



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการประยุกต์เทคนิคไมโครเวฟ และการประมวลสัญญาณดิจิทัล สำหรับน้ำยางและปาล์มน้ำมัน

โดย รองศาสตราจารย์ มิตรชัย จงเชี่ยวชำนาญานู

สิงหาคม 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการประยุกต์เทคนิคไมโครเวฟและการประมวลสัญญาณ
ดิจิทัลสำหรับน้ำยางและปาล์มน้ำมัน

MICROWAVE/SIGNAL PROCESSING APPLICATIONS FOR RUBBER LATEX
AND OIL PALM FRUIT

รองศาสตราจารย์ มิตรชัย จงเชื้อวานานาญ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อ	II
Abstract	III
บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
โครงการวิจัยย่อย เรื่อง การตรวจรู้สสารแปลกปลอมในน้ำยางสด	3
โครงการวิจัยย่อยเรื่อง การคัดแยกผลปาล์มและการประเมินหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์ม	33
โครงการวิจัยย่อยเรื่อง การนึ่งผลปาล์มสำหรับโรงงานขนาดเล็ก	52
ผลผลิตสำคัญของโครงการ	74
ภาคผนวก	76

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยในโครงการนี้ทั้งสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายวิชาการ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต้นสังกัดของผู้วิจัยที่สนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดี ทั้งการเข้าใช้ครุภัณฑ์ งบประมาณในการสนับสนุนงานวิจัยในช่วงเริ่มต้น และสถานที่ทำวิจัย ขอขอบคุณ โครงการยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสริเริ่มงานวิจัยด้านยางพารา รวมถึงคุณปรีเปรม ทศน์กุล นักวิชาการ จากศูนย์วิจัยยาง จังหวัดสงขลา ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ ความรู้ และการสนับสนุนในด้านเครื่องมือและบุคลากรในการทำงานวิจัยครั้งนี้

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RSA5680056

ชื่อโครงการ : การประยุกต์เทคนิคไมโครเวฟและการประมวลสัญญาณดิจิทัลสำหรับ น้ำยางและ
ปาล์มน้ำมัน

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน: มิตรชัย จงเขียวชำนานู มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

E-mail Address : mitchai.c@psu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

คำหลัก: ไมโครเวฟ, การประมวลสัญญาณภาพ, น้ำยาง, ปาล์มน้ำมัน, การให้ความร้อน

ชุดโครงการนี้นำเสนอเทคนิคไมโครเวฟและการประมวลสัญญาณดิจิทัลเพื่อประยุกต์กับน้ำยางและผลปาล์ม โครงการย่อยสามโครงการในชุดโครงการมีจุดประสงค์สำคัญดังนี้ (1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถตรวจสอบวัสดุสารที่ไม่ใช่เนื้อยางในน้ำยางได้ (2) เพื่อพัฒนาเทคนิคที่สามารถคัดแยกกระต๊อบความสุกและหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันของผลปาล์ม และ (3) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปาล์มเพื่อนำไปออกแบบระบบหนึ่งปาล์มด้วยเทคนิคไมโครเวฟ ผลผลิตของโครงการที่ได้คือ (1) เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์น้ำยาง (DRC) แบบพกพาได้แบบฉลาดสามารถประเมินค่า DRC ของน้ำยาง แม้น้ำยางนั้นจะมีการเติมปูนขาวหรือแป้งมันสำปะหลัง (2) เครื่องประเมินระดับความสุกและเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์มอัตโนมัติ และ (3) การออกแบบระบบไมโครเวฟหนึ่งปาล์มแบบสายพานลำเลียง

Abstract

Project Code : RSA5680056

Project Title : Microwave/Signal Processing Applications for Rubber Latex and Oil Palm Fruit

Investigator : Mitchai CHONGCHEAWCHAMNAN Prince of Songkla University

E-mail Address : mitchai.c@psu.ac.th

Project Period : 2 Years

Keywords : Microwave, image processing, rubber latex, oil palm, heating

This research presents a microwave/signal processing technique which applies to rubber latex and oil palm fruit. Three subprojects are (1) to develop a mathematical model to detect extraneous materials in fresh rubber latex (2) to develop a technique to classify ripeness degree and determine oil extraction rate for palm fruit and (3) to develop a mathematical model for palm fruit and palm bunch to design a microwave sterilization system for a small-scale mill. Three main outputs from these subprojects are (1) a portable DRC measurement system equipped with a smart algorithm that accurately determines DRC of latex even the latex is contaminated with powder or potassium carbonate (2) a portable system that automatically determine oil extraction rate and ripeness degree for palm fruit and (3) a design of a continuous-belt sterilization system for oil palm based on microwave heating technique.

บทนำ

ยางพาราและปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญและภาคใต้และประเทศไทย โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยที่เป็นสหวิทยาการ โดยมีสาขาหลักคือสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ด้านไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ ร่วมกับสาขาวิศวกรรมเคมี สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และสาขา ฟิสิกส์ โครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย โครงการย่อยจำนวน 3 โครงการ ได้แก่

1) โครงการย่อยการตรวจรูสสารแปลกปลอมในน้ำยาง

การซื้อขายน้ำยางที่ผ่านพ่อค้าคนกลางและในตลาดรับซื้อน้ำยาง เช่น สหกรณ์ชาวสวนยาง ซึ่งราคาน้ำยางขึ้นกับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง (Dry rubber content : DRC) ที่บ่งชี้ถึงคุณภาพน้ำยาง ซึ่งมีความต้องการด้านเครื่องมือวัดคุณภาพของน้ำยางที่แม่นยำ เทียบตรง และแก้ปัญหาเรื่องการเติมสารที่ไม่ใช่ในน้ำยางในน้ำยาง โดยเน้นสารเติมที่เป็นสารนิยมจำนวน 2 สารได้แก่ ปูนขาว และ แป้งมันสำปะหลัง

2) โครงการย่อยการการคัดแยกผลปาล์มและการประเมินหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์ม

เกษตรกรจะนำผลและทะลายปาล์มไปที่ลานเทปาล์มซึ่งเป็นจุดรับซื้อปาล์ม ขั้นตอนการคัดแยกระดับความสุกของทะลายปาล์มที่ลานเทปาล์มจะขึ้นกับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญที่ประจำที่ลานเทซึ่งมีความไม่แน่นอนสูง ขณะที่โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจะมีการตรวจวัดปริมาณน้ำมันจากผลผลิตปาล์มที่ต้องกินเวลานานและราคาแพง การกำหนดราคาที่เป็นธรรมต่อผู้ซื้อและผู้ขายโดยต้องคัดแยกผลผลิตคุณภาพได้ในเวลารวดเร็ว แม่นยำ เทียบตรง และราคาถูก จึงมีความต้องการเครื่องมือคัดแยกและวัดเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์มแบบอัตโนมัติ

3) โครงการย่อยการนึ่งผลปาล์มสำหรับโรงขนาดเล็ก

โรงผลิตน้ำมันปาล์มขนาดเล็กจะใช้ต้องมีการยางผลปาล์มเพื่อไล่ความชื้นในผลปาล์ม ความร้อนจะยับยั้งกระบวนการทำงานของเอ็นไซม์ไลเปสซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระมาก การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการลดของเสียที่มาจากกระบวนการยางปาล์มเป็นโจทย์ข้อหนึ่งที่ต้องการองค์ความรู้ในการแก้ปัญหาสำหรับโรงขนาดเล็กที่มีงบประมาณไม่มาก

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งสามโครงการวิจัยย่อยมีโจทย์วิจัยตั้งต้นชัดเจนซึ่งมาจากปัญหาและความต้องการจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และมีผู้ใช้ประโยชน์จากโครงการที่ชัดเจน ผลจากการใช้องค์ความรู้ในการแก้ปัญหาทั้งสามสาขาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนำไปสู่การประดิษฐ์คิดค้นเครื่องมือวัดที่ทันสมัยจำนวน 2 เครื่องมือเพื่อแก้ปัญหาด้านการซื้อขายน้ำยางและการซื้อขายปาล์มน้ำมัน และแนวทางวิชาการในการออกแบบเครื่องนึ่งเทคนิคไมโครเวฟที่สนับสนุนกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่จะทำให้ได้คุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบที่ต้องการ

