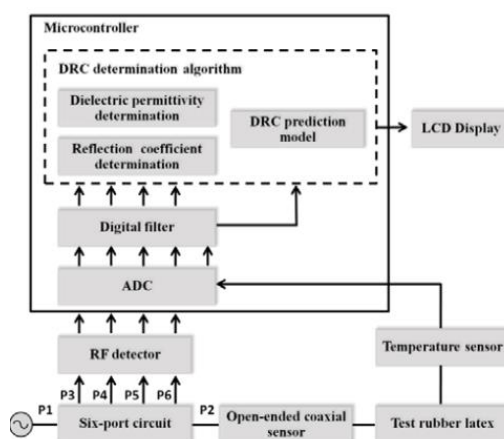
$$a_i = \Gamma_{Di} b_i, i = 1 \dots 4 \quad (2.6)$$

เมื่อ Γ_{Di} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของตัวตรวจจับกระแสเทวินิน (i-th detector) ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการใช้งานกับสมการจากตัวแปรคลื่น a_i, b_i ที่มีทั้งหมดสิบสองสมการ ทำให้ระบบมีความเป็นอิสระเพียงสองสมการเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าสามารถเลือกคลื่นได้เพียงสองคลื่นเท่านั้น ส่วนที่เหลือสามารถแสดงเป็นชุดค่าผสมเชิงเส้น (superpositions) ของทั้งสองคลื่น ดังนั้นการนำประโยชน์ของทฤษฎีวงจรหกพอร์ตไปประยุกต์ใช้ได้ เมื่อคลื่นสะท้อนขนาด $5b \equiv b$ ที่สะท้อน

จากวัตถุเป้าหมาย และคลื่นจ่ายตกกระทบ $a \equiv I b_s$ ที่ตกกระทบสู่วัตถุเป้าหมาย จะเป็นตัวแปรที่เป็นอิสระ [16] ในหัวข้อต่อไปเป็นการนำวงจรถนุภาพไปใช้วัดปริมาณ DRC

6.3) การนำวงจรถนุภาพมาใช้ในการวัดปริมาณ DRC [4,17]

หัวข้อนี้เป็นการอธิบายหลักการนำวงจรถนุภาพมาประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณ DRC โดยโครงสร้างของระบบวัดปริมาณ DRC ด้วยวงจรถนุภาพแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังการวัดปริมาณ DRC ด้วยวงจรถนุภาพ [4]

จากรูปที่ 2.9 แสดงแผนผังการวัดปริมาณ DRC ด้วยวงจรถนุภาพ จะประกอบด้วยวงจรถนุภาพ เช่น เซอร์แบบ (Open-Ended Coaxial Probe Sensor) เช่น เซอร์อุณหภูมิ ตัวตรวจจับกำลังงาน 4 ตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ จอแสดงผลแอลซีดีในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปจะต้องพิจารณาถึงสัญญาณรบกวนสองประเภทคือสัญญาณรบกวนเชิงระบบ (Systematic noise) และสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (Random noise) ซึ่งสัญญาณรบกวนแบบสุ่มสามารถกำจัดได้โดยวงจรถนุภาพที่ต่ำผ่านหรือใช้วงจรถนุภาพที่ต่ำผ่านแบบดิจิทัลในไมโครคอนโทรลเลอร์ในการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มส่วนสัญญาณรบกวนสมมาตรสามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการสอบเทียบอัลกอริทึม (Calibration algorithm) สำหรับการสอบเทียบวงจรถนุภาพมีจุดประสงค์ของการสอบเทียบวงจรถนุภาพคือกำจัดข้อผิดพลาดแบบสมมาตรทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบ เช่น วงจรถนุภาพ ตัวตรวจจับสัญญาณ RF ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และอื่นๆ

เมื่อกล่าวถึงการวัด %DRC ด้วยวิธีการทางตรง และ ทางอ้อมแล้วเสร็จ ต่อไปเป็นการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธีการที่นำเสนอ โดยผู้วิจัยได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการ

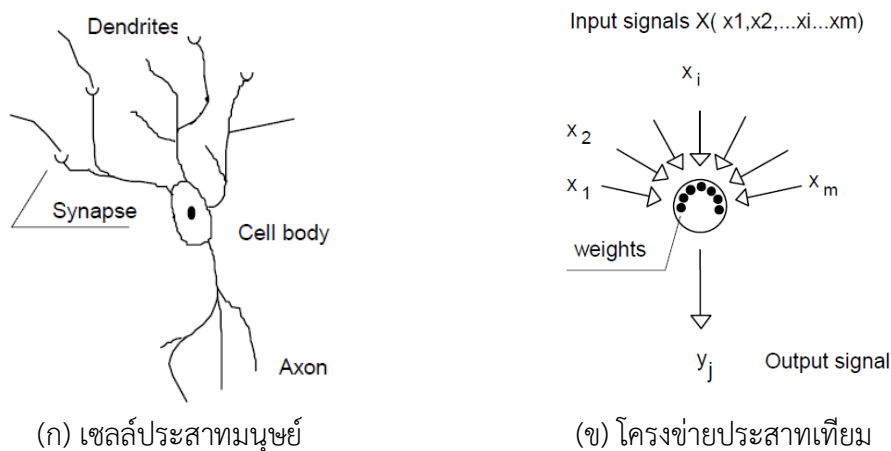
วิธีการ	ชื่อวิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
ทางตรง	วิธีการมาตรฐานในการวัดปริมาณ DRC โดยการอบด้วยเตาอบหมุ่นเวียนอากาศ (มาตรฐาน)	1.ความแม่นยำในการวัดสูงที่สุด	1.ทำลายตัวอย่างน้ำยาง 2.ใช้เวลานานเกิน 6 ชั่วโมง 3.ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น
	วิธีการหาปริมาณ DRC โดยการอบด้วยเตาไมโครเวฟ	1.ความแม่นยำสูง และ เป็นที่นิยม 2.ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีมาตรฐาน	1.ทำลายตัวอย่างน้ำยาง 2.อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ และ ใช้พลังงานไฟฟ้าสูง
ทางอ้อม	เทคนิคการวัดความหนาแน่น	1.ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 2.วัดได้แบบทันที	1.ความผิดพลาดสูง 5-10%
	เทคนิคการวัดด้วยแสง	1.ขนาดอุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาได้ง่าย 2.วัดได้แบบทันที	1.มุมและระยะของตัวส่งและรับแสงมีผลต่อการวัดสูง 2.ต้องควบคุมอุณหภูมิระบบ
	เทคนิคการหาปริมาณยางแห้งด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	1.อุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาได้ง่าย 2.วัดได้แบบทันที	1.อาศัยแหล่งจ่ายความถี่จากภายนอก 2.อาศัยออสซิลโลสโคปวัดผล
	เทคนิคการวัดค่าความจุไฟฟ้า	1.อุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาได้ง่าย 2.วัดได้แบบทันที	1.ผลวัดไม่แน่นอน (ความสามารถในการอ่านซ้ำต่ำ)
	เทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	1.วัดได้แบบทันที	1.อาศัยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายอัตโนมัติ 2.ที่ความถี่ต่ำได้รับผลกระทบจากส่วนที่ไม่ใช่ยาง
	เทคนิคการวัดด้วยวงจรรหัสพอร์ต	1.วัดได้แบบทันที 2.อุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาได้ง่าย 3. ราคาถูก 4. ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ	1.ผลการวัดต้องวิเคราะห์จากค่ากำลังงานที่พอร์ตทั้ง 4 พอร์ต ทำให้แบบจำลองทำนาย %DRC มีความซับซ้อนสูง

2.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบโครงข่ายประสาทเทียม [18,19]

2.3.1 ความรู้เกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม

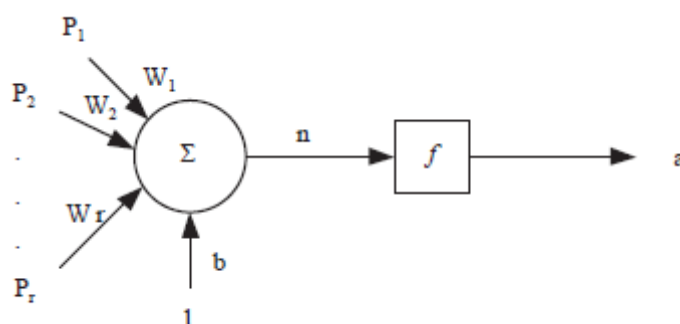
โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของการศึกษาด้านปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานหลายด้านอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การจำแนกรูปแบบ การทำนาย การควบคุม การหาความเหมาะสม การประมาณค่าฟังก์ชัน และการจัดกลุ่ม เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC จึงมุ่งเน้นไปในส่วนของการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับงานด้านการประมาณค่าฟังก์ชัน เป็นหลัก เนื่องจากงานวิจัยเป็นการวิเคราะห์ค่า %DRC ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรทพอร์ตจำนวน 4 ค่า ซึ่งทั้ง 4 ค่าเป็นค่าที่ได้ขณะนำวงจรทพอร์ตไปวัดน้ำยารุ่นเจือจางที่มีค่า %DRC ต่างกัน

โดยหัวใจสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม คือ การพยายามเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทของมนุษย์ เพื่อให้การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสมองของมนุษย์ สำหรับลักษณะทั่วไปของโครงข่ายประสาทเทียม คือ การที่มีโนนด (Node) ต่าง ๆ จำลองมาจากไซแนป (Synapse) ของเซลล์ประสาท โดยอยู่ระหว่างเดนไดรต์ (Dendrite) และแอกซอน (Axon) ภายในโนนดจะมีฟังก์ชันเป็นตัวกำหนดสัญญาณส่งออก ที่เรียกว่า Activation function หรือ Transfer function โดยสามารถเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเซลล์ประสาทมนุษย์กับโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบเซลล์ประสาทมนุษย์กับโครงข่ายประสาทเทียม [20]

จากรูปที่ 2.10 โครงข่ายประสาทเทียมจากรูปที่ 2.10x สัญญาณอินพุต X ทำหน้าที่เหมือนเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทมนุษย์ คือ ทำหน้าที่รับข้อมูลเข้ามาประมวลผลภายในเซลล์ประสาท สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม คือ ภายในโหนด และ สำหรับข้อมูลที่ได้ประมวลผลแล้วจะถูกส่งออกเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่เปรียบเหมือนการส่งออกสัญญาณจากแอกซอนของเซลล์ประสาทมนุษย์ เพื่อขยายความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียมจึงมีการสร้างแบบจำลองเซลล์ประสาทสำหรับอธิบายองค์ประกอบโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แบบจำลองเซลล์ประสาทสำหรับอธิบายโครงข่ายประสาทเทียม [19]

จากรูปที่ 2.11 หากนำมาพิจารณาจะพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ซึ่งอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1) ข้อมูลป้อนเข้า (Input) คือ ชุดข้อมูลที่นำเข้าโครงข่ายประสาทเทียม และ ต้องเป็นข้อมูลประเภทตัวเลข หากเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ จะต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปเชิงปริมาณที่โครงข่ายประสาทเทียมสามารถยอมรับได้

2) ข้อมูลส่งออก (Output) คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง (Actual output) จากกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

3) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights) คือ สิ่งที่ได้จากการเรียนรู้ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม หรือ เรียกอีกอย่างว่า “ค่าความรู้ (Knowledge)” ซึ่งค่านี้จะถูกเก็บเป็นทักษะ เพื่อนำมาใช้ในการจดจำข้อมูลอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปแบบเดียวกัน

4) ฟังก์ชันการรวม (Summation Function, s) คือ ฟังก์ชันที่เป็นผลรวมของข้อมูลป้อน

5) ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลง (Transfer function) คือ ฟังก์ชันการคำนวณการจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม เช่น ซิกมอยด์ (Sigmoid Function) ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent Function) เป็นต้น

จากรูปที่ 2.11 แบบจำลองเซลล์ประสาทสำหรับอธิบายโครงข่ายประสาทเทียมที่จำลองขึ้นมา มีหลักการ คือ การนำเอาข้อมูลป้อนเข้า (p) คูณด้วยค่าน้ำหนัก (w) จากนั้นนำมารวมกับผลคูณของไบแอส ($Bias, b$) กับตัวแปรต้นของไบแอส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 จะได้สมการที่ 2.7

$$n = wp + b \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 n คือ ตัวแปรต้นสุทธิ (Net Input) และ ค่าตัวแปรตามของเซลล์ประสาทเทียม (Neural Output, a) มีค่าเท่ากับ

$$a = f(wp + b) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 กำหนดให้ f คือฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปเซลล์ประสาทเทียมมีข้อมูลป้อนเข้า หรือ ตัวแปรต้น ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ตัวแปร ที่ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11 ดังนั้นสมการของเซลล์ประสาทเทียมต้องรวมเอาอินพุตทั้งหมดมาพิจารณาพร้อมกัน ทำให้ได้สมการตัวแปรต้นสุทธิ และ ตัวแปรตามของเซลล์ประสาทเทียมเป็นไปตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

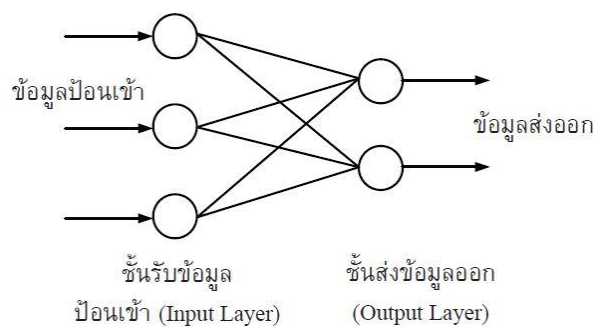
$$n = \sum(wp + b) \quad (2.9)$$

$$a = f(\sum(wp + b)) \quad (2.10)$$

2.3.2 ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม

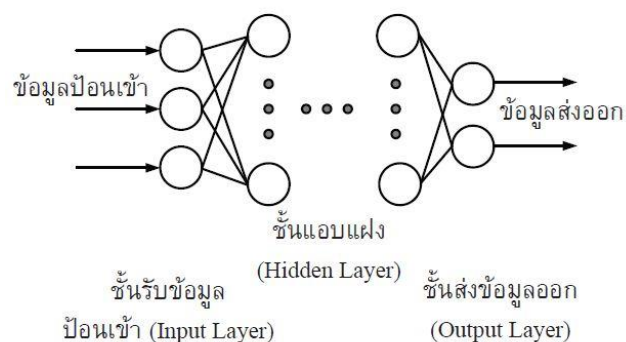
โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ประสาทเทียม หรือ โหนด เป็นจำนวนมาก และมีการเชื่อมต่อกัน โดยการเชื่อมต่อนี้จะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย เรียกว่า “ชั้น (Layer)” ชั้นแรกเป็น ชั้นนำเข้าข้อมูล (Input Layer) และ ชั้นสุดท้าย เรียกว่า ชั้นส่งข้อมูลออก (Output Layer) ส่วนชั้นที่อยู่ระหว่าง ชั้นนำเข้าข้อมูล และ ชั้นส่งข้อมูลออก คือ ชั้นแอบแฝง (Hidden Layer) โดยทั่วไปชั้นแอบแฝงอาจมีจำนวนมากกว่าหนึ่งชั้นก็ได้ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามลักษณะของโครงข่ายได้เป็น 2 แบบ คือ โครงข่ายแบบชั้นเดียว (Single Layer) และ โครงข่ายแบบหลายชั้น (Multi Layer)

1) โครงข่ายแบบชั้นเดียว เป็นโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย มีเพียงชั้นรับข้อมูล และ ชั้นส่งข้อมูลออก เท่านั้น โดยโหนดในชั้นรับข้อมูลทำหน้าที่รับข้อมูลเข้าแล้วส่งข้อมูลผ่านเส้นเชื่อมโยงต่าง ๆ ไปสู่โหนดชั้นส่งข้อมูลออก และ โหนดในชั้นส่งข้อมูลออกจะทำหน้าที่นำข้อมูลที่ได้รับมาคำนวณด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสมกับปัญหา แล้วจึงทำการส่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นข้อมูลส่งออก สำหรับโครงสร้างของโครงข่ายแบบชั้นเดียวแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงข่ายแบบชั้นเดียว [19]