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้แยกตามโครงการย่อย 3 โครงการ ดังนี้

1) โครงการย่อยการตรวจรู้สสารแปลกปลอมในน้ำยาง

1.1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถตรวจรู้สสารไม่ใช่ยางในน้ำยาง

1.2) เพื่อบูรณาการแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาแล้วกับเครื่องวัด DRC เพื่อสามารถตรวจวัด DRC ที่รับรู้ว่ามีสสารไม่ใช่ยางในน้ำยาง

2) โครงการย่อยการการคัดแยกผลปาล์มและการประเมินหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์ม

2.1) พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคัดแยกระดับความสุกและประเมินเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์ม

2.2) พัฒนาเครื่องมือที่สามารถวัดระดับความสุกและประเมินเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์มแบบพกพาได้

3) โครงการย่อยการนึ่งผลปาล์มสำหรับโรงขนาดเล็ก

พัฒนาแบบจำลองและทำระบบนึ่งปาล์มด้วยไมโครเวฟสำหรับโรงขนาดเล็ก

โครงการวิจัยย่อย

การตรวจรู้สสารแปลกปลอมในน้ำยางสด

1. เกริ่นนำ

1.1 การรับซื้อน้ำยาง

น้ำยางที่ได้จากการกรีดยางจะมีส่วนประกอบของน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 50-80 เนื้อยางแห้งร้อยละ 25-45 และส่วนอื่นที่ไม่ใช่ยางอีกประมาณร้อยละ 2-5 [1] น้ำยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 30-40 ค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7 มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตรและความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ [2] น้ำยางสดที่กรีดยางได้จากต้นยาง จะคงสภาพความเป็นน้ำยางอยู่ได้ไม่เกิน 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โปรตีนน้ำตาล ฟอสโฟไลปิด โดยแบคทีเรียจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นหลังจากแบคทีเรียกินสารอาหาร คือ จะเกิดการย่อยสลายได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน เริ่มเกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็น การที่มีกรดที่ระเหยง่ายเหล่านี้ในน้ำยางเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า pH ของน้ำยางเปลี่ยนแปลงลดลงและน้ำยางสูญเสียสภาพ ซึ่งสังเกตได้จาก น้ำยางจะค่อยๆ หนืดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ และจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้น ดังนั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพของน้ำยางไม่ให้อนุภาคของเม็ดยางเกิดการรวมตัวกันเองตามธรรมชาติ จึงมีการใส่สารเคมีลงไปในน้ำยางเพื่อป้องกันการจับตัว (Anticoagulant) ทำให้เก็บรักษาน้ำยางให้คงสภาพเป็นของเหลว อาทิ สาร แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ เพื่อที่รักษาน้ำยางไม่ให้สูญเสียสภาพ

เฉพาะส่วนเนื้อยางแห้งเท่านั้นที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ น้ำยางสดสามารถนำไปแปรรูปได้หลากหลายชนิดทั้งในรูปน้ำยางข้นและยางแห้ง อาทิ ยางแท่ง ยางแผ่นดิบ ยางแผ่นรมควัน ยางก้อนถ้วย ยางเครพ ในน้ำยางมีอนุภาคยางขนาด 0.05 - ไมโครเมตร 5 [2] อนุภาคเล็กเหล่านี้จะรวมกันเป็นกลุ่มและปริมาณกลุ่มเหล่านี้เป็นตัวแทนของค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) ที่เป็นตัวบ่งชี้พื้นฐานถึงคุณภาพของน้ำยางสด ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมการเพาะปลูกทำให้ผลผลิตแต่ละที่ได้ DRC ไม่เท่ากัน ซึ่งในตลาดซื้อขายน้ำยาง ราคา น้ำยางสดขึ้นอยู่กับค่า DRC น้ำยางสดที่มีค่า DRC มากก็จะได้ราคาสูงตามส่วน

วิธีการหาค่า DRC ในปัจจุบันที่นิยมใช้กันมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีมาตรฐาน วิธีวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง และวิธีวัดน้ำหนักก่อนและหลังจากอบแห้งแล้วด้วยไมโครเวฟ ซึ่งทั้ง 3 วิธีต่างมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

1) วิธีมาตรฐานเป็นวิธีที่ต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการ โดยมีมาตรฐานที่ยอมรับได้ในระดับสากล (ISO 126:1972 Dry rubber content, BS 1672: part 1:1950 and ASM D 1076-80) กระบวนการวัดในวิธีนี้เริ่มจากการนำตัวอย่างน้ำยางผสมกับกรดอะซิติก (2%) เพื่อทำให้น้ำยางเป็นแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบให้แห้ง วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งคำนวณจาก ผลต่างของน้ำหนักของน้ำยางก่อนผสมกรดและหลังอบ ข้อดีของกระบวนการนี้คือผลที่ได้จะเป็นค่า DRC แม่นยำที่สุด แต่ข้อเสียคือ ต้องการทักษะความชำนาญและใช้เวลานาน

2) วิธีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง โดยเครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง เรียกว่า “เมโทรแลค” วิธีนี้将有ความแม่นยำของ DRC อยู่ในช่วงร้อยละ 32-38 เท่านั้น

เครื่องมือเมโทรแลคนี้จะอ่านค่าเพี้ยนไปโดยสูงกว่าค่าจริงหาก DRC ของน้ำยางที่วัดสูงกว่าร้อยละ 38 ในทำนองเดียวกัน หากน้ำยางมี DRC ต่ำกว่าร้อยละ 32 เครื่องมือเมโทรแลคก็จะอ่านได้น้อยกว่า [3] ตัวเครื่องมือเมโทรแลคเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดหา DRC โดยอาศัยค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนก้านและส่วนกระเปาะ ที่ก้านจะมีขีดกำหนดค่าเนื้อยางแห้งไว้บอกค่าในหน่วยกรัมต่อลิตร ขีดแสดง DRC ต่ำจะอยู่ด้านล่างขณะที่ขีดสูงจะอยู่ด้านบนของก้าน น้ำยางที่มี DRC สูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำยางที่มี DRC ต่ำ กลุ่มเกษตรกรนิยมใช้เครื่องมือนี้กันมากเนื่องจากสามารถหาค่า DRC ได้รวดเร็วกว่าวิธีแบบมาตรฐาน ทั้งที่เครื่องมือนี้ไม่แม่นยำและความน่าเชื่อถือต่ำ

3) วิธีวัดน้ำหนักก่อนและหลังจากอบแห้งแล้วด้วยไมโครเวฟ [4]-[6] วิธีนี้เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มเกษตรกร โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรก ผู้ทดสอบจะกวนน้ำยางที่ต้องการวัดให้ทั่ว จากนั้นจึงตักน้ำยางส่วนหนึ่งไปชั่งด้วยตาชั่งละเอียดและบันทึกน้ำหนัก นำตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟจนแห้งและเหลือแต่เศษผง ซึ่งน้ำหนักผงสารที่เหลือจากการอบแห้งและคำนวณสัดส่วนค่าน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังอบ ทั้งนี้ น้ำหนักหลังอบอาจถูกปรับให้ลดลงเพื่อให้สำหรับสารเจือที่ไม่ใช่ยางแห้งซึ่งอาจมีกรดซัลฟริก แอมโมเนีย สารแปลกปลอม เป็นต้น ค่าอัตราส่วนน้ำหนักหลังอบและก่อนอบจะคิดเป็นร้อยละและเป็นค่าปริมาณของแข็ง (Total Solid Content) การวัดคุณภาพน้ำยางสดในวิธีที่ใช้กันอยู่ในตลาดกลางเป็นรูปแบบที่ล้าตามวิธีการวัดเนื้อยางแห้งในน้ำยางมาตรฐาน แต่มีความรวดเร็วกว่า และมีความแม่นยำกว่าวิธีเมโทรแลค อย่างไรก็ตาม ข้อแตกต่างที่สำคัญคือ ผลลัพธ์จากวิธีมาตรฐานจะมีเฉพาะยางแห้ง ขณะที่ผลลัพธ์จากวิธีอบนี้จะเป็นยางแห้งและส่วนเจือที่ไม่ใช่ยาง