2) โครงข่ายแบบหลายชั้น เป็นโครงข่ายที่มีชั้นแอบแฝงตั้งแต่หนึ่งชั้นขึ้นไป อยู่ระหว่างชั้นรับข้อมูลกับชั้นส่งข้อมูลออก ซึ่งโครงข่ายแบบหลายชั้นนี้จะใช้สำหรับแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนที่โครงข่ายแบบชั้นเดียวไม่สามารถแก้ได้ จึงต้องทำการเพิ่มจำนวนโหนดที่มีการคำนวณ หรือ ชั้นแอบแฝงให้กับโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับโครงสร้างของโครงข่ายแบบหลายชั้นแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงข่ายแบบหลายชั้น [19]

2.3.3 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบการเรียนรู้

1) การเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised Learning)

เป็นการเรียนรู้แบบที่มีการตรวจสอบคำตอบเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมปรับตัว ชุดข้อมูลที่ใช้ในการสอนโครงข่ายจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่ หากไม่ถูกต้องตัวโครงข่ายประสาทเทียมจะปรับพารามิเตอร์ภายในเพื่อให้ได้คำตอบที่ตรงมากขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบกับนักเรียนในชั้นเรียนที่มีอาจารย์เป็นผู้สอนที่คอยให้คำแนะนำ

2) การเรียนรู้แบบไม่มีการสอน (Unsupervised Learning)

เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน จะไม่มีการตรวจสอบคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมว่าถูกหรือผิด โครงข่ายประสาทเทียมจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้ เปรียบเหมือนคน เช่น เราสามารถแยกแยะพันธุ์ของพืชและสัตว์ได้ตามลักษณะรูปร่างของมัน โดยที่ไม่ต้องมีผู้สอน

3) การเรียนรู้แบบถูกบังคับ (Reinforcement Learning)

เป็นการเรียนรู้วิธีหนึ่งที่ว่าแม้ว่ามีครูคอยให้คำแนะนำในการทำงานอยู่แล้วก็ตาม แต่คำตอบที่ถูกต้องหรือเป้าหมายไม่ได้ถูกนำมาแสดงในโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้นผลการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียมจึงแสดงออกมาในรูปถูกหรือผิด โครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องใช้ประโยชน์จากข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้น ถ้าหากผลการคำนวณถูกต้อง โครงข่ายประสาทเทียมจะได้รับรางวัล (Reward) ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลป้อนเข้าบางหน่วย ในทางกลับกันหากผลการคำนวณผิด โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกลงโทษ (Penalty) โดยลดค่าถ่วงน้ำหนัก

2.3.4 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถที่จะจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่ซับซ้อนโดยอาศัยข้อมูลที่ป้อนให้เรียนรู้ การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นทางเลือกใหม่ในการควบคุม นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภทดังต่อไปนี้

- 1) งานจัดหมวดหมู่และแยกแยะสิ่งของ เช่น การแยกสินค้าที่เสียออกจากสินค้าที่ดี
- 2) งานทำนาย หรือ พยากรณ์ เช่น การพยากรณ์หุ้น
- 3) งานการประมาณค่าฟังก์ชัน หรือ การประมาณค่าความสัมพันธ์ เป็นงานที่ทราบค่าตัวแปรต้น และ ตัวแปรตาม แต่ไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร เช่น การหาความสัมพันธ์ของค่าเงินบาทกับราคาทองคำในตลาด สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาท

เทียบกับงานประเภทนี้ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น คือ ค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 4 ค่าที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรถูกพอร์ต กับ ตัวแปรตาม คือ ค่า %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจาง

4) งานควบคุมที่สิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เช่น ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการควบคุมปรับอากาศห้องที่มีคนเข้าออกพลุกพล่าน

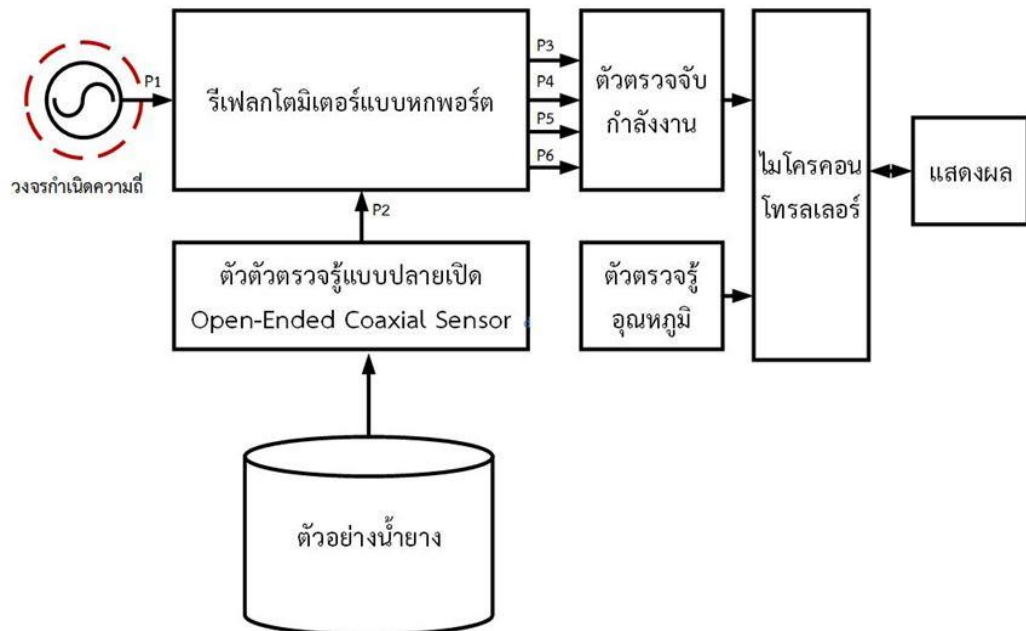
5) งานจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน เช่น ลายมือ ลายเซ็น ตัวอักษร ใบหน้า เป็นต้น

2.3.5 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม MATLAB สำหรับทำนาย %DRC [21]

ในส่วนของการทำงาน %DRC ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ผู้วิจัยจะพัฒนาแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้เครื่องมือ Neural Net Fitting (nftool) ซึ่งตัวเครื่องมือได้รวมเอาฟังก์ชันในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตที่เหมาะสมไว้เพื่อปรับข้อมูลให้พอดีกับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีเลเยอร์น้อย (Fit Data with a shallow neural network) ในกรณีนี้ แอต์พุตที่ทำนายจากโครงข่ายประสาทเทียม (ค่า %DRC) จะทำนายจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีชุดข้อมูลป้อนเข้าที่ได้มาจากการทดลองเก็บข้อมูลด้วยวงจรถูกพอร์ตในงานวิจัยนี้มีชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเจือจางทั้งหมด 24,300 ชุดข้อมูล ซึ่งในหนึ่งชุดข้อมูลจะได้ค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง P3-P6 จำนวน 4 ค่า โดยเข้าเหล่านี้ที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเจือจางมีความสัมพันธ์กับ %DRC ของน้ำยาง ซึ่งสามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายได้

ในโปรแกรม MATLAB เราสามารถใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมได้ 2 วิธี คือ การใช้งานผ่านฟังก์ชันคำสั่ง (Fit Data Using Command-Line Functions) และ การใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน *Neural Net Fitting App* (Fit Data Using the Neural Net Fitting App) สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกการใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน *Neural Net Fitting App* เนื่องจากเข้าถึงได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ยังสามารถแปลงจากแอปพลิเคชันมาเป็นแบบการใช้งานผ่านคำสั่งก็ได้ในภายหลังสำหรับการกำหนดค่า และ ขั้นตอนการสร้าง เพื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนาย %DRC จะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

2.4 สรุปรูปแนวความคิดงานวิจัย



รูปที่ 2.14 ระบบการวัดด้วยรีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต

จากรูปที่ 2.14 ในการวิจัยผู้วิจัยได้ศึกษาและทดลองวงจรถ่ายความถี่ โดยใช้วงจรถ่าย ADF4351 เป็นวงจรถ่ายความถี่ และปรับความถี่ในช่วงความถี่ 1 GHz ถึง 3 GHz โดยเพิ่มความถี่ครั้งละ 500 MHz

ส่วนของตัวอย่างน้ำยาง ผู้วิจัยได้เจือจางโดยอาศัยน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายน้ำยางขึ้นให้ได้ปริมาณ DRC ตามที่ต้องการ การเตรียมจะใช้ร้อยละโดยปริมาตร (%V/V) กล่าวคือ หากต้องการน้ำยางที่ 30 %DRC ให้ทำการผสมน้ำยางขึ้น 60% ปริมาณ 100 ml กับน้ำกลั่น 100 ml ก็จะได้ตัวอย่างน้ำยางที่ 30 %DRC เป็นต้น

ในส่วนการทำงานของรีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ตจะเริ่มจากวงจรถ่ายความถี่จ่ายความถี่ผ่าน P1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นพอร์ตรับอินพุตความถี่ของรีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต จากนั้นส่งผ่านคลื่นไปที่ตัวตรวจรู้แบบปลายเปิดผ่าน P2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นพอร์ตสำหรับส่งคลื่นไมโครเวฟไปสู่ตัวตรวจรู้ปลายเปิดเพื่อส่งคลื่นไปตกกระทบลงบนตัวอย่างน้ำยาง และรับเอาคลื่นสะท้อนจากตัวอย่างน้ำยาง หรือ ค่ากำลังงานสะท้อนกลับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ของตัวอย่างน้ำยางและสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ DRC ของน้ำยาง เมื่อได้กำลังงานสะท้อนกลับจากรีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ตที่ P3-P6 ซึ่งทั้ง 4

พอร์ตทำหน้าที่เป็นพอร์ตสำหรับรับกำลังงานสะท้อนกลับของน้ำยาง ทั้ง 4 พอร์ตต่ออยู่กับตัวตรวจจับกำลังงาน โดยตัวตรวจจับกำลังงานจะทำหน้าที่แปลงกำลังงานเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วส่งค่าสัญญาณที่ผ่านการแปลงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้สำหรับการประมวลผล และสร้างโมเดลเพื่อหาปริมาณ DRC ในน้ำยางและแสดงผลต่อไปในท้ายที่สุด

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC จะปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC สำหรับเทคนิคการวัด %DRC จากเดิมอาศัยชุดข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC จากข้อมูลกำลังงานคลื่นสะท้อนความถี่เดียวเป็นชุดข้อมูลกำลังงานคลื่นสะท้อนหลายความถี่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ 3 ค่าความถี่ จึงทำให้งานวิจัยมีชุดข้อมูลมากขึ้นกว่าเดิมถึง 3 เท่า ประกอบกับการใช้วิธีการสร้างแบบจำลองด้วยการสอนโครงข่ายที่เป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลขนาดใหญ่ให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากปัจจัยแวดล้อมภายนอกเช่น อุณหภูมิ ได้

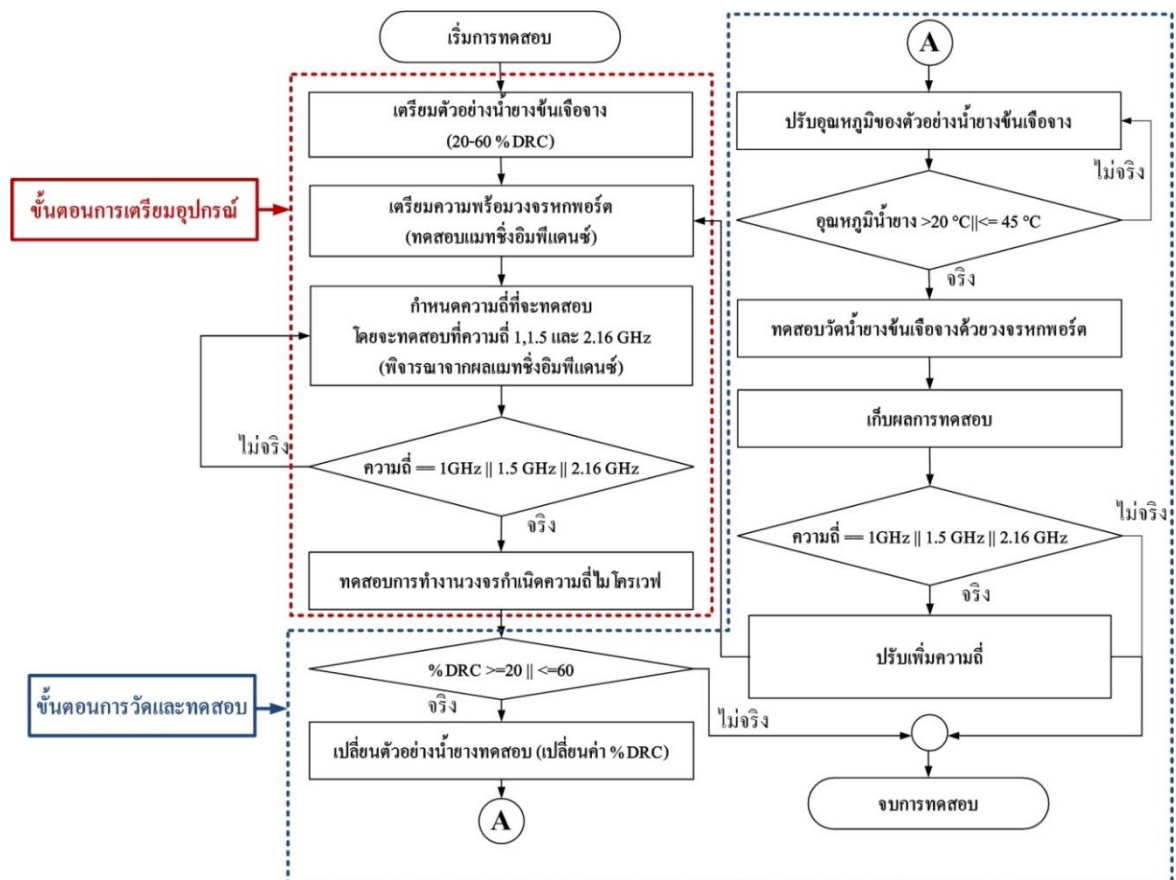
บทที่ 3

ขั้นตอนการทดสอบ และ เก็บข้อมูล

หัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการทดสอบ และ เก็บข้อมูล ประกอบด้วย การอธิบาย ขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ ขั้นตอนการวัดและทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ และ ผลการทดสอบที่ได้

3.1 อธิบายขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด โดยเรียงลำดับจากขั้นตอนที่ต้องดำเนินการก่อนไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ พร้อมเหตุผลประกอบ และ รายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละขั้นตอนรวมถึงผลการทดสอบที่ใช้สำหรับการยืนยันความน่าเชื่อถือของงาน สำหรับขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังงานขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดในภาพรวม

จากรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดในภาพรวม ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ และ ขั้นตอนการวัดและทดสอบ

โดยผู้วิจัยเริ่มอธิบายจากขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ จากผังงานรูปที่ 3.1 เริ่มการทดสอบด้วยการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง ซึ่งเป็นการเจือจางน้ำยางชั้นมาตรฐานที่มีค่า DRC 60 % ด้วยน้ำกลั่นโดยใช้สูตรร้อยละโดยปริมาตร และ เมื่อได้ตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่มีค่า %DRC ตามต้องการแล้ว จากรูปผังงาน ขั้นตอนถัดไป จะเตรียมวงจรหกพอร์ตโดยจะต้องปรับแต่งวงจรแมทซ์ที่พอร์ตวัดน้ำยางของวงจรหกพอร์ตที่ความถี่ที่จะทดสอบ ในการทดสอบ จะปล่อยสัญญาณความถี่ไมโครเวฟจากวงจรกำเนิดความถี่ ADF 4351 ที่ความถี่นั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz ให้กับวงจรหกพอร์ต เมื่อถึงขั้นตอนนี้จากรูปผังงานรูปที่ 3.1 ถือว่าจบขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์