วิธีวัดคุณภาพน้ำยางสดที่ใช้กันอยู่ในตลาดซื้อขายคล้ายคลึงกับวิธีมาตรฐานสำหรับวัดเนื้อยางแห้งในน้ำยาง อย่างไรก็ตาม วิธีมาตรฐานจะวัดเฉพาะยางแห้งแต่วิธีในตลาดซื้อขาย (เมโทรแลค และการอบด้วยไมโครเวฟ) จะวัดทั้งยางแห้งและสารอื่นๆ ที่ปนในน้ำยาง นอกจากนี้ ความแตกต่างของวิธีการมาตรฐานและวิธีวัดในตลาดซื้อขายคือขั้นตอนการวัดรวมถึงห้องปฏิบัติการที่ต้องควบคุมตามมาตรฐาน วิธีมาตรฐานนั้นแม้จะน่าเชื่อถือแต่นำมาใช้ในตลาดซื้อขายน้ำยางไม่ได้เลยเพราะใช้เวลานาน ต้องการห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือราคาแพง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง ทำให้การวัดคุณภาพในตลาดซื้อขายปัจจุบันจำเป็นต้องใช้เครื่องมือเมโทรแลคและการอบด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากทั้งสองวิธีวัดที่ใช้ไม่แม่นยำ ผู้รับซื้อน้ำยางจึงเพื่อส่วนต่างค่าที่วัดได้ ซึ่งทำให้เกษตรกรอาจไม่ได้รับความเป็นธรรม

1.3 ปัญหาสารปลอมปน

ปัจจุบันมีเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราบางรายจงใจใส่สารปลอมปนลงในน้ำยางเพื่อหวังที่จะเพิ่มน้ำหนักน้ำยางและคิดว่าจะขายได้ราคาเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเขตปลูกยางใหม่ทั้งในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สิ่งปลอมปนที่เกษตรกรแอบเติมลงไปในน้ำยางมีหลายชนิด มีทั้งสารที่เป็นของแข็งและมีสีขาวที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับยางแห้ง ได้แก่ แป้ง ปูนขาว ปูนซีเมนต์ ยิปซัม [7] บางรายต้องการเพิ่มน้ำหนักของน้ำยางจึงจงใจเติมของเหลวที่สกัดจาก เช่น น้ำหมัก

ชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และยังคงคาดว่าจะสามารถทดแทนการใช้กรดฟอร์มิคที่ช่วยในการจับตัว [7] นอกจากนี้ยังมีการใส่เปลือก ทราย ก้อนหิน เศษยางที่ใช้แล้ว หรือยางที่ผ่านการผสมสารเคมีที่เรียกว่า ยางตาย ผสมเข้ากับยางก้อน โดยหวังให้ได้น้ำหนักมากขึ้นเพื่อจะขายได้เงินเพิ่มขึ้น ในบางกรณี พบเกษตรกรเติมแอมโมเนียสำหรับการรักษาสภาพน้ำยางในปริมาณมากเกินไป ส่งผลต่อความเสถียรของน้ำยางเช่นกัน ดังนั้นการเติมสิ่งเจือปนเหล่านี้ลงในน้ำยาง ย่อมส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของยาง และส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตยางประเภทอื่นๆ เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่น ยางก้อน รวมไปถึงส่งผลเสียต่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากจำเป็นต้องใช้น้ำยางสดที่สะอาดไร้สิ่งเจือปนมาแปรรูป การเติมสิ่งปลอมปนลงในน้ำยางย่อมส่งผลเสียต่อการนำยางแผ่นดิบไปผลิตเป็นยางแผ่นรมควันและยางก้อนถ้วยที่จะนำไปผลิตเป็นยางแท่ง ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ยางที่จะนำไปใช้ทั้งความยืดหยุ่น ความทนทานต่อการสึกหรอ ความทนต่อแรงดึง ความเหนียวและการสะสมความร้อน

ปัจจุบันการตรวจสอบสิ่งปลอมปน และการวัด DRC เป็นวิธีการที่กระทำแยกจากกัน ยังไม่สามารถตรวจวัดพร้อมกันได้ ส่งผลต่อโรงงานรับซื้ออาจได้น้ำยางสดมีคุณภาพหรือไม่มีคุณภาพ ซึ่งไม่สามารถรู้ได้ทันที ณ จุดรับซื้อน้ำยางสด กระบวนการหรือวิธีการตรวจสอบสิ่งเจือปนในน้ำยางทำได้โดยการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี (สี กลิ่น การตกตะกอน เป็นต้น) เช่น การตรวจหาปริมาณตะกอนหรือสลัดจ์ [8] เป็นสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่ยาง ประกอบด้วยสิ่งสกปรกจำพวกฝุ่น ทราย เปลือกไม้ และแมกนีเซียมแอมโมเนียฟอสเฟต จะตกตะกอนอยู่ที่ก้นภาชนะที่บรรจุ ปัจจุบันใช้วิธีการที่อ้างอิงจาก [8] ISO 2005-1992 Rubber Latex, natural, concentrate Determination of sludge content ซึ่งเป็นวิธีการที่ยุ่งยากและไม่ค่อยแม่นยำ หากทราบปริมาณตะกอนหรือสลัดจ์ ผู้ใช้น้ำยางข้นก็สามารถนำไปใช้งานได้เหมาะสม ดังนั้น ตลาดซื้อขายต้องการเครื่องมือวัด DRC แบบอัตโนมัติและเครื่องควรมีความฉลาดพอที่จะไม่แสดงผลค่า DRC ในน้ำยางที่มีสสารที่มีสสารปลอมปนมากเกินไปเกณฑ์ที่กำหนดไว้

2. ทฤษฎีหลักการของงานวิจัย

2.1 กรอบวิจัย

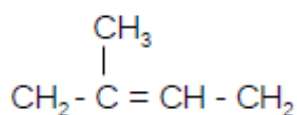
หลักการเครื่องมือวัดค่า DRC เดิมที่ผู้วิจัยมีสามารถนำมาปรับใช้กับตรวจจับการปลอมปนของน้ำยางได้ทันที หลักการเดิมคือหลักการสะท้อนของคลื่นความถี่สูงเพราะว่าคลื่นความถี่สูงสามารถควบคุมการหมุนและการเคลื่อนที่ของกลุ่มโมเลกุลน้ำได้ [9] หากน้ำยางที่มีเนื้อยางมาก จำนวนโมเลกุลยางย่อมมาก ปริมาตรในน้ำยางก็จะยิ่งแออัดด้วยโมเลกุลยางทำให้เหลือช่องพื้นที่สำหรับโมเลกุลน้ำที่จะขยับและหมุนแฉก และหากน้ำยางที่มีปริมาณยางน้อย จำนวนโมเลกุลยางจะน้อย พื้นที่ให้โมเลกุลน้ำหมุนตัวจะมีมากขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำหมุนตัวได้กว้างขึ้นและเร็วขึ้น แสดงว่า ยังมีเนื้อยางในน้ำยางมาก จำนวนโมเลกุลยางก็ยิ่งมาก ความเร็วในการหมุนก็ยังลดลงมาก