จากผังงานรูปที่ 3.1 เริ่มขั้นตอนวัดและทดสอบ โดยเริ่มจากกำหนดค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่ต้องการทดสอบ กำหนด DRC ที่จะทดสอบอยู่ในช่วง 20 – 60 %DRC จากนั้นนำตัวอย่างน้ำยางมาปรับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20 – 45 °C โดยระหว่างการทดลองจะควบคุมตัวแปรอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ เมื่อได้ตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่มีค่าตามที่ต้องการวัด ต่อมา จากผังงานจะดำเนินการ ทดสอบวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรหกพอร์ต และ ดำเนินการเก็บผลการวัด ซึ่งเป็นค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรหกพอร์ตจำนวน 4 ค่า คือ P3, P4, P5 และ P6 โดยค่าเหล่านี้เปลี่ยนแปลงตาม %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจางที่ทำการทดสอบ เมื่อวัดเสร็จ ต่อมาเป็นการบันทึกผลทดสอบในรูปของไฟล์ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการพัฒนาระบบจำลอง จากรูปผังงานเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการเก็บผลการทดสอบ การเก็บข้อมูลตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรหกพอร์ตจะวนซ้ำครบทั้ง 3 ความถี่ โดยทุกครั้งที่เปลี่ยนความถี่ จะต้องปรับแมทซ์อิมพีแดนซ์ทุกครั้งก่อนจะวัดกำลังงานสะท้อนกลับเสมอ

เมื่อได้ค่ากำลังงานสะท้อนจากวงจรหกพอร์ต ค่ากำลังงานจะถูกแปลงด้วยตัวตรวจจับกำลังงานให้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขนาด 16 บิต ของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือ และ มีการปรับความถี่ไมโครเวฟที่จ่ายให้วงจรหกพอร์ต 3 ค่า ตามเงื่อนไขการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำชุดข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC ต่อไปในบทที่ 4

3.2 ขั้นตอนการเตรียมการ

ในหัวข้อนี้ประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง ขั้นตอนการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ต และ การกำหนดความถี่ที่จะใช้ในการทดสอบและเหตุผล

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง

หัวข้อนี้เป็นการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง เพื่อใช้เป็นตัวอย่างน้ำยางสำหรับทดสอบ โดยผู้วิจัยเตรียมจากน้ำยางชั้นที่ 60 %DRC นำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ค่า %DRC ที่หลากหลาย เมื่อได้ค่า %DRC ตามต้องการแล้วต่อมา คือ ขั้นตอนการแมทชิงอิมพีแดนซ์วงจรถหพอร์ต และทดสอบวัดน้ำยางตามลำดับ สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ กำหนดค่า %DRC เป็น 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 %DRC ซึ่งผู้วิจัยใช้สูตรในการเตรียมน้ำยางชั้นเจือจางด้วยสูตรร้อยละโดยปริมาตร โดยมีสูตรในการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางตามสมการที่ 3.1

$$V_c = \frac{(\%DRC \cdot V_{Total})}{60} \quad (3.1)$$

สำหรับค่า %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจางที่ได้จากสูตรตามสมการที่ 3.1 เป็นค่าของ %DRC ก่อนวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรถหพอร์ต ผู้วิจัยทราบ %DRC ที่แท้จริงจากสูตร และจะยืนยันค่าด้วยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ โดยผู้วิจัยจะอบตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่มีการเตรียมด้วยอัตราส่วนปริมาตรเดียวกัน 3 ครั้ง จากนั้นหาค่าสัมบูรณ์ความผิดพลาดของสูตรสำหรับเตรียมน้ำยางชั้นเจือจางด้วยการหาผลต่างระหว่าง %DRC ที่ต้องการกับ %DRC เฉลี่ยที่ได้จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟ 3 ครั้งต่อ 1 ค่า %DRC และ สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับค่า %DRC ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง แสดงดังตารางที่ 3.1

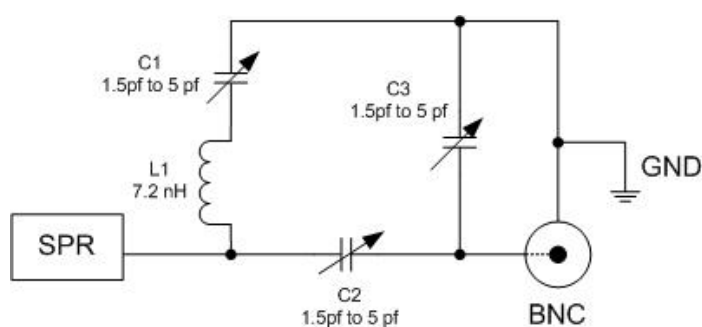
ตารางที่ 3.1 ค่า %DRC ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง

%DRC ที่ต้องการ	ปริมาตร น้ำยางชั้น (ml)	ปริมาตร น้ำกลั่น (ml)	%DRC ที่ได้จาก การอบด้วยเตาอบไมโครเวฟ			%DRC เฉลี่ย (%DRC)	ค่าสัมบูรณ์ ความ ผิดพลาด (%DRC)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
20	67	133	20.33	19.33	19.33	19.66	0.34
25	83	117	25.33	24.33	25.00	24.87	0.13
30	100	100	30.67	30.33	30.00	30.33	0.33
35	117	83	35.00	33.67	34.33	34.33	0.67
40	133	67	40.00	39.67	40.33	40.00	0
45	150	50	45.67	44.33	45.33	45.11	0.11
50	167	33	50.33	49.67	51.00	50.33	0.33
55	183	17	55.67	54.33	56.33	55.44	0.44
60	200	0	61.67	60.33	60.67	60.89	0.89
เฉลี่ย							0.36

จากตารางที่ 3.1 พบว่าค่า %DRC จากการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางตามสมการที่ 3.1 ให้ค่าที่ %DRC ที่ใกล้เคียงกับค่า %DRC ที่ต้องการ โดยพบว่าค่า %DRC ที่ผิดพลาดเพียงสูงสุดจากการเจือจางน้ำยางชั้นด้วยน้ำกลั่น เกิดขึ้นที่ 35%DRC โดยมีค่าสัมบูรณ์ความผิดพลาดเป็น 0.67 %DRC นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำยางชั้น 60%DRC ที่ไม่ได้เจือจางด้วยน้ำกลั่นมีค่าสัมบูรณ์ความผิดพลาดสูงถึง 0.89%DRC และ จากตารางที่ 3.1 พบว่าในภาพรวมวิธีการเตรียมสารด้วยสมการ 3.1 ให้ค่าสัมบูรณ์ความผิดพลาดเฉลี่ยเพียง 0.36 %DRC เนื่องจากค่าสัมบูรณ์ข้างต้นสูงไม่เกิน 0.5 %DRC ซึ่งหมายถึงน้ำยางชั้นเจือจางตามสูตรมีความผิดพลาดต่ำ ประกอบกับตอนสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า %DRC จากการอบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นค่าหลักในการพิจารณา จึงถือว่าสมการที่ 3.1 สามารถนำมาใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง เพื่อนำมาวัด และ ทดสอบน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรถนทพอร์ทได้

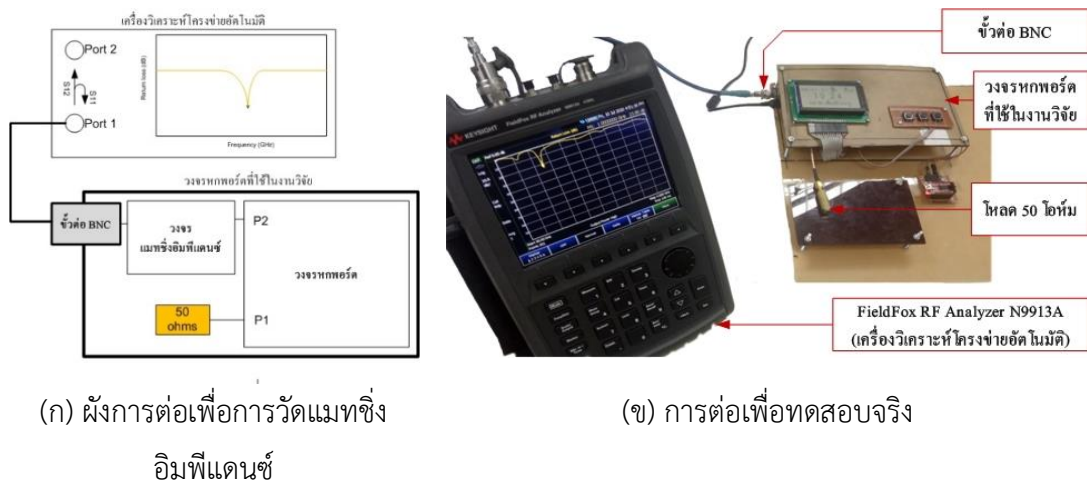
3.2.2 การแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ต

การแมทซ์อิมพีแดนซ์เป็นขั้นตอนที่ต้องดำเนินการทุกครั้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้จ่ายให้วงจรหกพอร์ต เนื่องจากวงจรหกพอร์ตเดิมถูกออกแบบให้ทำงานที่ 1 GHz และเพื่อให้สามารถทดสอบได้ในช่วง 1-3 GHz จึงต้องเพิ่มวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างพอร์ต P2 ของวงจรหกพอร์ตกับขั้วต่อ BNC ที่ต่อกับโพรบปลายเปิด วงจรที่ผู้วิจัยใช้ คือ วงจรแมทซ์โครงข่ายแบบพายดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์แบบพาย

จากรูปที่ 3.2 ผลการทดสอบที่ได้ของการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ต คือการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ระหว่างวงจรหกพอร์ตกับโพรบปลายเปิดขณะป้อนคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ต่าง ๆ ตกกระทบตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจาง ซึ่งมีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกความถี่ไมโครเวฟสำหรับนำมาเป็นแหล่งกำเนิดให้วงจรหกพอร์ตเพื่อวัดและทดสอบน้ำยางชั้นเจลจางสำหรับการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ตทำได้โดยอาศัยโหลด 50 โอห์ม ต่อเข้าที่ขั้ว P1 ของวงจรหกพอร์ต เพื่อแทนค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ และต่อเครื่องวัดสเปกตรัมอนาล็อกเซอร์เข้ากับขั้ว P2 โดยมีผังการต่อแสดงดังรูปที่ 3.2

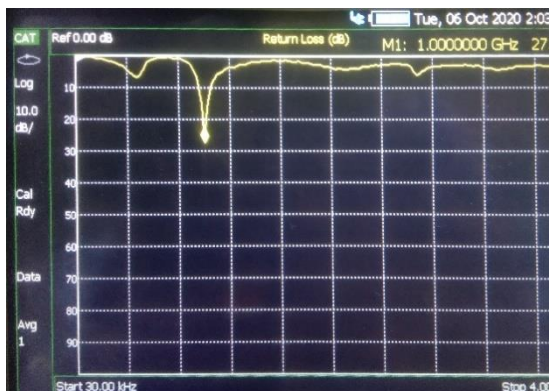


รูปที่ 3.3 การต่อเพื่อแมทซิ่งอิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ดด้วยโหลด 50 โอห์ม

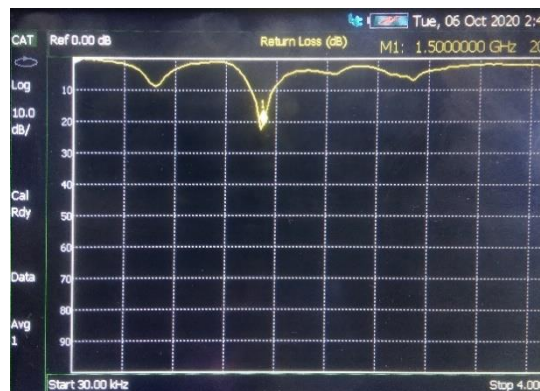
จากรูปที่ 3.3 ผลการวัดค่าการแมทซิ่งอิมพีแดนซ์วงจรหกพอร์ดแสดงเป็นค่า Return loss (RL) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ (Network Analyzer) ในงานวิจัยนี้ใช้ FieldFox RF Analyzer N9913A ในโหมด CAT (CAT/vector network analysis) โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.4 สำหรับการทดสอบผู้วิจัยออกแบบให้ใช้ค่าความถี่เริ่มต้นที่ 1 GHz และเพิ่มครั้งละ 500 MHz เพราะวงจรหกพอร์ดเดิมออกแบบใช้งานที่ความถี่ 1 GHz โดยผลการแมทซิ่งหลังจากปรับวงจรแมทซิ่งแล้วที่ความถี่ 1, 1.5, 2 และ 2.16 GHz แสดงดังตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 ค่า Return loss ณ ความถี่ต่าง ๆ ขณะวัดการแมทซิ่งอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ

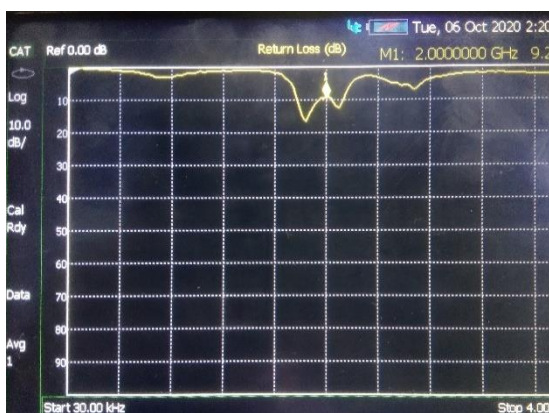
ความถี่ (GHz)	ค่า Return loss (dB)
1.00	27.36
1.50	20.78
2.00	9.24
2.16	31.63



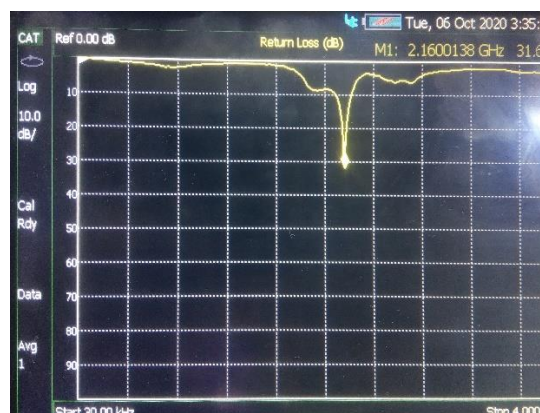
(ก) ความถี่ 1 GHz



(ข) ความถี่ 1.5 GHz



(ค) ความถี่ 2 GHz



(ง) ความถี่ 2.16 GHz

รูปที่ 3.4 ผลการวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรถูกพอร์ต ณ ความถี่ต่าง ๆ

จากตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.4 (ก)-(ง) แสดงผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรถูกพอร์ตกับแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ต่าง ๆ โดยประกอบด้วยผลการวัดค่า Return loss ของวงจรถูกพอร์ต เมื่อทำการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 1, 1.5, 2 และ 2.16 GHz

จากการแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรถูกพอร์ตพบว่า ความถี่ไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับช่วยให้วงจรถูกพอร์ต เพื่อวัดและทดสอบน้ำยาขุ่นเจือจางที่ค่า %DRC ต่าง ๆ ด้วยวงจรถูกพอร์ต ประกอบด้วยค่าความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz เพราะเป็นความถี่ไมโครเวฟที่วงจรถูกพอร์ตสามารถแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรถูกพอร์ตกับแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟได้ตามเกณฑ์ที่ผู้วิจัยกำหนด โดยมีค่าเป็น 27.36 dB, 20.78 dB และ 31.63 dB ตามลำดับ นั้นหมายถึงคลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถเดินทางจากแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟผ่านวงจรถูกพอร์ตและวงจรมแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยมีกำลังงานสะท้อนกลับสู่แหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟที่ต่ำ และเป็นการส่งผ่านกำลัง

งานที่ดี ณ ความถี่นั้น และเนื่องจากกราฟมีลักษณะชี้ลง และแสดงผลเป็นเลขเต็มบวก ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนด Return loss ขณะแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมต้องมากกว่า 20 dB

นอกจากนี้พบว่าที่ความถี่ 2 GHz ไม่เหมาะเพราะค่า Return loss ขณะแมทซ์อิมพีแดนซ์เพียง 9.24 dB

3.2.3 การกำหนดความถี่ที่ใช้ในการทดสอบและเหตุผล

จากผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ ผู้วิจัยสามารถกำหนดความถี่ไมโครเวฟที่จะป้อนให้กับวงจรทพอร์ต เพื่อวัดและทดสอบน้ำยาข้างขึ้นเจือจาง โดยเลือกความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 1,1.5 และ 2.16 GHz เนื่องจากที่ความถี่ดังกล่าววงจรทพอร์ตสามารถแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยให้ค่า Return loss ตามมาตรฐานสำหรับงานวิจัยที่ผู้วิจัยกำหนด ส่วนหัวข้อนี้เป็นการทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟตามค่าที่กำหนดด้วยวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351

1) แนะนำวงจรกำเนิดความถี่ไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติของวงจรกำเนิดความถี่ที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติสำคัญของวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 ที่ถูกนำมาพิจารณา

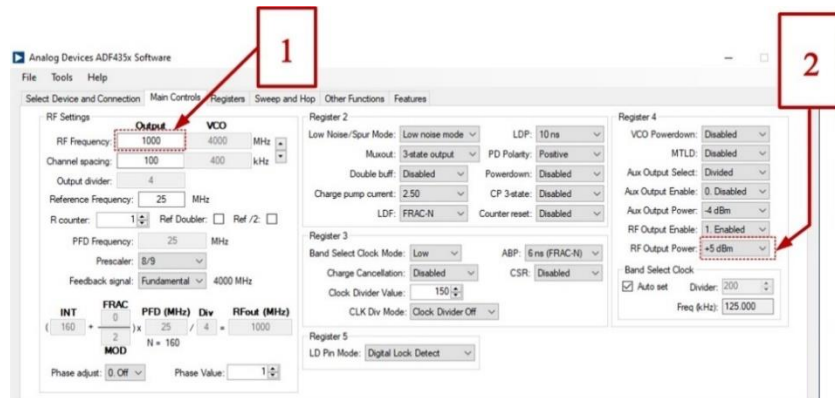
คุณสมบัติ	พารามิเตอร์
ความถี่ที่กำเนิดได้	35 MHz – 4400 MHz
สามารถกำหนดความถี่ผ่านโปรแกรมได้	ผ่านโปรแกรม ADF435x

ที่มา...<https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adf4351.html#eb-overview>

จากตารางที่ 3.3 พบว่าวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 สามารถกำเนิดความถี่ได้ตั้งแต่ 35 MHz – 4400 MHz โดยช่วงความถี่นี้ครอบคลุมสมมุติฐานของงานวิจัยที่กำหนดให้ทดสอบที่ความถี่ 1 GHz - 3 GHz นอกจากนี้สามารถกำหนดความถี่ผ่านโปรแกรม ซึ่งสะดวกในการนำมาประยุกต์ใช้งาน

2) การกำเนิดความถี่ไมโครเวฟด้วยโปรแกรม ADF435x

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงตำแหน่งในหน้าโปรแกรม ADF435x ที่ผู้วิจัยกำหนดค่า เพื่อกำหนดการกำเนิดความถี่จากวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 โดยผู้วิจัยกำหนดให้ค่าความถี่เป็น 1 GHz, 1500 GHz และ 2160 GHz และทั้ง 3 ค่าความถี่กำหนดค่ากำลังงานเอาต์พุตเป็น +5 dBm โดยการตั้งค่าในโปรแกรม ADF435x แสดงดังรูปที่ 3.5

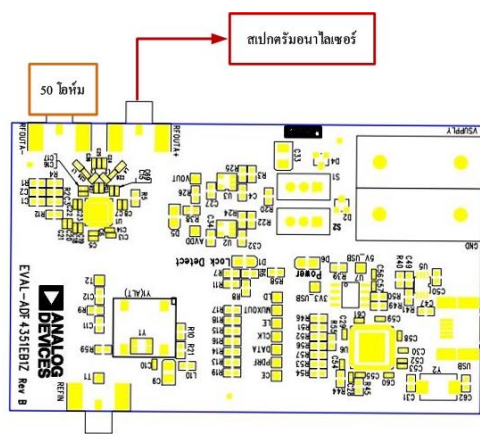


รูปที่ 3.5 การตั้งค่าโปรแกรม ADF435x สำหรับกำเนิดความถี่

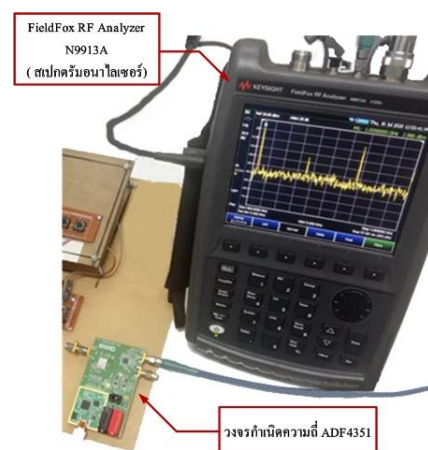
จากรูปที่ 3.5 หมายเลข 1 เป็นการระบุค่าความถี่ในหน่วย MHz ในที่นี้ผู้วิจัยกำหนดเป็น 1000 MHz , 1500 MHz และ 2160 MHz ตามลำดับ และ หมายเลข 2 ผู้วิจัยกำหนดเป็น +5 dBm ตลอดงานวิจัยฉบับนี้

3) การทดสอบความถี่ไมโครเวฟที่กำเนิดจากวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 และผลที่ได้

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟค่าความถี่ 1,1.5 และ 2.16 GHz สำหรับฝั่งการต่อทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ และการต่อทดสอบจริง แสดงดังรูปที่ 3.6



(ก) ฝั่งการต่อทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ



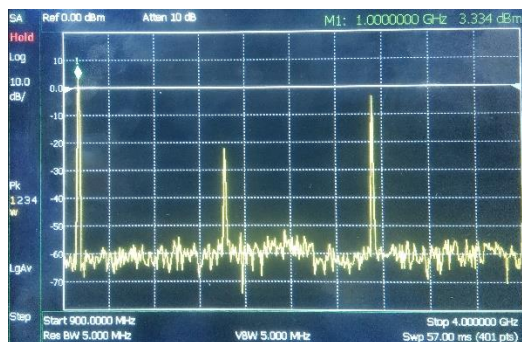
(ข) การต่อทดสอบไมโครเวฟจริง

รูปที่ 3.6 การทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ

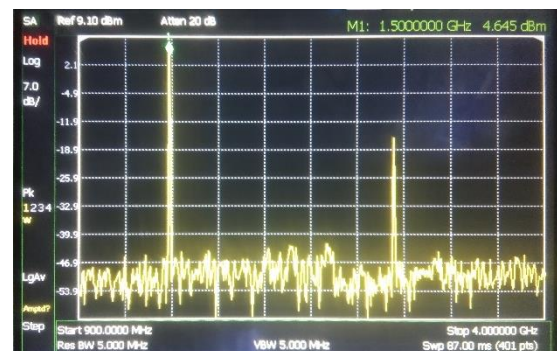
จากรูปที่ 3.6 ผลการทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ โดยวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 จะถูกวัดค่ากำลังงาน ณ ความถี่ที่เกิดด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมอนาล็อก ในงานวิจัยนี้ ใช้ FieldFox RF Analyzer N9913A ในโหมด SA (Spectrum analysis) สำหรับผลการทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟสำหรับจ่ายให้วงจรทพพอร์ตแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่ากำลังงาน ณ ความถี่ต่าง ๆ ที่กำเนิดโดยวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351

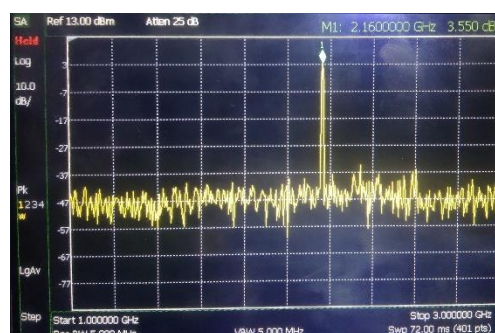
ความถี่ (GHz)	กำลังงาน (dBm)
1	3.334
1.5	4.645
2.16	3.550



(ก) ผลวัดสเปกตรัมความถี่ 1 GHz



(ข) ผลวัดสเปกตรัมความถี่ 1.5 GHz



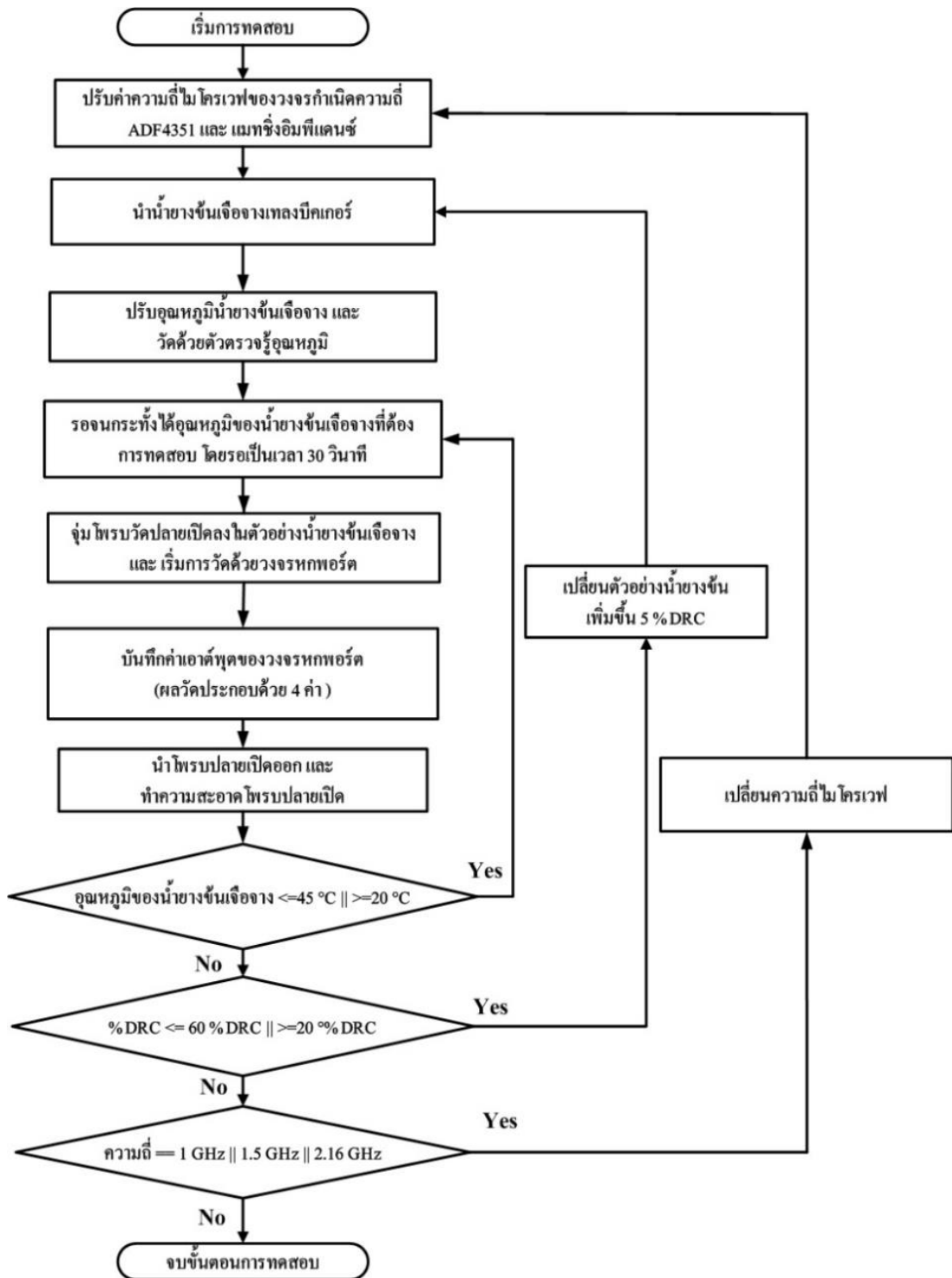
(ค) ผลวัดสเปกตรัมความถี่ 2.16 GHz

รูปที่ 3.7 ผลการวัดค่าความถี่ที่เกิดด้วยวงจร ADF4351

จากตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.7 พบว่าวงจรถักกำเนิดความถี่ ADF4351 สามารถกำเนิดความถี่ 1 GHz, 1.5 GHz และ 2.16 GHz ได้ค่าความถี่ตรงตามต้องการ โดยมีการสูญเสียกำลังงานเล็กน้อย และสูญเสียมากที่สุดที่ความถี่ 1 GHz เนื่องจากสามารถวัดได้เพียง +3.334 dBm จาก +5 dBm ซึ่งถือเป็นเรื่องปกติที่จะเกิดการสูญเสีย เนื่องจากสายสัญญาณที่นำมาต่อใช้งาน และการเชื่อมต่อระหว่างวงจรถักกำเนิดความถี่กับเครื่องวัดสเปกตรัมอนาล็อกเซอร์เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียกำลังงาน และนอกจากนี้หากใช้วงจรถักกำเนิดความถี่ ADF4351 กำเนิดความถี่ต่ำกว่า 2.2 GHz จะมีความถี่ฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 (กรณีค่าความถี่ 3 เท่าของความถี่ที่ต้องการไม่เกิน 4.4 GHz) จะเกิดขึ้นมาพร้อมกับความถี่ที่ต้องการ ซึ่งถือเป็นเรื่องปกติที่ระบุไว้ในคุณสมบัติของวงจรถักกำเนิดความถี่ ADF4351 ที่ระบุมาจากทางบริษัท Analog devices

3.3 ขั้นตอนการวัดและทดสอบตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง

เมื่อดำเนินการขั้นตอนการเตรียมการทั้งหมดเสร็จสิ้น ต่อมาเริ่มขั้นตอนการวัดและทดสอบตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจาง โดยขั้นตอนนี้เป็นการวัดน้ำยางชั้นเจือจางที่ค่า %DRC ต่าง ๆ ด้วยวงจรถักพอร์ต ขณะรับความถี่ไมโครเวฟจากวงจรถักกำเนิดความถี่ ADF4351 ต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 1 , 1.5 และ 2.16 GHz จากรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดในภาพรวมสำหรับแผนผังขั้นตอนการวัดและทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.8

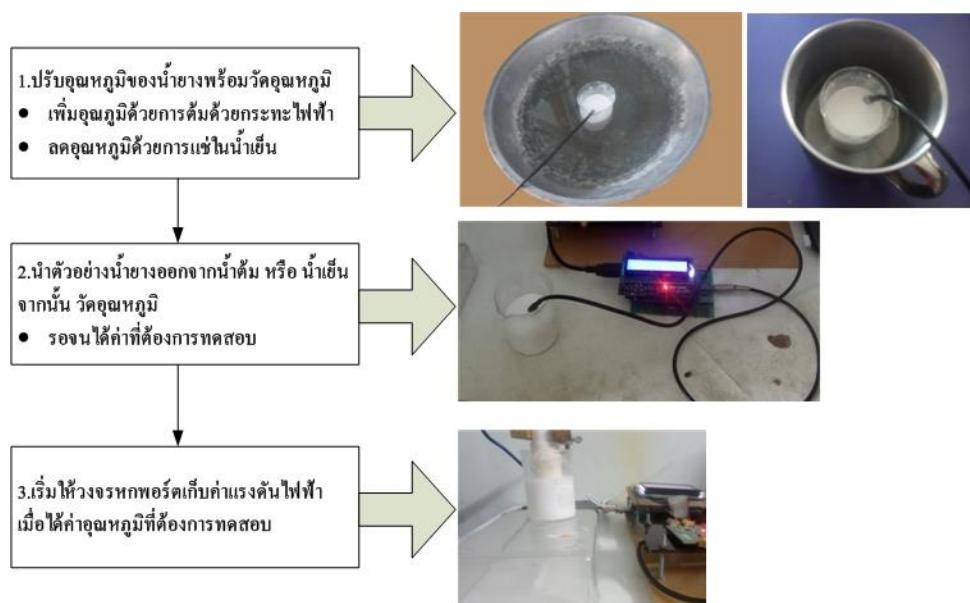


รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการวัดและทดสอบ

จากรูปที่ 3.8 ชั้นแรกของขั้นตอนการวัดและทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟของวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 โดยในการทดสอบนี้เริ่มจาก 1 GHz และทดสอบที่ความถี่ 1.5 GHz และ 2.16 GHz ตามลำดับ สำหรับผลการปรับความถี่ไมโครเวฟจากวงจรกำเนิดความถี่ที่ถูกวัดด้วยสเปกตรัมอานาไลเซอร์ และ แสดงผลดังตารางที่ 3.3 การทดสอบความถี่ไมโครเวฟที่กำเนิดจากวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 และผลที่ได้