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ ระบบวัดหกดอร์ตและหลักการวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูง วิธีการวัดนี้สามารถให้ผลรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอเครื่องวัด DRC แบบรีเฟลกโตมิเตอร์หกดอร์ตซึ่งเป็นเครื่องวัดที่ใช้หลักการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางเพื่อประเมินค่า DRC ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่มีความรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำเทียบกับวิธีมาตรฐาน ถ้าศึกษาแบบจำลองไดอิเล็กตริกของน้ำยาง ศึกษาคุณสมบัติของค่าเพอร์มิทิวทีไดอิเล็กตริกของน้ำยาง DRC ค่าต่างๆ ที่ไม่มีสารเจือกับน้ำยางที่มีสารเจือ พัฒนาเครื่องวัด DRC ใช้งานให้มีความเที่ยงตรงสูงขึ้นและตรวจวัดจริงกับน้ำยาง

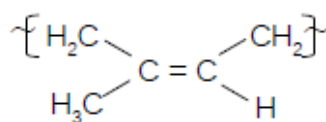
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 โครงสร้างของทางกายภาพน้ำยาง

น้ำยางสด มีคุณสมบัติเป็นสารคอลลอยด์ (Colloid) อนุภาคยางจึงกระจายอยู่ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหรือที่เรียกว่า เซรัม (Serum) อนุภาคยางดังกล่าวเป็นสารพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่มีชื่อทางเคมีว่า 1, 4 - พอลิไอโซพรีน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบซิส (cis - 1, 4 - polyisoprene) ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยคาร์บอน (C) 5 อะตอม กับไฮโดรเจน (H) 8 อะตอม เป็นมอนอเมอร์ (monomer) ของไอโซพรีน (isoprene) ต่อกันจำนวนมากเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว [2]



ไอโซพรีน (Isoprene)



พอลิไอโซพรีน (cis - 1, 4 - polyisoprene)

รูปที่ 1.1 สูตรโมเลกุลของไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีน

น้ำยางธรรมชาติมีส่วนประกอบดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

องค์ประกอบ	ร้อยละ
Rubber particles (cis - 1, 4 -polyisoprene)	30.0-40.0
Protein	2.0-3.0
Water	55.0-65.0
Sterol glycosides	0.1-0.5
Resins	1.5-3.5
Ash	0.5-1.0
Sugars(Carbohydrate)	1.0-2.0

ดังนั้น หากพิจารณาจากตารางแล้ว จะสามารถแบ่งองค์ประกอบน้ำยางออกเป็น 2 องค์ประกอบใหญ่ ได้แก่

- 1) ส่วนที่เป็นยางซึ่งก็คือค่า DRC มีอนุภาคยาง (cis - 1, 4 – poly isoprene) ประมาณร้อยละ 30-40
- 2) ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) เป็นสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่างหลายชนิด เช่น โปรตีน น้ำ เซรัม คาร์โบไฮเดรต ในช่วงร้อยละ 60-70

2.2.2 หลักการสะท้อนคลื่นความถี่สูง

การแพร่กระจายของคลื่นความถี่สูงผ่านวัสดุตัวกลางสองชนิด หากคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางที่แตกต่างกันก็จะส่งผลให้คลื่นบางส่วนสะท้อนกลับ และทำให้เกิดคลื่นนิ่งในตัวกลางนั้น ขณะเดียวกันก็มีคลื่นบางส่วนที่สามารถส่งผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางได้ การสะท้อนกลับมากหรือน้อยขึ้นกับค่าเพอร์มิทีบิลิตี (μ) และค่าเพอร์มิททิวิตี (ϵ) ของตัวกลาง [6] กัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient, Γ^b) และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient, T^b) ของคลื่นที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองก็จะสัมพันธ์กับค่า μ และ ϵ ของวัสดุตัวกลาง คลื่นจะไม่เกิดการสะท้อนกลับเมื่อ $\Gamma^b = 0$ หรือตัวกลางทั้งสองตัวกลางเป็นชนิดเดียวกัน ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) จะบ่งชี้ว่ามีคลื่นสะท้อนกลับมากหรือน้อย กรณีตัวกลางทั้งสองมีค่าเพอร์มิทีบิลิตีเท่ากัน ($\mu_1 = \mu_2$) ซึ่งแสดงว่าตัวกลางนั้นไม่เป็นวัสดุแม่เหล็ก ทำให้

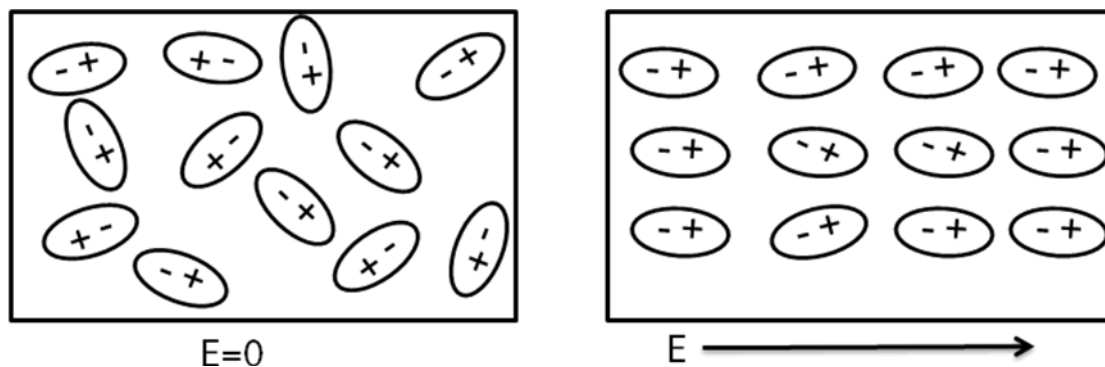
$$SWR = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad ; \epsilon_1 > \epsilon_2 \quad (1.1)$$

โครงสร้างทางกายภาพของน้ำยางที่ประกอบด้วยสารต่างๆ ไม่เป็นวัสดุแม่เหล็ก จึงสามารถประยุกต์ใช้หลักการจากสมการ (1.1) วัดทดสอบหาปริมาณยางแห้งได้และสามารถตรวจสอบสารที่ปนเปื้อนในน้ำยางเพราะองค์ประกอบสารทุกอย่างในน้ำยางมีค่าเพอร์มิททิวิตีที่แตกต่างกัน

2.2.3 ค่าเพอร์มิททิวิตีของสาร

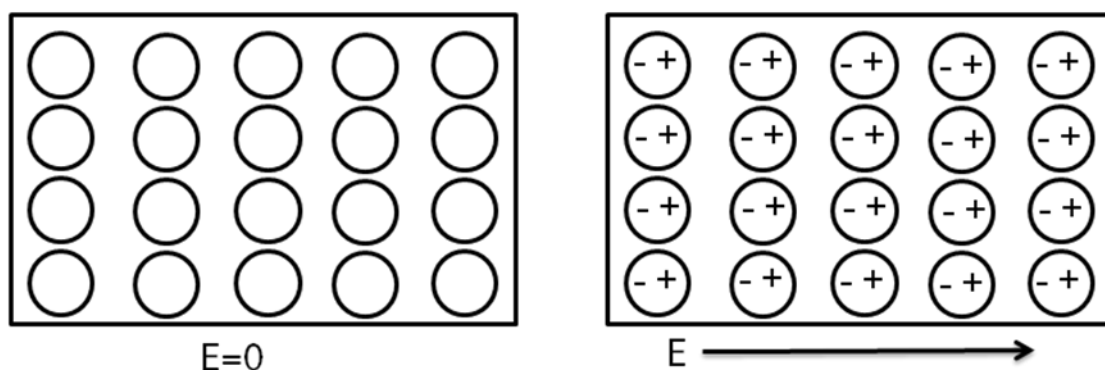
ค่าเพอร์มิททิวิตีเป็นปริมาณทางไฟฟ้าเชิงซ้อน มีส่วนของค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ จำนวนจริงแทนคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กตริก (Dielectric) เรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ_r) ส่วนจำนวนจินตภาพแทนค่าความไม่สมบูรณ์ของความเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งมาจากสารนั้นยังสามารถนำไฟฟ้าได้และจะเรียกว่าจำนวนจินตภาพนี้ว่าค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor, ϵ_r'') สารที่เป็นไดอิเล็กตริกคือสารที่ไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้า เช่น ยาง แก้ว กระดาษ เมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปวางไว้ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้า สารไดอิเล็กตริกจะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำลดลง ในโลกนี้มีสารไดอิเล็กตริกสองชนิด ได้แก่ สารไดอิเล็กตริกแบบมีขั้วและแบบไม่มีขั้ว สารไดอิเล็กตริกแบบมีขั้ว (Polar) เป็นสารไดอิเล็กตริกซึ่งมีไดโพล

โมเมนต์ทางไฟฟ้าแบบถาวร (Permanent dipole moment) เมื่อสารไดอิเล็กตริกแบบมีขั้วอยู่ในสนามไฟฟ้า จะเกิดการจะเรียงของโมเลกุลตามทิศทางของสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2



รูปที่ 1.2 สารไดอิเล็กตริกแบบมีขั้ว

สารไดอิเล็กตริกแบบไม่มีขั้ว เป็นสารไดอิเล็กตริกที่เมื่อถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกแล้ว จะเกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 สารไดอิเล็กตริกแบบไม่มีขั้ว

ดังนั้นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกมีความเป็นขั้วสูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้จึงนำไฟฟ้าไม่ดี ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังบ่งบอกถึงความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ค่าที่บอกความเป็นฉนวนจะเรียกว่าค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตทิวิตี (Dielectric permittivity) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่วัดความสามารถในการสะสมพลังงานสนามไฟฟ้า และค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่วัดความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่สะสมเป็นพลังงานความร้อน [31], [32] สามารถความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ 1.2

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r' + j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \quad (1.2)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$

ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของอากาศ (Permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12}

F/m

ϵ'_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)

ϵ''_r คือ ค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

ตารางที่ 1.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร [34]-[37]

สาร	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
Non polar	1-20
Semipolar	20-50
Polar	>50

จากตารางที่ 1.2 จะสรุปได้ว่าสารที่ไม่มีขั้วจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำกว่า 20 ส่วนสารที่มีขั้วจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่า 50

ตารางที่ 1.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของเหลว

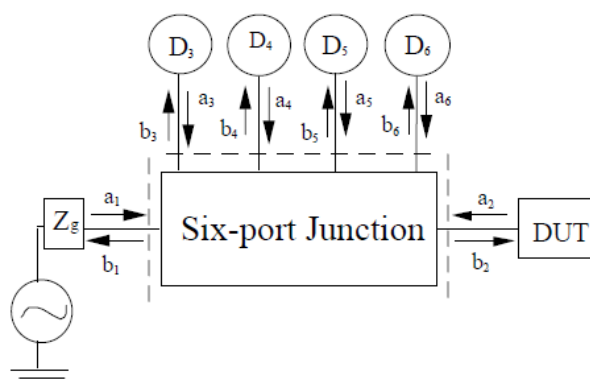
สาร	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
Water	78.5
Glycerol	42.5
Methanol	32.6
Ethanol	24.3
Acetone	20.7
Isopropyl Alcohol	18.3
Benzyl Alcohol	13.1

2.2.4 ค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำ

น้ำเป็นสสารพื้นฐานสำคัญที่เป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิตและในน้ำอย่าง การศึกษาค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำเพื่อจะสามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์เมื่อคลื่นไปตกกระทบกับน้ำอย่างได้น้ำมีหลายสถานะแต่สถานะที่สนใจในกรณีงานวิจัยนี้คือสถานะของเหลวซึ่งโมเลกุลของน้ำ เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว โดยอะตอมของออกซิเจนมีขั้วเป็นลบเล็กน้อย และอะตอมของไฮโดรเจนมีขั้วเป็นบวกเล็กน้อย จึงทำให้น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ดังนั้น น้ำในสถานะนี้จะเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 78.5 [33] ในสภาวะอุณหภูมิห้อง โมเลกุลของน้ำจะอิสระและจัดวางแบบไม่มีทิศทาง แต่เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นความถี่สูง โมเลกุลของน้ำก็จะจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าดังในรูปที่ 1.2 ตารางที่ 2.3 แสดงว่าน้ำเป็นสารประกอบที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงเมื่อเทียบกับของเหลวอื่น

2.2.3 อุปกรณ์รีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต

เทคโนโลยีที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ได้คือระบบวัดแบบหกพอร์ตหรือเรียกว่าอุปกรณ์รีเฟลกโตมิเตอร์แบบหกพอร์ต [9]-[11] วงจรนี้เป็นวงจรไมโครเวฟแบบพาสซีฟ (Passive) [12] ที่วัดคลื่นที่สะท้อนกลับจากวัตถุที่คลื่นไมโครเวฟไปตกกระทบและแปลงความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่สะท้อนมาที่ความถี่ต่ำด้วยวงจรตรวจจับกำลังงาน (Detector) วงจรหกพอร์ตมีฮาร์ดแวร์ด้านความถี่สูงน้อย ดังรูปที่ 1.4 ประกอบด้วย (1) แหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟ (2) โครงข่ายไฟฟ้าแบบหกพอร์ต และ (3) วงจรตรวจจับกำลังงาน 4 วงจร สัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟจะไปตกกระทบกับวัตถุที่พอร์ตเอาต์พุตของโครงข่ายไฟฟ้าแบบหกพอร์ต เกิดการสะท้อนกลับและกระแสไฟตรง 4 สัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรตรวจจับกำลังงานจะส่งเข้าไปที่สมองกลขนาดเล็กเพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนของกำลังงานคลื่นสะท้อนกลับกับค่ากำลังงานคลื่นที่ส่งจากแหล่งกำเนิดคลื่นสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าแบบหกพอร์ตนี้ประกอบสามารถสังเคราะห์ขึ้นจากวงจรพาสซีฟแบบต่างๆ หลากหลายชนิด เช่น สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน (parallel-coupled line: C) [28] วงจรแบ่ง/รวมกำลังงานย่านความถี่แบบวิลกินสัน (Wilkinson power combiner/splitter: D) วงจรแบ่งกำลังงานแบบควอดเรเจอร์ 90 องศา (90° quadrature hybrid: Q) วงจรแบ่ง/รวมกำลังงานแบบไฮบริด 180 องศา (180° hybrid: H)



รูปที่ 1.4 โครงสร้างของวงจรหกพอร์ต

จากรูปที่ 1.4 พอร์ต 1 (P1) ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายคลื่นสัญญาณไมโครเวฟ พอร์ต 2 (P2) ต่ออยู่กับวัสดุทดสอบ ส่วนพอร์ต 3-6 (P3-P6) เป็นพอร์ตที่ใช้วัดกำลังงานไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดย a_i คือคลื่นตกกระทบ b_i คือคลื่นสะท้อน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุทดสอบสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างคลื่นตกกระทบที่พอร์ต 2 (a_2) กับคลื่นสะท้อนที่พอร์ต 2 (b_2) หรือเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1.3

$$\Gamma = \frac{a_2}{b_2} \quad (1.3)$$

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของวงจรข่ายไฟฟ้าแบบหกพอร์ตที่สร้างขึ้นจะมีพารามิเตอร์กระจายที่สัมพันธ์กับกำลังงานของคลื่นตกกระทบ a_i และคลื่นสะท้อน b_i ที่พอร์ตใดๆ พอร์ตวัดทดสอบกำลังงาน (พอร์ต 3 4 5 และ 6) จะไม่มีคลื่นตกกระทบ ดังนั้นตัวแปรคลื่นที่เหลือคือ a_1 และ a_2 ซึ่งสามารถแก้สมการโดยใช้พารามิเตอร์กระจายได้ดังนี้ [29]