ทุกครั้งที่เปลี่ยนความถี่ จะต้องปรับแมทซ์เพื่อให้เกิดการส่งผ่านกำลังงานจากแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ (วงจรกำเนิดความถี่ ADF4351) ไปสู่โพรบได้มากที่สุด ผลการแมทซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ของวงจรหกพอร์ต ณ ความถี่ที่ทดสอบได้ทำการกล่าวถึงไปก่อนหน้านี้ในหัวข้อการแมทซ์อิมพีแดนซ์ และ แสดงดังตารางที่ 3.2

สำหรับขั้นตอนการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่นำมาใช้ในการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต โดยงานวิจัยนี้ทดสอบที่อุณหภูมิ 20°C ถึง 45°C และจะปรับเพิ่มครั้งละ 5°C สำหรับการปรับอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเจือจางแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การปรับอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเจือจาง

จากรูปที่ 3.9 การปรับเพิ่มอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเจือจางจะให้ความร้อนผ่านน้ำต้มจากกระทะไฟฟ้าและ ปรับลดอุณหภูมิด้วยการนำตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางไปแช่ไว้ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C จากนั้นรอจนกระทั่งได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบแล้วจึงเริ่มการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต การบันทึกผลค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าขนาด 16 บิต โดยตัว

ตรวจจับกำลังงานจริง (ADL5505 ;True power detector) เมื่อทดสอบวัดแล้วเสร็จต่อไปเปลี่ยนตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางไปวัดที่ค่า %DRC อื่น ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ทดสอบในช่วง 20%DRC ถึง 60%DRC โดยวิธีการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางเหมือนกันทุกประการ

สำหรับผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อนที่ขึ้นอยู่กับ %DRC ของวงจรถูกพอร์ทจำนวน 4 ค่า จะถูกวิเคราะห์อย่างละเอียดต่อไปในบทที่ 4 ผลการทดสอบ และ การสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC

บทที่ 4

ผลการทดสอบ และ การสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC

ในบทนี้กล่าวถึงการนำผลการวัดทดสอบน้ำยางชั้นเงือจางด้วยวงจรถนพอร์ต จากบทที่ 3 นำมาวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยประกอบด้วย ผลการวัดน้ำยางชั้นเงือจางที่ได้จากวงจรถนพอร์ต ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเงือจางที่มีผลต่อค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรถนพอร์ต การเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC การสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC ด้วยการสอน บนโปรแกรม MATLAB และ ผลของการสอนที่ได้จากโปรแกรม MATLAB

4.1 ผลการวัดน้ำยางชั้นเงือจางที่ได้จากวงจรถนพอร์ต

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงส่วนของผลการวัดที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเงือจางด้วยวงจรถนพอร์ตในบทที่ 3 โดยจะกล่าวถึงจำนวนชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัดน้ำยางชั้นเงือจางและองค์ประกอบสำคัญของชุดข้อมูล และ ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนของแต่ละพอร์ตกับค่า %DRC

4.1.1 จำนวนชุดข้อมูลจากการทดสอบวัดน้ำยางชั้นเงือจาง และ องค์ประกอบสำคัญของชุดข้อมูล

จำนวนชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเงือจางในช่วงค่า 20-60 %DRC โดยแต่ละค่า %DRC จะถูกควบคุมอุณหภูมิของน้ำยางในช่วง 20-45 °C และปรับเพิ่มครั้งละ 5 °C โดยที่ค่า %DRC และอุณหภูมิของน้ำยางใดๆ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และ การวัด 1 ครั้งผู้วิจัยได้ชุดข้อมูลค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 150 ชุด โดย 1 ชุดข้อมูลประกอบด้วยค่ากำลังงานสะท้อน P3-P6 จำนวน 4 ค่า

โดยรวม มีชุดข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC จำนวน 24,300 ชุดข้อมูลต่อหนึ่งค่าความถี่ที่ใช้จ่ายให้วงจรถนพอร์ต สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทดสอบ 3 ค่าความถี่ ดังนั้นจึงมีชุดข้อมูลทั้งหมด 72,900 ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลเหล่านี้ได้จากวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเงือจาง 9 ตัวอย่าง ที่ถูกแบ่งออกเป็นตัวอย่างน้ำยางสำหรับทดสอบ 54 ตัวอย่างทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเงือจางที่ต่างกัน กล่าวคือ หนึ่งค่า %DRC แบ่งได้เป็น 6 ตัวอย่างทดสอบ และ แต่

ละตัวอย่างทดสอบผู้วิจัยวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่มากขึ้นเป็น 3 เท่าสำหรับการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการสอนที่มีเที่ยงตรงมากขึ้น

นอกจากนี้ในหนึ่งชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรถนพอร์ต จะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญของชุดข้อมูล โดยใน 1 ชุดข้อมูล ที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรถนพอร์ต 1 ครั้ง ประกอบด้วยรายการข้อมูล 4 รายการดังนี้

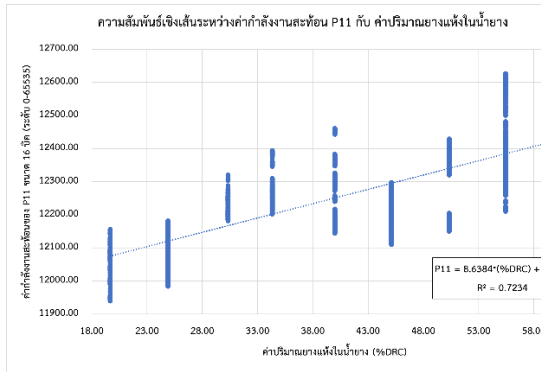
- 1) ค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 4 ค่า คือ P3-P6
- 2) ค่า %DRC ของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ
- 3) ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่ตรวจจับด้วยตัวตรวจรู้อุณหภูมิ (DS18B20)
- 4) ค่าความถี่ที่ใช้จ่ายให้วงจรถนพอร์ต

4.1.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนของแต่ละพอร์ตกับค่า %DRC

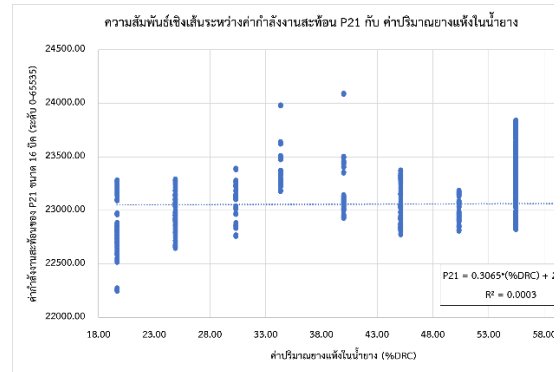
ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแต่ละพอร์ต กับ ค่า %DRC ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่ากำลังสะท้อนของแต่ละพอร์ตกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ให้วงจรถนพอร์ตต่างกัน 3 ค่าความถี่ โดยสามารถสรุปได้เป็นกรณีที่แตกต่างกัน 3 กรณี

1) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1 GHz ให้วงจรถนพอร์ต

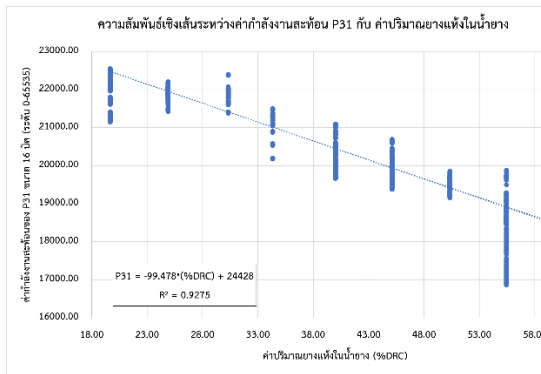
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับค่า %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1 GHz ให้วงจรถนพอร์ตแสดงดังรูปที่ 4.1



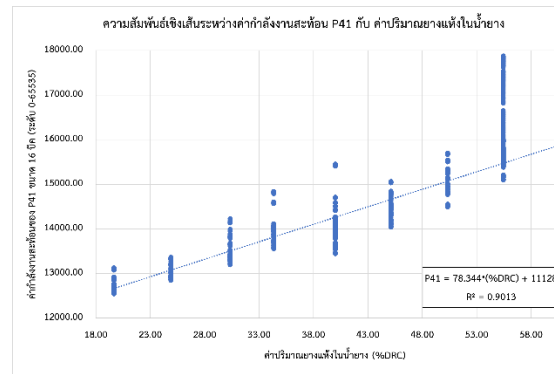
(ก) ความสัมพันธ์ P11 กับ %DRC



(ข) ความสัมพันธ์ P21 กับ %DRC



(ค) ความสัมพันธ์ P31 กับ %DRC



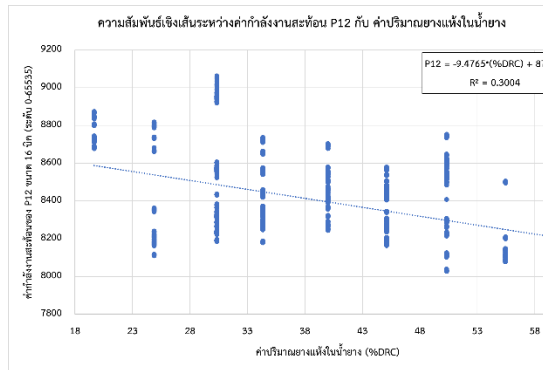
(ง) ความสัมพันธ์ P41 กับ %DRC

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1 GHz
ให้วงจรถูกพอร์ท

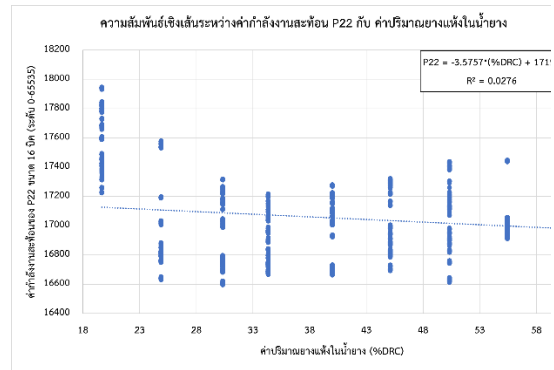
จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงของพอร์ท P31 มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจางมากที่สุด เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่าความถี่ 1 GHz ให้วงจรถูกพอร์ท โดยมีค่า $R^2 = 0.9275$ สำหรับพอร์ทที่เหลือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ %DRC จากมากไปน้อยดังนี้ P41 , P11 และ P21 ตามลำดับ หมายเหตุ P11,P21,P31 และ P41 เป็นค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรถูกพอร์ท P3, P4, P5 และ P6 ตามลำดับ เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่าความถี่ 1 GHz เพื่อทดสอบวัตุน้ำยางชั้นเจือจาง

2) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1.5 GHz ให้วงจรหกพอร์ต

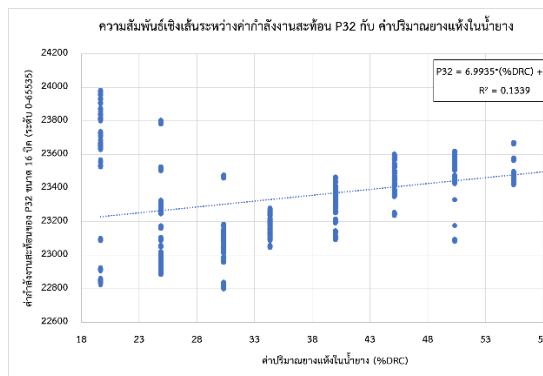
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับค่า %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1.5 GHz ให้วงจรหกพอร์ตแสดงดังรูปที่ 4.2



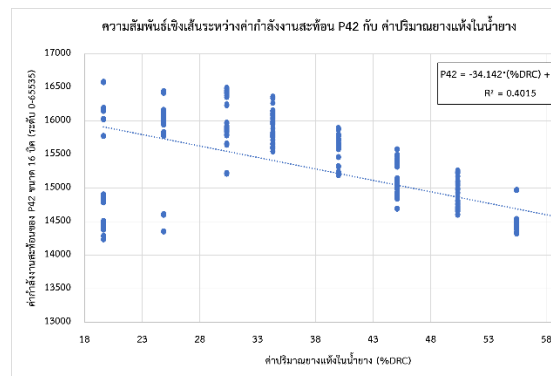
(ก) ความสัมพันธ์ P12 กับ %DRC



(ข) ความสัมพันธ์ P22 กับ %DRC



(ค) ความสัมพันธ์ P32 กับ %DRC



(ง) ความสัมพันธ์ P42 กับ %DRC

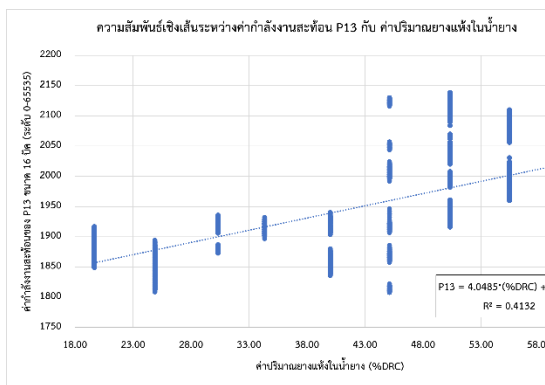
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 1.5 GHz ให้วงจรหกพอร์ต

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงของพอร์ต P42 มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจางมากที่สุด เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่าความถี่ 1.5 GHz ให้วงจรหกพอร์ต โดยมีค่า $R^2 = 0.4015$ สำหรับพอร์ตที่เหลือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ %DRC จากมากไปน้อยดังนี้ P12 , P32 และ P22 ตามลำดับ หมายถึง P12,P22,P32 และ

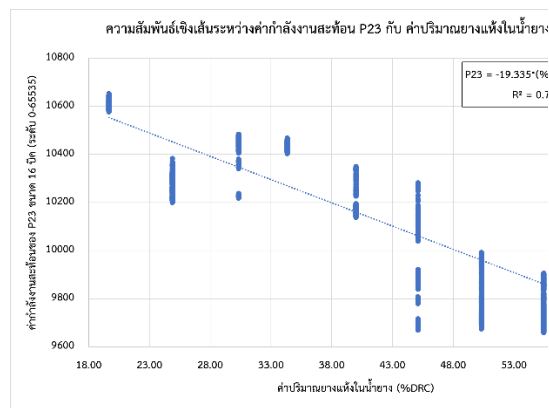
P42 เป็นค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรถูกพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 ตามลำดับ เมื่อจ่ายความถี่ ไมโครเวฟค่าความถี่ 1.5 GHz เพื่อทดสอบวัดน้ำยางชั้นเจือจาง

3) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 2.16 GHz ให้วงจรถูกพอร์ต

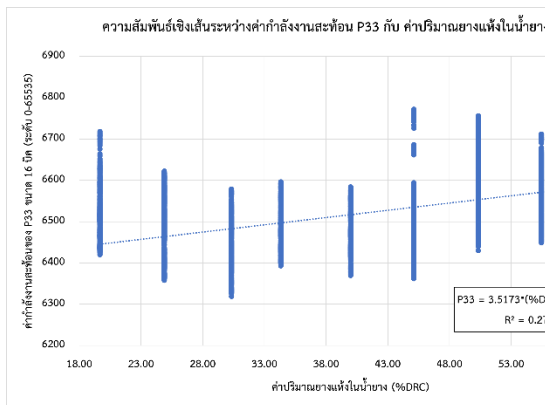
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับค่า %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 2.16 GHz ให้วงจรถูกพอร์ตแสดงดังรูปที่ 4.3



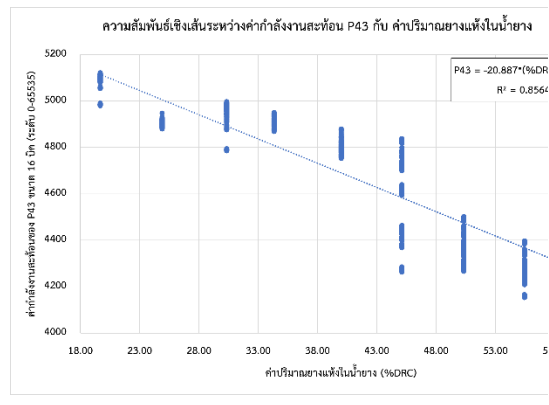
(ก) ความสัมพันธ์ P13 กับ %DRC



(ข) ความสัมพันธ์ P23 กับ %DRC



(ค) ความสัมพันธ์ P33 กับ %DRC



(ง) ความสัมพันธ์ P43 กับ %DRC

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ากำลังงานสะท้อนกับ %DRC เมื่อจ่ายความถี่ 2.16 GHz ให้วงจรถูกพอร์ต