$$b_i = S_{i1}a_1 + S_{i2}a_2 \quad ; i=1,2,3,...,6 \quad (1.4)$$

จากพอร์ตที่ 2 จะได้

$$a_1 = \frac{b_2 - S_{22}a_2}{S_{21}} \quad (1.5)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนที่พอร์ตวัดคลื่นสะท้อน (Γ_L) เท่ากับ $\frac{a_2}{b_2}$ แล้วแทนค่า $a_2 = b_2\Gamma_L$ ดังนั้นสมการกำลังงานในแต่ละพอร์ตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_3 = |b_3|^2 = |A\Gamma_L' + B|^2 |b_2|^2 \quad (1.6 ก)$$

$$P_4 = |b_4|^2 = |C\Gamma_L' + D|^2 |b_2|^2 \quad (1.6 ข)$$

$$P_5 = |b_5|^2 = |E\Gamma_L' + F|^2 |b_2|^2 \quad (1.6 ค)$$

$$P_6 = |b_6|^2 = |G\Gamma_L' + H|^2 |b_2|^2 \quad (1.6 ง)$$

สมการ (1.6 ก - 1.6 ง) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของพอร์ตที่ใช้ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของพอร์ต 3,4,5,6 โดยที่ A,B,C,D,E,F,G,H เป็นค่าพารามิเตอร์ของวงจรหกพอร์ต ซึ่งค่าเหล่านี้จะหาจากการปรับเทียบวงจร ผลเฉลยที่ต้องการคือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ_L) ซึ่งหนึ่งในวิธีการหาผลเฉลยของชุดสมการนี้คือการใช้วิธีการเมตริกซ์

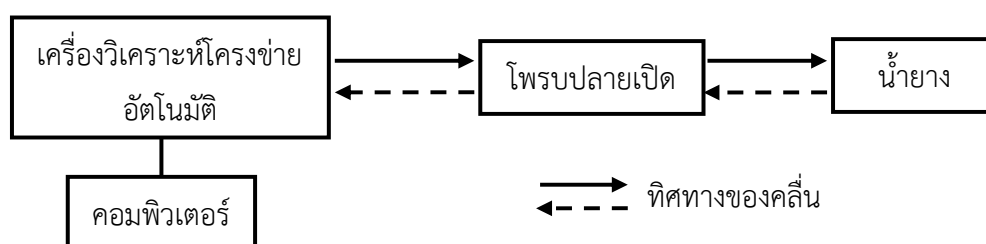
3. การทดลองและผลการทดลอง

โครงการย่อยนี้ มีเป้าหมายสุดท้ายคืออัลกอรี่ทึมของเครื่องวัด DRC ที่ทำนายประเมินค่า DRC ในน้ำยางได้แม่นยำแม้ว่าน้ำยางนั้นจะถูกเจือด้วยสารที่ไม่ใช่เนื้อยาง สำหรับสารที่จะเจือลงในน้ำยางจะกำหนดเลือกสองตัวที่เกษตรกรในประเทศไทยมักจะทำให้ในการปลอม ได้แก่ ปูนขาวและแป้งมัน ทั้งสองตัวต่างเป็นสารที่ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ดังนั้น หัวข้อในการการทดลองในโครงการย่อยนี้ประกอบด้วย

- การพัฒนาแบบจำลองเพอร์มิติวิตีของน้ำยางที่ค่า DRC ต่างๆ
- การศึกษาผลการเติมแป้งมันและปูนขาวในน้ำยางต่อค่าปริมาณของแข็ง (Total solid content : TSC) ที่หลงเหลือหลังจากการอบแห้ง
- การศึกษาผลของเพอร์มิติวิตีของน้ำยาง เซรัม เมื่อมีการปนแป้งมันและปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ

3.1 การพัฒนาแบบจำลองเพอร์มิติวิตีของน้ำยางที่ค่า DRC ต่างๆ

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของน้ำยางในโครงการนี้จะพัฒนาจากค่าเพอร์มิติวิตีของน้ำยางซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา แบบจำลองคณิตศาสตร์จะพัฒนาจากค่าเพอร์มิติวิตีของน้ำยางที่วัด รูปที่ 1.2 แสดงผังภาพแสดงการจัดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติรุ่น HP8510C เพื่อวัด แหล่งจ่ายกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติจะสร้างคลื่นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ คลื่นนี้จะส่งผ่านโพรบแกนร่วมปลายเปิด เมื่อคลื่นนี้ไปกระทบกับน้ำยางจะมีบางส่วนของคลื่นสะท้อนกลับไปที่โพรบปลายเปิด คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ประมวลผลจะเก็บค่าคลื่นที่สะท้อนกลับนี้ไปคำนวณค่าเพอร์มิติวิตีของน้ำยางที่ทดสอบ ณ ความถี่ต่างๆ รูปที่ 1.6 แสดงภาพถ่ายการจัดวางเครื่องมือเพื่อวัดค่าเพอร์มิติวิตีของน้ำยาง จากรูป น้ำยางจะใส่ในบีกเกอร์และมีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำยาง บีกเกอร์จะวางในอ่างอุ่นน้ำยางเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการวัด คอมพิวเตอร์กับซอฟต์แวร์จะเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดผ่านพอร์ตตัวมาตรฐาน GPIB (General Purpose Interface Bus)



รูปที่ 1.5 ผังภาพของการจัดเครื่องมือเพื่อวัดค่าเพอร์มิติวิตีของน้ำยาง

รูปที่ 1.7 แสดงกราฟค่าเพอร์มิตีวิตีเชิงซ้อนของน้ำยางที่ค่า DRC 60.80% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆), 23.25% (■), เทียบกับน้ำ (+) ที่อุณหภูมิ ก) 10°C, ข) 15°C ค) 27°C และ ง) 40°C โดยแกนนอนคือค่า $\omega\epsilon''$ และแกนตั้งคือค่า ϵ' กราฟที่ได้ของน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสเป็นกราฟเส้นตรงมีความชันเดียว ขณะที่น้ำยางทุกกรณีความสัมพันธ์ของกราฟจะเป็นเส้นตรงสองส่วน แต่ละส่วนของเส้นตรงชันต่างกัน เส้นทแยงมุมที่แสดงในรูปกราฟแสดงเพื่อให้เห็นตำแหน่งเริ่มต้นที่ส่วนของเส้นตรงมีค่าความชันต่างกัน การที่ปรากฏส่วนของเส้นที่มีส่วนและมีความชันที่ต่างกันนั้นน่าจะมาจากการหมุนของโมเลกุลน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลาที่แตกต่างกันสองสภาพแวดล้อม สภาพแวดล้อมหนึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลน้ำที่อิสระ และอีกสภาพหนึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลของน้ำที่อยู่ใกล้กับกลุ่มอนุภาคน้ำยางและได้รับอิทธิพลจากแรงที่กระทำจากอนุภาคน้ำยางนี้ ดังนั้น แบบจำลองทางกายภาพที่จะสามารถทำนายค่าเพอร์มิตีวิตีเชิงซ้อนของน้ำยางได้จะต้องเป็นแบบจำลองแบบผ่อนคลายทวิ (Double relaxation model) ที่อธิบายลักษณะการหมุนของโมเลกุลน้ำในสนามไฟฟ้าที่สภาพแวดล้อมที่ต่างกันสองกรณีดังที่ได้แจกแจงไว้ข้างต้น ปรากฏการณ์ทางกายภาพสำคัญที่แสดงว่ามีสองกรณีนี้คือเวลาเฉลี่ยที่โมเลกุลน้ำคลายตัวตามทิศของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้า (relaxation time) ซึ่งค่าเวลานี้มีสองค่าและแตกต่างกัน แบบจำลองแบบผ่อนคลายทวินี้สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\epsilon^*(\omega, T, DRC) = \epsilon_{\infty, d} + \frac{\Delta\epsilon_1}{1+j\omega\tau_1(T, DRC)} + \frac{\Delta\epsilon_2}{1+j\omega\tau_2(T, DRC)} - j \frac{\sigma_d}{\omega\epsilon_{0, d}} \quad (1.7)$$

สัญลักษณ์ ϵ^* แทนค่าเพอร์มิตีวิตีเชิงซ้อนของน้ำยาง

$\epsilon_{\infty, d}$ แทนค่าเพอร์มิตีวิตีเชิงซ้อนของน้ำยางที่ความถี่สูง

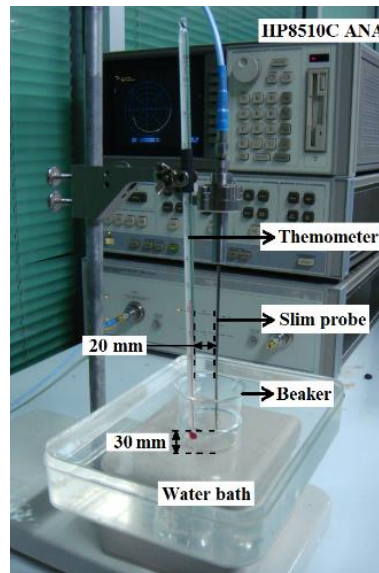
σ_d แทนค่าความนำไฟฟ้าของน้ำยางที่ DRC ค่าต่างๆ

τ_1 คือค่าเวลผ่อนคลายของโมเลกุลน้ำอิสระในน้ำยาง

τ_2 คือค่าเวลผ่อนคลายของโมเลกุลน้ำที่อยู่ใกล้กับกลุ่มอนุภาคน้ำยาง

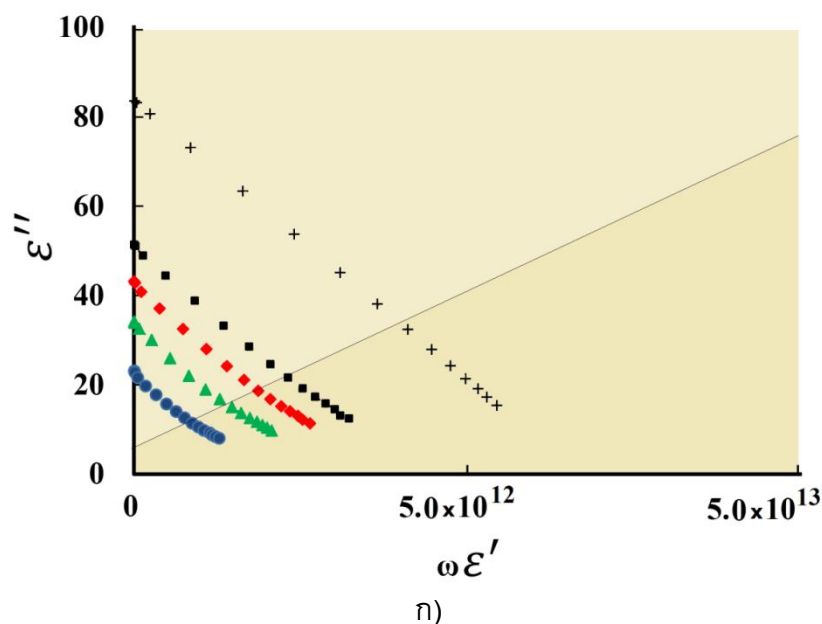
$\epsilon_{0, d}$ แทนค่าเพอร์มิตีวิตีเชิงซ้อนของอวกาศว่าง

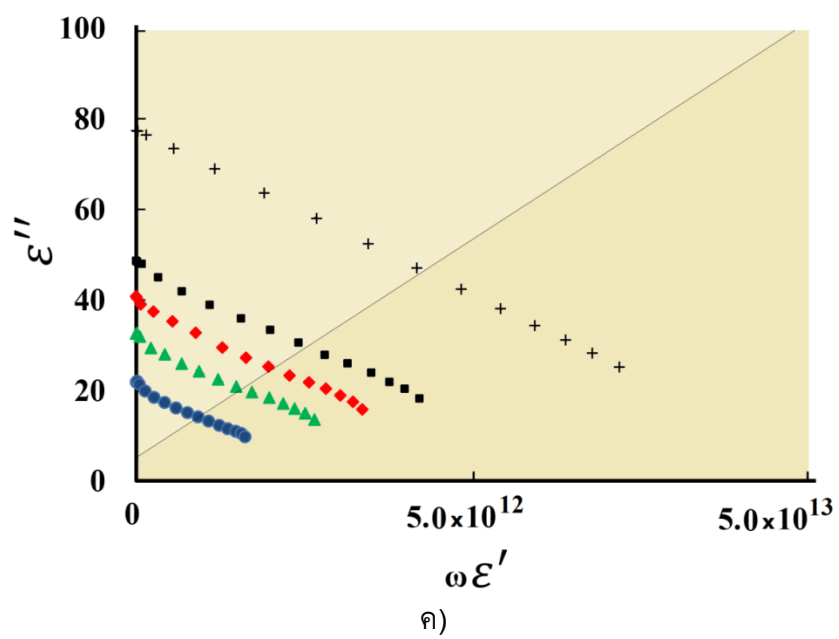
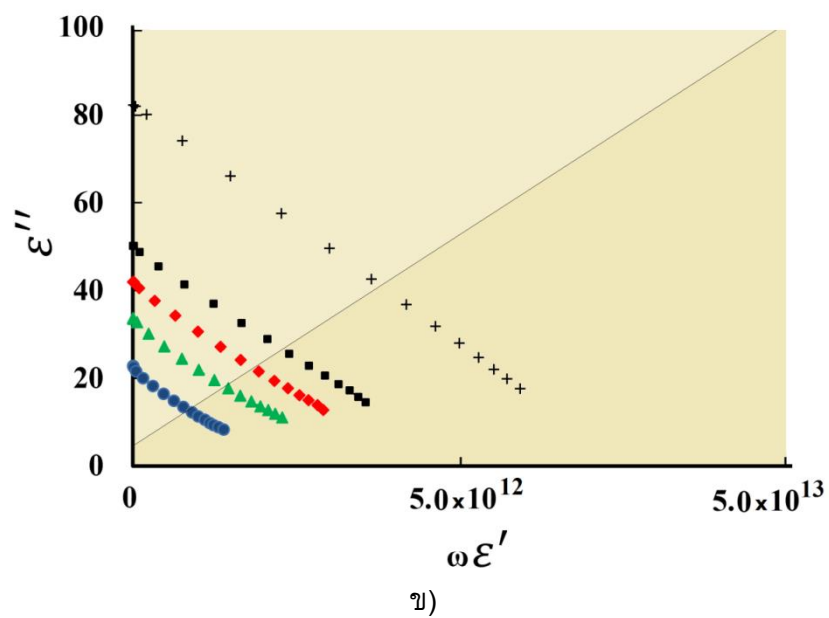
และ j แทนเลขจินตภาพซึ่งเท่ากับ $\sqrt{-1}$

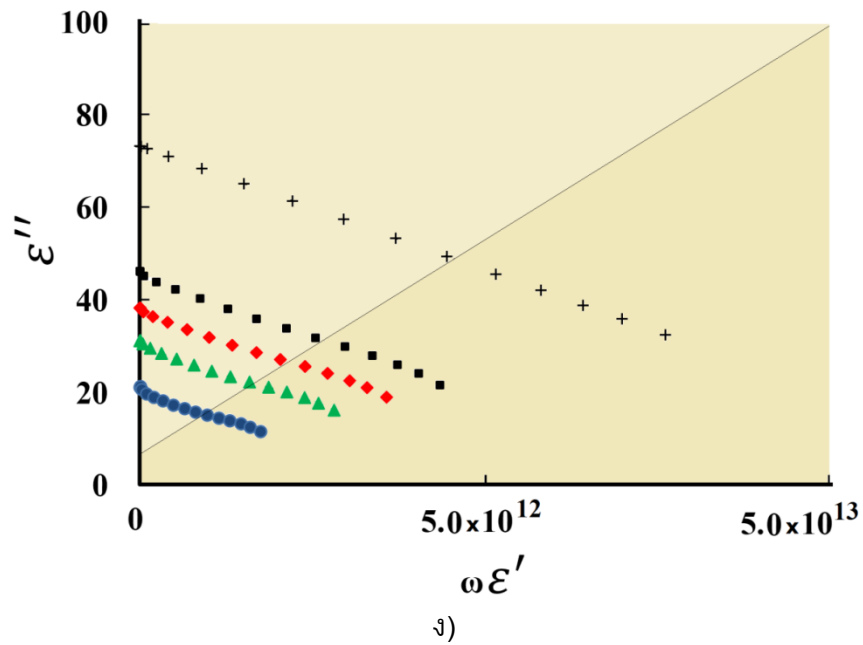


รูปที่ 1.6 ภาพถ่ายการจัดเครื่องมือเพื่อวัดค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำยาง