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงของพอร์ต P43 มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจางมากที่สุด เมื่อป้อนคลื่นไมโครเวฟ 2.16 GHz ให้วงจรหกพอร์ต โดยมีค่า $R^2 = 0.8564$ สำหรับพอร์ตที่เหลือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ %DRC จากมากไปน้อยดังนี้ P23 , P13 และ P33 ตามลำดับ หมายเหตุ P13,P23,P33 และ P43 เป็นค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรหกพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 ตามลำดับ เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟ ค่าความถี่ 2.16 GHz เพื่อทดสอบวัตถุน้ำยางชั้นเจือจาง

จากรูปที่ 4.1-4.3 สามารถสรุปความเป็นเชิงเส้นระหว่างค่ากำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ตกับค่า %DRC ของน้ำยางชั้นเจือจาง และสามารถหาพิสัยของแต่ละพอร์ต ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟต่างกัน 3 ค่า ได้ดังตารางที่ 4.1 สรุปความเป็นเชิงเส้นระหว่างค่ากำลังงานสะท้อนของ P3-P6 และ ค่าพิสัย เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟต่างกัน 3 ค่า

ตารางที่ 4.1 สรุปความเป็นเชิงเส้น และ พิสัย ของค่ากำลังงานสะท้อน P3-P6

พารามิเตอร์	ความถี่ที่ใช้จ่ายให้ วงจรหกพอร์ต (GHz)	ความเป็นเชิงเส้นกับ %DRC จากค่า R^2	พิสัย (ระดับขนาด 16 บิต)
P11	1	0.7234	686
P21		0.0003	1851
P31		0.9275	5685
P41		0.9013	5334
P12	1.5	0.3004	1035
P22		0.0276	1351
P32		0.1339	1182
P42		0.4015	3154
P13	2.16	0.4132	331
P23		0.7419	994
P33		0.2765	501
P43		0.8564	969

จากตารางที่ 4.1 พบว่าที่ความถี่ไมโครเวฟ 1 GHz เมื่อนำมาใช้จ่ายให้วงจรทอร์ต จะได้ค่ากำลังงานสะท้อนจากพอร์ต P31 ที่มีความเป็นเชิงเส้นกับ %DRC ของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงถึง 0.9275 และมีพิสัยของค่ากำลังงานสะท้อนขณะวัดน้ำยางชั้นเจือจางช่วง 20-60 %DRC มากที่สุดอยู่ที่ 5685 ระดับจากขนาดข้อมูล 16 บิต ซึ่งถือว่า มีทั้งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ พิสัยที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานสะท้อนของทุกพอร์ต เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟให้วงจรทอร์ตทั้ง 3 ค่าความถี่

ส่วนความถี่ 1.5 GHz เมื่อจ่ายให้วงจรทอร์ต พบว่าผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อนพอร์ต P42 มีความเป็นเชิงเส้น และ ค่าพิสัยมากที่สุดจากพอร์ตอื่นๆ ที่จ่ายความถี่ค่า 1.5 GHz เหมือนกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ พิสัย เป็น 0.4015 และ 3154 ตามลำดับ และสุดท้ายที่ความถี่ 2.16 GHz มีค่ากำลังงานสะท้อนน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดกรณีที่จ่ายความถี่ 1 GHz และ 1.5 GHz ให้วงจรทอร์ต โดยค่า P43 มีความเป็นเชิงเส้นกับ %DRC มากที่สุด ขณะที่ ค่า P23 มีพิสัยมากที่สุด

จากตารางที่ 4.1 สรุปได้ว่าที่ความถี่ 1 GHz และ 1.5 GHz ค่าความเป็นเชิงเส้น กล่าวคือค่า R^2 ยิ่งสูงค่าพิสัยของผลการวัดกำลังงานสะท้อนจะสูงตาม ในขณะที่ความถี่ 2.16 GHz ค่า R^2 จะไม่สัมพันธ์กับค่าพิสัยของกำลังงานสะท้อน

4.2 ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเจือจางที่มีผลต่อค่ากำลังงานของวงจรทอร์ต

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางชั้นเจือจางที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละพอร์ต โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (%CV) ของกำลังงานสะท้อนแต่ละพอร์ต เมื่อนำมาใช้วัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางที่ค่า %DRC เดียวกัน โดยแยกพิจารณาเป็น 3 กรณี ดังนี้ ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1 GHz , 1.5 GHz และ 2.16 GHz ตามลำดับ สำหรับสมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\%CV = \frac{\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ต}}{\text{ค่าเฉลี่ยของกำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ต}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 ผู้วิจัยกำหนดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ต และ ค่าเฉลี่ยของกำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ต เป็นค่าที่พิจารณาจากผลการวัดน้ำยางชั้นเจือจางที่มีค่า %DRC เดียวกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางเท่านั้น โดยแยกออกเป็น 3 กรณี คือ สัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่ากำลังงานสะท้อน

เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 1, 1.5 และ 2.16 GHz ให้วงจรหกพอร์ต เพื่อวิเคราะห์ผลการทบจาก อุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz ตามลำดับ ดังนี้

4.2.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1 GHz

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน ณ พอร์ตต่าง ๆ ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 1 GHz เพื่อวัดค่ากำลังงานสะท้อนจากตัวอย่างน้ำยางชั้น เจือจางในช่วง 20-60 %DRC โดยอาศัยสัมประสิทธิ์ความแปรผันเป็นตัวแปรแสดงถึงผลกระทบจาก อุณหภูมิ สำหรับผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางต่อผลการวัดค่ากำลังงาน สะท้อน เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟ 1 GHz ให้วงจรหกพอร์ตแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1 GHz

%DRC	สัมประสิทธิ์การแปร ผัน P11 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปร ผัน P21 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปร ผัน P31 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปร ผัน P41 (CV%)
19.67	0.44	0.87	1.47	1.03
24.89	0.39	0.63	0.81	1.15
30.33	0.22	0.62	0.94	1.44
34.33	0.35	0.82	1.51	2.20
40.00	0.71	1.16	2.04	<u>3.39</u>
45.11	0.37	0.78	1.61	1.81
50.33	0.62	0.40	0.92	2.28
55.44	0.51	1.02	2.41	2.95
61.55	0.40	1.34	1.88	2.29
เฉลี่ย	0.44	0.85	1.51	<u>2.06</u>

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเฉลี่ยมากที่สุดที่พอร์ต P41 คิด เป็น 2.06% หมายถึง ค่ากำลังงานสะท้อนที่พอร์ต P6 ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 1 GHz เพื่อวัด น้ำยางชั้นเจือจาง ผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน ณ พอร์ตดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ ของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางมากที่สุด โดยที่ค่า P41 ขณะวัดน้ำยางชั้นเจือจางค่า 40%DRC ได้ค่า สัมประสิทธิ์การแปรผันสูงสุดถึง 3.39%

4.2.2 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1.5 GHz

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน ณ พอร์ตต่าง ๆ ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 1.5 GHz เพื่อวัดค่ากำลังงานสะท้อนจากตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางในช่วง 20-60 %DRC โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเป็นตัวแปรแสดงถึงผลกระทบจากอุณหภูมิ สำหรับผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางต่อผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟ 1.5 GHz ให้วงจรหกพอร์ตแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 1.5 GHz

%DRC	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P12 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P22 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P32 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P42 (CV%)
19.67	0.58	1.16	1.62	<u>4.59</u>
24.89	2.84	1.54	1.00	3.32
30.33	2.63	1.33	0.54	2.10
34.33	1.80	0.98	0.24	1.46
40.00	1.40	1.11	0.42	1.44
45.11	1.71	1.13	0.37	1.52
50.33	2.39	1.63	0.46	1.44
55.44	1.12	0.65	0.23	0.88
61.55	1.45	0.46	0.37	1.27
เฉลี่ย	1.77	1.11	0.58	<u>2.00</u>

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเฉลี่ยมากที่สุดที่พอร์ต P42 คิดเป็น 2.00% หมายถึง ค่ากำลังงานสะท้อนที่พอร์ต P6 ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 1.5 GHz เพื่อวัดน้ำยางชั้นเจือจาง ผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน ณ พอร์ตดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือจางมากที่สุด โดยที่ค่า P42 ขณะวัดน้ำยางชั้นเจือจางค่า 19.67%DRC ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสูงสุดถึง 4.59%

4.2.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 2.16 GHz

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน ณ พอร์ตต่าง ๆ ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 2.16 GHz เพื่อวัดค่ากำลังงานสะท้อนจากตัวอย่างน้ำยางข้นเจือจางในช่วง 20-60 %DRC โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเป็นตัวแปรแสดงถึงผลกระทบจากอุณหภูมิ เมื่อจ่ายความถี่ไมโครเวฟ 2.16 GHz ให้วงจรหกพอร์ตแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผลการวัดที่ความถี่ 2.16 GHz

%DRC	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P13 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P23 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P33 (CV%)	สัมประสิทธิ์การแปรผัน P43 (CV%)
19.67	0.85	0.15	0.86	0.58
24.89	0.89	0.36	0.89	0.21
30.33	0.52	0.55	0.80	0.92
34.33	0.32	0.14	0.77	0.47
40.00	1.39	0.48	0.75	0.51
45.11	<u>4.39</u>	1.78	1.17	3.84
50.33	3.99	0.97	1.09	1.79
55.44	2.31	0.70	0.88	1.27
61.55	1.08	0.69	0.89	0.72
เฉลี่ย	<u>1.75</u>	0.65	0.90	1.14

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเฉลี่ยมากที่สุดที่พอร์ต P13 คิดเป็น 1.75% หมายถึง ค่ากำลังงานสะท้อนที่พอร์ต P4 ขณะจ่ายความถี่ไมโครเวฟค่า 2.16 GHz เพื่อวัดน้ำยางข้นเจือจาง ผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อน ณ พอร์ตดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางข้นเจือจางมากที่สุด โดยที่ค่า P13 ขณะวัดน้ำยางข้นเจือจางค่า 45.11%DRC ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสูงสุดถึง 4.39%

จากตารางที่ 4.2 – 4.4 พบว่าที่ค่าความถี่สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเฉลี่ยของค่ากำลังงานสะท้อนพอร์ต P6 จะลดลงตามลำดับ ในขณะที่พอร์ตเหลือไม่เป็นไปตามลำดับ และที่ความถี่ 2.16 GHz พบว่าผลกระทบจากอุณหภูมิเกิดมากที่สุดที่ P4 ซึ่งต่างจากที่ความถี่ 1 GHz และ 1.5 GHz ที่เกิดผลกระทบมากที่สุดที่ P6 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางข้น

เจือจางต่อผลการวัดค่ากำลังงานสะท้อนที่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ว่าด้วยผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางน้อยลง (กระทบค่าคงที่ความเป็นฉนวน (ϵ'')) หากความถี่ไมโครเวฟที่จ่ายไปตกกระทบกับน้ำยางมากขึ้น และ กรณีที่จ่ายค่าความถี่มากกว่า 2 GHz จะพบว่าพฤติกรรมการสูญเสียจะแตกต่างกันกับจ่ายต่ำกว่า 2 GHz ซึ่งก็สอดคล้องเช่นกัน พิจารณาจากผลกระทบอุณหภูมิด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน โดยกรณี 2.16 GHz ผลกระทบมากที่สุดที่ P4

4.3 การฝึกแบบจำลองสำหรับทำนายค่า %DRC

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการฝึกแบบจำลองสำหรับทำนายค่า %DRC ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยประกอบด้วยหัวข้อสำคัญ 2 ข้อ ดังนี้

4.3.1 อธิบายรายละเอียดของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือด้วยหกพอร์ต

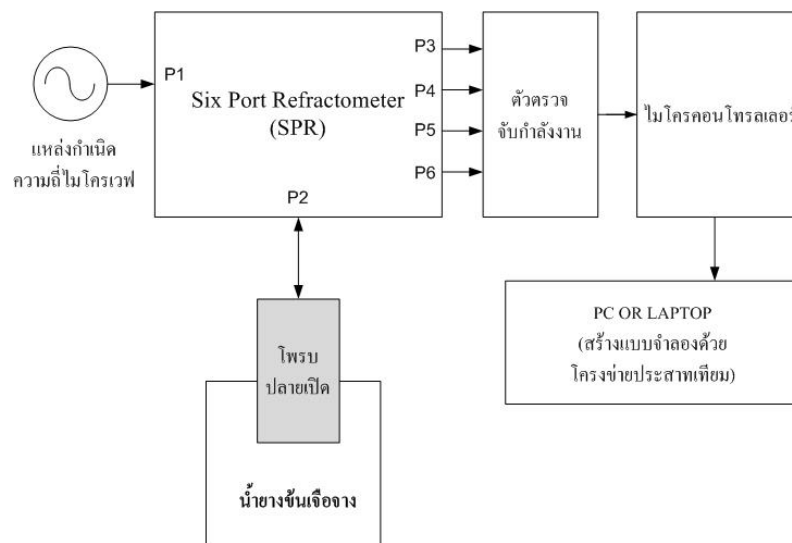
4.3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณ %DRC ด้วยโปรแกรม MATLAB

4.3.1 รายละเอียดของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือด้วยวงจรถูกพอร์ต

ในหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่างน้ำยางชั้นเจือด้วยหกพอร์ต โดยจะอธิบายเป็นหัวข้อ 3 หัวข้อตามลำดับ ประกอบด้วย ชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวงจรถูกพอร์ต การนอร์มัลไลซ์ชุดข้อมูล และการจัดเก็บข้อมูลและนำเข้าชุดข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC

1) ชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวงจรถูกพอร์ต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางชั้นเจือจาง และ การกำหนดตัวแปรสำหรับใช้สอนแบบจำลองทำนาย %DRC เพื่ออธิบายว่าใช้ตัวแปรใดเป็นตัวแปรทำนาย (Predictor) และ ตัวแปรใดเป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) พิจารณาการมีอยู่ของตัวแปรจากระบบการวัดปริมาณยางแห้งในน้ำยางดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผังระบบหกพอร์ตสำหรับวัดปริมาณยางแห้ง

จากรูปที่ 4.4 สำหรับชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางชันเจือจางด้วยวงจรหกพอร์ต คือ ค่ากำลังงานสะท้อนของพอร์ต P3-P6 ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณ %DRC ของน้ำยางชันเจือจางที่นำมาทดสอบ และ ค่ากำลังงานสะท้อนดังกล่าวจะถูกนำมาแปลงด้วยตัวตรวจจับกำลังงานที่ทำหน้าที่แปลงกำลังงานสะท้อนให้อยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าขนาด 16 บิต เป็นผลให้เอาต์พุตที่ใช้เป็นชุดข้อมูล คือ ค่ากำลังงานสะท้อนที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า ตัวอย่างผลการวัดกำลังงานสะท้อนดังรูปที่ 4.5 ก-ข ตามลำดับ

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
DRC	P11	P21	P31	P41	P12	P22	P32	P42	P13	P23	P33	P43
19.67	12088	22660	21606	12632	8843	17777	22848	16148	1898	10604	6444	5110
19.67	12080	22666	21612	12639	8842	17774	22848	16147	1895	10603	6437	5112
19.67	12090	22678	21624	12642	8840	17774	22850	16145	1899	10610	6512	5112
19.67	12088	22679	21674	12646	8842	17774	22851	16144	1898	10610	6514	5111
19.67	12090	22679	21679	12648	8838	17776	22848	16141	1899	10610	6518	5113
19.67	12089	22680	21636	12652	8839	17775	22847	16143	1900	10612	6524	5114
19.67	12080	22680	21633	12650	8836	17778	22846	16147	1898	10608	6494	5112
19.67	12084	22682	21632	12650	8836	17778	22846	16144	1896	10610	6503	5110
19.67	12086	22684	21632	12651	8840	17780	22850	16147	1896	10603	6438	5110
19.67	12084	22682	21636	12649	8842	17778	22848	16146	1898	10605	6433	5114
19.67	12082	22684	21638	12650	8840	17778	22845	16150	1900	10612	6512	5111

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างชุดข้อมูล ผลวัดกำลังงานสะท้อน (กรณี 3 ค่าความถี่)

รูปที่ 4.5 จากตัวอย่างผลการวัดกำลังงานสะท้อนจะพบว่า ข้อมูลที่นำมาใช้แบบจำลองมีจำนวนมากถึง 24,300 ชุด เนื่องจากการวัด 1 ครั้งผู้วิจัยจะได้ชุดข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC จำนวน 150 ชุด ชื่อของตัวแปรในแต่ละคอลัมน์กำหนดให้ค่า P11 คือค่า P3 ของผลวัดที่ความถี่ 1 GHz ส่วน P12 และ P13 คือค่า P3 ของผลวัดที่ความถี่ 1.5 GHz และ 2.16 GHz ตามลำดับ และการเรียงค่าจะเป็นรูปแบบนี้ไปจนถึง P43 ซึ่งก็คือ ค่า P6 ของความถี่ 2.16 GHz

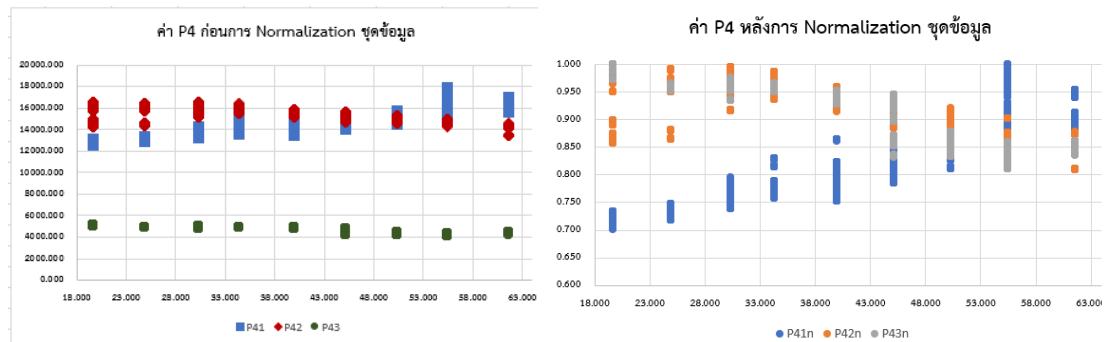
จากชื่อคอลัมน์ทำให้ทราบว่าชุดข้อมูลประกอบด้วยตัวแปร 13 ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปรจะนำมาประยุกต์ใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยแต่ละตัวแปรจะทำหน้าที่ต่างกัน 2 หน้าที่ คือ ตัวแปรทำนาย และ ตัวแปรตอบสนอง

สำหรับค่าตัวแปรทำนาย จะใช้ตัวแปรจำนวน 12 ค่า คือค่ากำลังงานสะท้อนที่ถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าของพอร์ต P3-P6 เป็น P11 ถึง P43 ตามรูปที่ 4.5 โดยชุดข้อมูลเหล่านี้ใช้เพื่อทำนาย %DRC ของตัวอย่างน้ำยางที่นำมาทดสอบ และ ในส่วนของตัวแปรค่า DRC จะใช้เป็นผลตอบสนอง หรือ เป้าหมายของแบบจำลอง ซึ่งก็ใช้ค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยางที่นำมาทดสอบที่ถูกรัดด้วยวิธีการอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟ

เมื่อได้ชุดข้อมูลแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าของพอร์ต P3-P6 หรือ ตัวแปรทำนายให้อยู่ช่วงเดียวกันก่อนด้วยการนอร์มัลไลซ์

2) การนอร์มัลไลซ์ชุดข้อมูล

การนอร์มัลไลซ์ข้อมูลเพื่อให้ได้ผลการสร้างแบบจำลองที่ไวต่อความผันผวนของค่ากำลังงานสะท้อน เนื่องจากผลการทดสอบที่ได้จากการวัดตัวอย่างน้ำยางชิ้นเดียวจางด้วยวงจรหกพอร์ต 1 ครั้ง จะได้ชุดข้อมูลทั้งหมด 150 ชุด ประกอบกับวัดตัวอย่างน้ำยางขณะจ่ายค่าความถี่ไมโครเวฟให้วงจรหกพอร์ตต่างกันในแต่ละรอบการวัดเป็นผลให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงกำลังงานสะท้อนของแต่ละความถี่ต่างกัน เพื่อความชัดเจนในส่วนนี้ จะขอยกตัวอย่าง P41, P42 และ P43 มาเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนทำ นอร์มัลไลซ์และ หลังทำนอร์มัลไลซ์ ว่าชุดข้อมูลเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4.6 ก-ข ตามลำดับ



ก) P4 ของทั้ง 3 ความถี่ก่อนการนอร์มัลไลซ์

ข) P4 ของทั้ง 3 ความถี่หลังการนอร์มัลไลซ์

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบชุดข้อมูลก่อนและหลังการนอร์มัลไลซ์

จากรูปที่ 4.6 ชุดข้อมูล 16 บิตจาก 0-65535 ระดับจะถูกนอร์มัลไลซ์เป็น 0-1 ทำให้ค่าจากการวัดที่ความถี่ 2.16 GHz มีช่วงเท่ากับกับชุดข้อมูลความถี่อื่นๆ ดังนั้น เมื่อนำไปสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC ผลวัดทั้ง 3 ค่าความถี่จะมีขอบเขตเท่ากัน ค่ากำลังงานสะท้อนที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์ของ P1-P4 จะนำเข้าไปโปรแกรมเพื่อพัฒนาแบบจำลองต่อไป

4.3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC ด้วยการสอน และแสดงผลบนโปรแกรม MATLAB

หัวข้อนี้เป็นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยเครื่องมือ Neural net fitting (nftool) ของโปรแกรม MATLAB โดยเครื่องมือดังกล่าวใช้สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับงานวิจัยนี้ อาศัยค่ากำลังงานสะท้อน 4 ค่า คือ ค่า P1-P4 ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว นำมาใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC ขั้นตอนการฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ที่สามารถอธิบายได้ตามแผนผังการฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC

ในการฝึกแบบจำลอง จะกำหนดให้ค่า P1-P4 เป็นตัวแปร X ใช้สำหรับเป็นตัวทำนาย (Predictors) และ ใช้ค่า %DRC เป็นตัวแปร Y สำหรับเป็นผลตอบสนอง (Response)

โดยตัวแปรทำนาย จะถูกแบ่งออกตามกรณีการฝึกแบบจำลอง เมื่อฝึกแบบจำลองด้วยชุดข้อมูล 1, 2 และ 3 ค่าความถี่ จะมีตัวแปรทำนายเป็นจำนวน 4, 8 และ 12 ตามลำดับ กล่าวคือ มีอินพุตที่เป็นค่ากำลังงานสะท้อนเป็น 4, 8 และ 12 ค่า ตามลำดับ สำหรับนำไปฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC โดยจำนวนชุดข้อมูลยังคงเดิม คือ 24,300 ชุดข้อมูล เมื่อเลือกชุดข้อมูลแล้วเสร็จในขั้นตอนถัดไป คือ การแบ่งชุดข้อมูล และการกำหนดค่าชั้นแอบแฝง

สำหรับชุดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสอนแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้สำหรับการสอน (Training) 70% การตรวจสอบ (Validating) 15% และการทดสอบ (Testing) 15% กล่าวคือ จาก 24300 ชุด แบ่งเป็น 17010 , 3645 และ 3645 ชุด สำหรับการสอน การตรวจสอบ และ การทดสอบตามลำดับ ยกเว้นการสอนด้วยอัลกอริทึม Bayesian Regularization Algorithm ที่จะแบ่งสำหรับ การสอน และ ทดสอบเป็น 85% และ 15% กล่าวคือ จาก 24300 ชุด แบ่งเป็น 20655 และ 3645 ชุดสำหรับการสอนและทดสอบตามลำดับ และ ในการฝึกจะกำหนดจำนวนของชั้นแอบแฝง (Hidden layer) เป็น 10 ชั้นสำหรับทุก ๆ การฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC ก่อนจะเริ่มการฝึกแบบจำลอง จะต้องทำการกำหนดอัลกอริทึมสำหรับฝึกเสียก่อน

ในส่วนของการเลือกอัลกอริทึมสำหรับฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC ตัวเครื่องมือ Neural Net Fitting Apps มีให้เลือกใช้งาน 3 อัลกอริทึม ดังนี้

- Levenberg-Marquardt Algorithm (LMA) : เหมาะสำหรับการสอนแบบจำลองที่มีการรับกวนของสัญญาณ หรือ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลขนาดเล็ก
- Bayesian Regularization Algorithm (BRA) : สามารถใช้สอนแบบจำลองได้ดีกว่าแบบที่ 1) แต่ใช้เวลาในการสอนนานกว่า และ เหมาะกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลขนาดใหญ่
- Scaled Conjugate Gradient Algorithm (SCG) : เหมาะสำหรับการสอน โดยมุ่งเน้นใช้หน่วยความจำให้มีประสิทธิภาพสูง กว่า การคำนวณจาโคเบียน (Jacobian calculations) ซึ่งใช้ในอัลกอริทึมก่อนหน้านี้ทั้ง 2 อัลกอริทึม

โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ฝึกแบบจำลองทำนาย %DRC ทุก ๆ กรณีด้วย 3 อัลกอริทึม และผลที่ได้ดังตารางที่ 4.5 โดยตารางได้รวบรวมค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error MSE) และ ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient ,R) และเวลาในการฝึก สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลองทำนาย %DRC

ตารางที่ 4.5 ผลของการพัฒนาแบบจำลอง

Mode	Frequency (GHz)	MSE			R			Algorithm	Elapsed Time (s)
		Training	Validating	Testing	Training	Validating	Testing		
Single Frequency	1	1.0775	-	1.0668	0.9970	-	0.9970	BRA	51
		1.0241	1.1179	1.0536	0.9971	0.9969	0.9970	LMA	21
		3.8026	3.7120	3.8842	0.9893	0.9894	0.9889	SCG	22
	1.5	1.5609	-	1.5491	0.9956	-	0.9956	BRA	101
		6.8889	8.1170	7.6581	0.9805	0.9767	0.9785	LMA	13
		8.8126	10.2214	8.4570	0.9750	0.9710	0.9757	SCG	25
	2.16	1.3293	-	1.3073	0.9963	-	0.9963	BRA	85
		1.5326	1.5034	1.5072	0.9957	0.9958	0.9958	LMA	17
		4.2025	4.1611	4.2602	0.9882	0.9881	0.9879	SCG	15
Dual frequency	1,1.5	0.2579	-	0.2726	0.9993	-	0.9993	BRA	113
		0.3784	0.3858	0.3789	0.9989	0.9989	0.9989	LMA	32
		1.0363	1.0071	1.0101	0.9971	0.9972	0.9971	SCG	32
	1,2.16	0.2244	-	0.2312	0.9994	-	0.9994	BRA	102
		0.2552	0.2644	0.2622	0.9993	0.9993	0.9993	LMA	39
		1.2729	1.2944	1.2775	0.9964	0.9964	0.9964	SCG	16
	1.5,2.16	0.2853	-	0.2901	0.9992	-	0.9992	BRA	61
		0.3035	0.3106	0.3145	0.9992	0.9991	0.9991	LMA	35
		0.8499	0.8483	0.8548	0.9976	0.9976	0.9976	SCG	43
Triple frequency	1,1.5,2.16	0.1224	-	0.1264	0.9997	-	0.9997	BRA	120
		0.1411	0.1456	0.1461	0.9996	0.9996	0.9996	LMA	25
		0.5260	0.5377	0.5426	0.9985	0.9985	0.9985	SCG	26

จากตารางที่ 4.5 พบว่าหากใช้ชุดข้อมูลจากหลายความถี่ แบบจำลองทำนาย %DRC ที่ได้จากการสอนจะมีสัโรธนะที่ตี่ขึ้นตามจำนวนความถี่ สำหรับงานวิจัยนี้หากใช้ชุดข้อมูลทั้ง 3 ค่าความถี่ จะให้แบบจำลองที่ให้ค่า MSE ต่ำที่สุด และ ค่า Regression (R) ใกล้เคียงค่า 1 เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากความถี่เดียวในอัลกอริทึมชนิดเดียวกัน

วิทยานิพนธ์ยังพบว่า อัลกอริทึม Bayesian Regularization Algorithm หรือ BRA ที่ใช้สอนชุดข้อมูล 3 ค่าความถี่ให้แบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC จะให้ผลการทำนายดีที่สุ่ด โดยให้ค่า MSE ของการฝึก และการทดสอบ เป็น 0.1224 และ 0.1264 ตามลำดับ และให้ค่า R ของการฝึก และการทดสอบเป็น 0.9997 ทั้งสองค่า

สำหรับเวลาที่ใช้ (Elapsed Time) ของอัลกอริทึม BRA พบว่า หากพัฒนาแบบจำลองด้วยชุดข้อมูลหลายความถี่ จะใช้เวลาพัฒนานานกว่าการพัฒนาบนชุดข้อมูลความถี่เดียว ผลการทดสอบพบว่า การฝึกแบบจำลองที่พัฒนาจากชุดข้อมูล 3 ความถี่ด้วยอัลกอริทึม BRA จะใช้เวลาานานที่สุด คือ 2 นาที

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการสอน ซึ่งเป็นการสรุปผลการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC จากบทที่ 4 และในหัวข้อนี้ประกอบด้วยหัวข้อสำคัญ 3 หัวข้อ คือ สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และ สิ่งที่สามารถต่อยอดได้ต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในหัวข้อนี้เป็นการสรุปผลงานวิจัย โดยสรุปเป็น 2 หัวข้อ คือ สรุปแบบจำลองสำหรับหาปริมาณ %DRC ที่ได้จากการสอนโครงข่าย และ สรุปผลรวมของวิทยานิพนธ์

5.1.1 แบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณ %DRC

แบบจำลองที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC ในบทที่ 4 โดยสรุปแยกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ใช้ชุดข้อมูลค่า P3-P6 จากผลวัดน้ำยางชั้นเจือจางด้วยวงจรถกพอร์ต ขณะป้อนความถี่ให้วงจรถกพอร์ต 1,2 และ 3 ค่าความถี่ตามลำดับ

1) แบบจำลองทำนายจากชุดข้อมูล 1 ความถี่

ในกรณีใช้ชุดข้อมูลขณะป้อนความถี่ 1 ความถี่ให้วงจรถกพอร์ตเพื่อพัฒนาแบบจำลองทำนาย %DRC ด้วยวิธีการสอนโครงข่าย จากบทที่ 4 ในตารางที่ 4.5 นำมาเขียนใหม่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ โดยเอาผลการสอนเฉพาะกรณีป้อน 1 ค่าความถี่ให้วงจรถกพอร์ต แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมรรถนะของแบบจำลอง 1 ความถี่

Mode	Frequency (GHz)	MSE			R			Algorithm
		Training	Validating	Testing	Training	Validating	Testing	
Single Frequency	1	1.0775	-	1.0668	0.997	-	0.997	BRA
		1.0241	1.1179	1.0536	0.9971	0.9969	0.997	LMA
		3.8026	3.712	3.8842	0.9893	0.9894	0.9889	SCG
	1.5	1.5609	-	1.5491	0.9956	-	0.9956	BRA
		6.8889	8.117	7.6581	0.9805	0.9767	0.9785	LMA
		8.8126	10.2214	8.457	0.975	0.971	0.9757	SCG
	2.16	1.3293	-	1.3073	0.9963	-	0.9963	BRA
		1.5326	1.5034	1.5072	0.9957	0.9958	0.9958	LMA
		4.2025	4.1611	4.2602	0.9882	0.9881	0.9879	SCG

จากตารางที่ 5.1 พบว่า แบบจำลองใช้อัลกอริทึม LMA จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ซึ่งให้ค่าความผิดพลาด MSE ของการฝึก การตรวจสอบ และ การทดสอบ เป็น 1.0241, 1.1179 และ 1.0536 ตามลำดับ และ ค่า Regression ของการฝึก การตรวจสอบ และ การทดสอบเป็น 0.9971, 0.9969 และ 0.9970 ตามลำดับ

2) แบบจำลองทำนายจากชุดข้อมูล 2 ความถี่

ผลการพัฒนาแบบจำลอง 2 ค่าความถี่แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สมรรถนะของแบบจำลอง 2 ความถี่

Mode	Frequency (GHz)	MSE			R			Algorithm
		Training	Validating	Testing	Training	Validating	Testing	
Dual frequency	1,1.5	0.2579	-	0.2726	0.9993	-	0.9993	BRA
		0.3784	0.3858	0.3789	0.9989	0.9989	0.9989	LMA
		1.0363	1.0071	1.0101	0.9971	0.9972	0.9971	SCG
	1,2.16	0.2244	-	0.2312	0.9994	-	0.9994	BRA
		0.2552	0.2644	0.2622	0.9993	0.9993	0.9993	LMA
		1.2729	1.2944	1.2775	0.9964	0.9964	0.9964	SCG
	1.5,2.16	0.2853	-	0.2901	0.9992	-	0.9992	BRA
		0.3035	0.3106	0.3145	0.9992	0.9991	0.9991	LMA
		0.8499	0.8483	0.8548	0.9976	0.9976	0.9976	SCG

จากตารางที่ 5.2 แบบจำลองที่พัฒนาจากชุดข้อมูลความถี่ 1 GHz และ 2.16 GHz ที่ใช้อัลกอริทึม BRA จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ค่าความผิดพลาด MSE ของการฝึก และการทดสอบ เป็น 0.2244 และ 0.2312 ตามลำดับ และ ค่า Regression ของการฝึก และการทดสอบเป็น 0.9994 ทั้ง 2 ค่า

3) แบบจำลองทำนายจากชุดข้อมูล 3 ความถี่

ผลการพัฒนาแบบจำลอง 3 ความถี่แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สมรรถนะของแบบจำลอง 3 ความถี่

Mode	Frequency (GHz)	MSE			R			Algorithm
		Training	Validating	Testing	Training	Validating	Testing	
Triple frequency	1,1.5,2.16	0.1224	-	0.1264	0.9997	-	0.9997	BRA
		0.1411	0.1456	0.1461	0.9996	0.9996	0.9996	LMA
		0.526	0.5377	0.5426	0.9985	0.9985	0.9985	SCG

จากตารางที่ 5.3 พบว่า แบบจำลองจากชุดข้อมูล 3 ความถี่ที่พัฒนาจากอัลกอริทึม BRA จะได้ประสิทธิภาพดีที่สุด ค่าความผิดพลาด MSE ของการฝึก และการทดสอบ เป็น 0.1224 และ 0.1264 ตามลำดับ และ ค่า Regression ของการฝึก และการทดสอบเป็น 0.9997 ทั้ง 2 ค่า

5.1.2 การเปรียบเทียบทุกแบบจำลอง

จากผลการทดสอบแบบจำลองทำนาย %DRC ในตารางที่ 4.5 สามารถแยกได้ 3 กรณี คือ ใช้ชุดข้อมูลจาก 1,2 และ 3 ค่าความถี่ในการสอนแบบจำลองทำนาย %DRC และได้แบบจำลองทำนาย %DRC ทั้งหมด 7 แบบจำลอง แบบจำลองที่มีค่า Regression สูงมักมีค่าความผิดพลาด MSE ต่ำ โดยแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพต้องมีค่า Regression สูงใกล้เคียงกับ 1 เนื่องจากผลการทำนาย %DRC ที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับค่า %DRC ที่แท้จริง และ ค่าความผิดพลาด MSE ต่ำ เนื่องจากแบบจำลองที่ได้มีผลทำนาย %DRC ที่ผิดเพี้ยนจากค่า %DRC ที่ใช้สร้างน้อย ประกอบกับผลการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า แบบจำลองจากชุดข้อมูล 3 ความถี่จะดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับข้อเสนอแนะทั้งหมดที่ควรระวัง คือ ขั้นตอนระหว่างการเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟ เพื่อใช้จ่ายให้วงจรถูกพอร์ทในทุกครั้ง โดยจะต้องดำเนินการสองขั้นตอน คือ การแมทซิ่งอิมพีแดนซ์วงจรถูกพอร์ท และ การเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้จ่ายให้วงจรถูกพอร์ท

5.2.1 การแมทซิ่งอิมพีแดนซ์วงจรถูกพอร์ท

เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟที่จ่ายให้วงจรถูกพอร์ททุกครั้ง จะต้องทำการแมทซิ่งอิมพีแดนซ์ ระหว่างวงจรถูกพอร์ทกับแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟที่แทนที่ด้วยโหลด 50 โอห์ม ก่อนเสมอ เพื่อให้กำลังงานจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ไมโครเวฟส่งผ่านวงจรถูกพอร์ทไปยังตัวอย่างน้ำอย่างขึ้นเงาจน ขณะทดสอบวัดที่ความถี่ไมโครเวฟที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อค้นพบในงานวิจัยนี้คือ ค่า Return loss หลังจากแมทซิ่งแล้วควรต่ำกว่า -20 dB

5.2.2 การเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้จ่ายให้วงจรถูกพอร์ท

เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟที่จ่ายให้วงจรถูกพอร์ท ผู้วิจัยต้องทำการตั้งค่าความถี่วงจรถูกพอร์ทที่ ADF4351 ใหม่ โดยต้องกำหนดค่าความถี่ในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ สำหรับงานวิจัยนี้ทดสอบที่ความถี่ 1000 MHz (1GHz) , 1500 MHz (1.5GHz) และ 2160 MHz (2.16GHz)

5.3 งานวิจัยในอนาคต

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงสิ่งที่สามารถต่อยอดในอนาคต เพื่อสร้างงานให้ประยุกต์ใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ และ เพื่อขยายความรู้ ซึ่งมี 2 ส่วนได้แก่ การเพิ่มผลการทดสอบแบบจำลองทำนาย %DRC กับตัวอย่างน้ำอย่างสด และ การทดสอบจ่ายค่าความถี่ค่าอื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้ดำเนินการไปในงานวิจัย

5.3.1 การเพิ่มผลการทดสอบแบบจำลองทำนาย %DRC กับตัวอย่างน้ำอย่างสด

เป็นการนำแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัย หรือ ใช้ข้อมูลจากตัวอย่างน้ำอย่างสดแทนการใช้ตัวอย่างขึ้นเงาจนไปสร้างแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

สำหรับการนำแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยไปใช้กับน้ำอย่างสด โดยตรงผู้วิจัยต้องทำการหาค่าชดเชยแบบจำลองทำนาย %DRC ของน้ำอย่างขึ้นเงาจน ส่วนอีกวิธี คือ การใช้ข้อมูลจากตัวอย่างน้ำอย่างสดแทนการใช้ตัวอย่างขึ้นเงาจนในสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการสอนโครงข่าย ทั้ง 2 วิธีการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อนำไปวัดค่า %DRC ของน้ำอย่างสด และ ต่อยอดไปใช้งานในเชิงพาณิชย์

5.3.2 การทดสอบจ่ายค่าความถี่ค่าอื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้ดำเนินการไปในงานวิจัย

โดยอาจป้อนคลื่นความถี่ไมโครเวฟอื่น ๆ ให้วงจรหกพอร์ต เพื่อวัดตัวอย่างน้ำยาง โดยมีวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่า P3-P6 ที่ความถี่อื่น ๆ และ ได้จำนวนชุดข้อมูลสำหรับที่มากขึ้น และคาดว่าจะให้แบบจำลองที่เที่ยงตรงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักหอสมุด และ ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ, “การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติ ในอุตสาหกรรม,” 2559.
- [2] P. Sunheem, “Development of Methodology and Instrument for Measuring Dry Rubber Content in Latex Using Microwave Techniques,” p. 116, 2015.
- [3] M. M. Ghretli, K. Khalid, I. V. Grozescu, Mohd. H. Sahri, and Z. Abbas, “Dual-Frequency Microwave Moisture Sensor Based on Circular Microstrip Antenna,” *IEEE Sensors J.*, vol. 7, no. 12, pp. 1749–1756, Dec. 2007, doi: 10.1109/JSEN.2007.908920.
- [4] S. Julrat, M. Chongcheawchamnan, T. Khaorapapong, O. Patarapiboolchai, M. Kririksh, and I. D. Robertson, “Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application,” *IEEE Sensors J.*, vol. 12, no. 10, pp. 3019–3030, Oct. 2012, doi: 10.1109/JSEN.2012.2208454.
- [5] K. Khalid, J. Hassan, and W. D. W. Yusef, “Dielectric phenomena in hevea rubber latex and its applications,” in *Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Seoul, South Korea, 1997, vol. 1, pp. 78–81. doi: 10.1109/ICPADM.1997.617532.
- [6] เมธิกา อำนาจเจริญพร และ สมบูรณ์ เจริญจิระตระกูล, “ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำยางสดของเกษตรกรชาวสวนยางในเขตอำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา,” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, 2553.
- [7] อติศัย รุ่งวิชานีวัฒน์ และ เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์, “อิทธิพลของการแช่ยางดิบในสารละลายต่างต่อสมบัติของยางแห้ง,” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, 2546.
- [8] สุวดี ก้องพารากุล, “เทคโนโลยีการตัดแปรรยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้,” *KKU Sci. J.* 41(3), pp. 567–581, 2013.
- [9] สุกฤทธิรา รัตน์วิไล และ คณะ, “การพัฒนากาวสำหรับใช้ในงานติดไม้ยางพาราจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์,” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, 2550.
- [10] L. M. K. Tillekeratne, L. Karunanayake, P. H. Sarath Kumara, and S. Weeraman, “A rapid and accurate method for determining the dry rubber content and total solid

content of NR latex,” *Polymer Testing*, vol. 8, no. 5, pp. 353–358, Jan. 1988, doi: 10.1016/0142-9418(88)90052-9.

[11] จันสุตา บุตรสีห์, “การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด,” *1. การใช้ไมโครแลค (Metrolac)*, 2012. http://pnpandbest.com/rubber/pnp_book/pnp_book07.html

[12] Z. Zhao, X. Jin, L. Zhang, and X. Yu, “A novel measurement system for dry rubber content in concentrated natural latex based on annular photoelectric sensor,” *Int. J. Phys. Sci.*, p. 10.

[13] P. Kerdthongmee, C. Pumdang, and S. Danworaphong, “Quantifying Dry Rubber Content in Latex Solution Using an Ultrasonic Pulse,” *Measurement Science Review*, vol. 14, no. 5, pp. 252–256, Oct. 2014, doi: 10.2478/msr-2014-0034.

[14] R. R. Kumar, S. N. Hussain, and J. Philip, “Measurement of Dry Rubber Content of Natural Rubber Latex with a Capacitive Transducer,” p. 9.

[15] P. E. S. T. Jayanthi, “Measurement of Dry Rubber Content in Latex Using Microwave Technique,” *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 5, Section 3, 2005*, vol. 2005, no. Volume 5, pp. 50–54.

[16] V. Bilik, “SIX-PORT MEASUREMENT TECHNIQUE: PRINCIPLES, IMPACT, APPLICATIONS,” p. 32.

[17] S. Somwong and M. Chongcheawchamnan, “A Portable System for Rapid Measurement of Dry Rubber Content With Contaminant Detection Feature,” *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 20, pp. 8329–8337, Oct. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2865478.

[18] ธนาวุฒิ ประกอบผล, “โครงข่ายประสาทเทียม,” *วารสาร มฉก.วิชาการ ปีที่ 12 ฉบับที่ 24 มกราคม - มิถุนายน*, pp. 73–87, 2552.

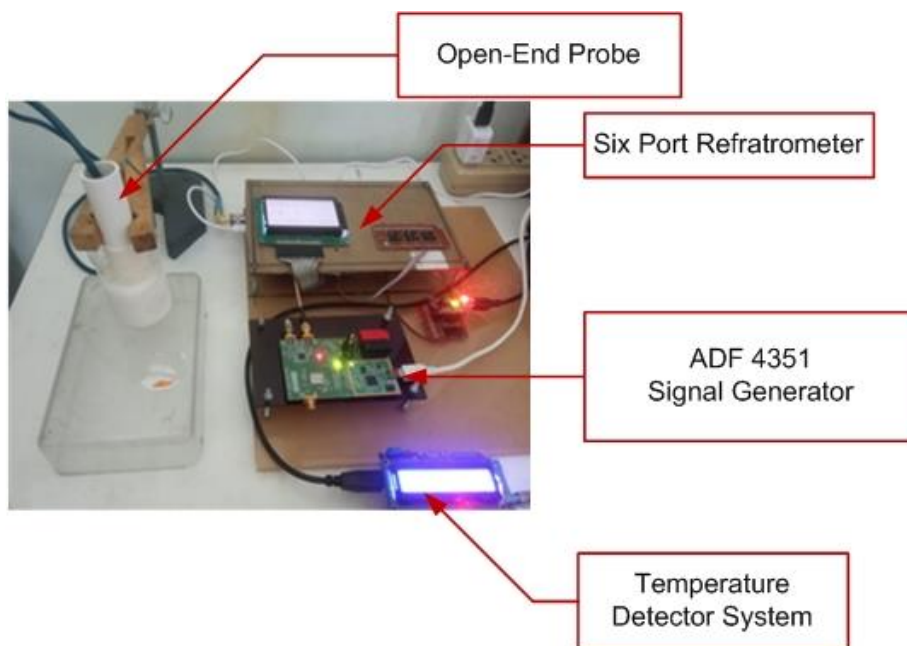
[19] ศุภโชค แสงสว่าง, “การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับงานทางด้านเกษตร,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26*, vol. 2, pp. 319–331, 2559.

[20] J. Zupan, “Introduction to Artificial Neural Network (ANN) Methods: What They Are and How to Use Them,” *Acta Chimica Slovenica*, vol. 41, Jan. 1994.

[21] MathWorks Help Center, “Fit Data with a Shallow Neural Network.”
<https://www.mathworks.com/help/deeplearning/gs/fit-data-with-a-neural-network.html>

ภาคผนวก ก

องค์ประกอบของระบบวัด %DRC แบบหลายความถี่



รูปที่ ก.1 องค์ประกอบของระบบวัด %DRC แบบหลายความถี่

จากรูปที่ ก.1 แสดงองค์ประกอบของระบบวัด %DRC แบบหลายความถี่ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 องค์ประกอบ

1. โพรบปลายเปิด (Open-End Probe)

โพรบปลายเปิดใช้สำหรับรับคลื่นไมโครเวฟจากวงจรถูกพอร์ต โดยต่อที่พอร์ต P2 ของวงจรถูกพอร์ต เพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟไปตกกระทบน้ำยางทดสอบ และ รับกำลังงานคลื่นสะท้อนจากตัวอย่างน้ำยางทดสอบ ที่มีค่ากำลังงานสะท้อนตามค่า %DRC กลับไปให้วงจรถูกพอร์ตที่พอร์ตเดียวกัน (พอร์ต P2)

2. วงจรถูกพอร์ต (Six Port Reflectometer)

วงจรถูกพอร์ตเป็นวงจรหลักสำหรับงานวิจัยนี้ มีหน้าที่สำคัญ 3 ประการ

- 2.1 ทำหน้าที่รับกำลังงานจากแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ ณ พอร์ต P1 เพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟไปตกกระทบน้ำยางทดสอบ
- 2.2 รับกำลังงานสะท้อนจากโพรบปลายเปิด ณ พอร์ต P2 และ ส่งออกเป็นเอาต์พุตกำลังงานสะท้อนที่พอร์ต P3-P6
- 2.3 ทำหน้าที่แปลงกำลังงานคลื่นสะท้อนให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้สำหรับประมวลผลด้วยสมองกลแบบฝังตัว และ สร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC

3. โมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 (ADF4351)

โมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหลายค่าความถี่ที่สามารถโปรแกรมค่าความถี่ได้ในช่วง 35 MHz -4.4 GHz ในงานวิจัยนี้นำมาต่อเข้ากับพอร์ต P1 ของวงจรถูกพอร์ต เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายคลื่นไมโครเวฟให้วงจรถูกพอร์ต

4. ระบบตรวจอุณหภูมิ (Temperature Detector System)

ระบบตรวจอุณหภูมิ ทำหน้าที่ตรวจสอบค่าอุณหภูมิของน้ำยางทดสอบก่อนนำไปวัดด้วยวงจรถูกพอร์ต โดยผู้วิจัยใช้ตัวตรวจรู้ DS18B20 เป็นตัวตรวจรู้อุณหภูมิ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 เป็นตัวอ่านค่า ประมวลผล และ แสดงค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสผ่านจอแอลซีดี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล ศรัณย์ ตันติวิทย์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6210120011

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์)	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2562

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. S. Tantiwit, S. Somwong and M. Chongcheawchamnan, "Dual-Frequency Six-Port Reflectometer Technique for Quality Determination of Para Rubber Latex," 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/iEECON53204.2022.9741637.