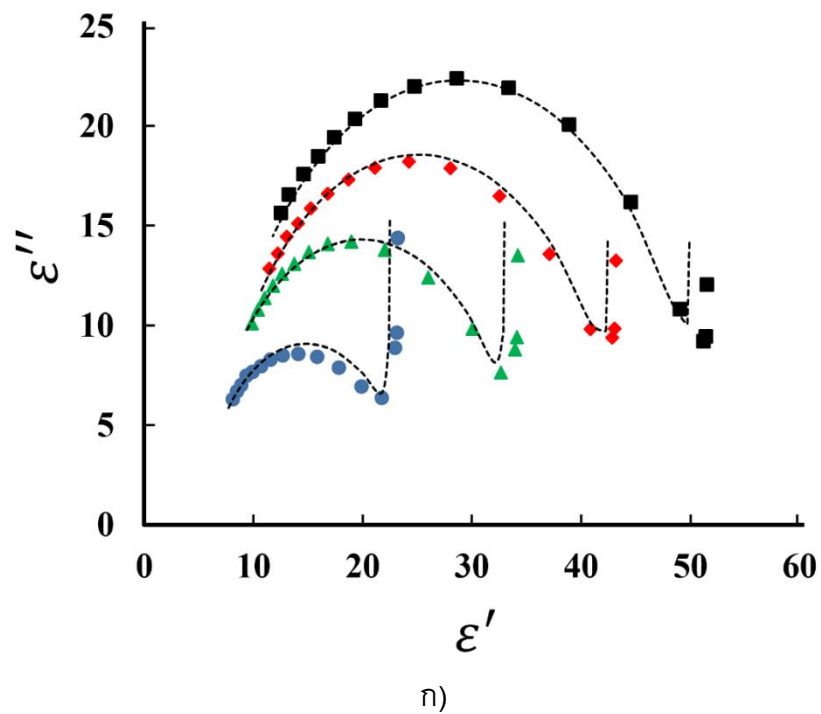
ชุดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำยางได้แก่ ϵ_{∞} , σ_d , τ_1 , τ_2 ที่ค่า DRC และอุณหภูมิต่างกันจะ
ได้จากการประยุกต์เทคนิคการปรับเส้นโค้งจากสมการแบบจำลองพหุนามหลายตัวกับกลุ่มของค่า
เพอร์มิตติวิตีที่วัดได้ซึ่งชุดพารามิเตอร์ทางกายภาพนี้ถูกต้องเพราะเป็นเหตุผล และผลของการ
ปรับเส้นโค้งได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน R^2 อยู่ในช่วง 0.96-0.99 นอกจากนี้ เมื่อแทนค่า
ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพเหล่านี้ในแบบจำลองพหุนามแบบทวี และวาดกราฟนั้นบนผังภาพ
Cole-Cole โดยเทียบกับกลุ่มค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำยางที่วัดจริงดังรูปที่ 1.8 กลุ่มกราฟเพอร์
มิตติวิตีที่วัดได้จริงใกล้เคียงกับแบบจำลองที่นำเสนอมา ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง
พหุนามหลายตัวที่บรรจุชุดของค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพสามารถอธิบายน้ำยางได้

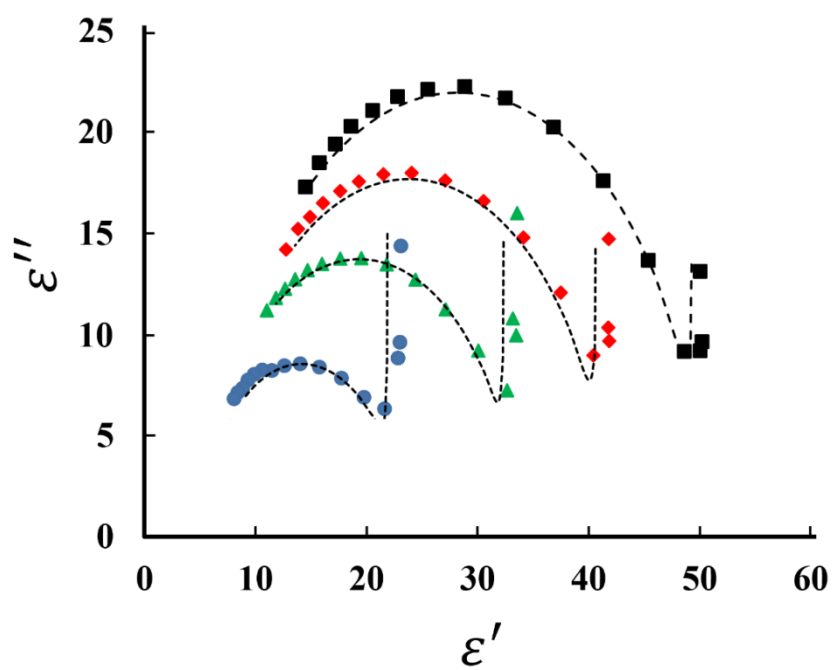




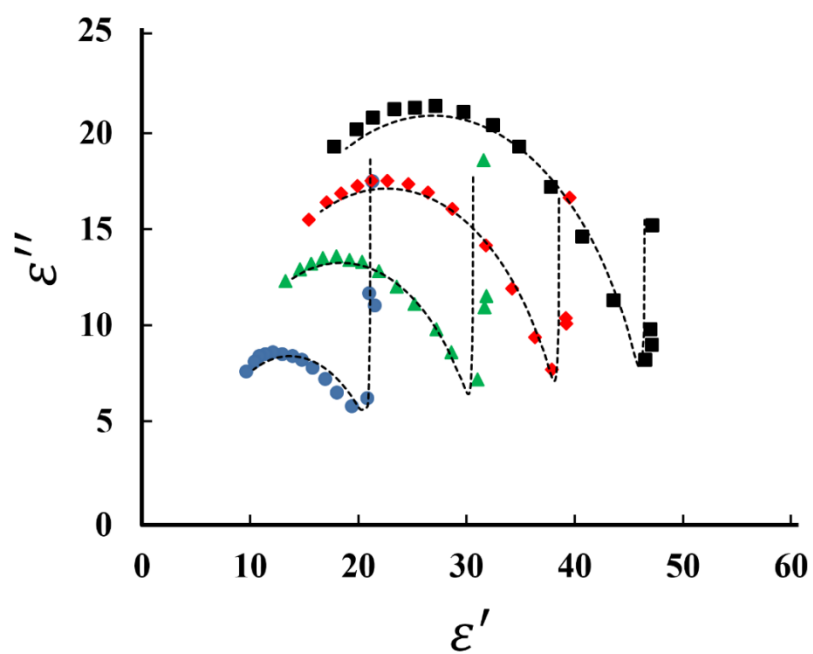


รูปที่ 1.7 ผลวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิทิวตี้ของน้ำยางที่ค่า DRC 60.80% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆), 23.25% (■), เทียบกับน้ำ (+) โดยใช้แบบจำลองสมการที่อุณหภูมิ ก) 10°C, ข) 15°C ค) 27°C และ ง) 40°C

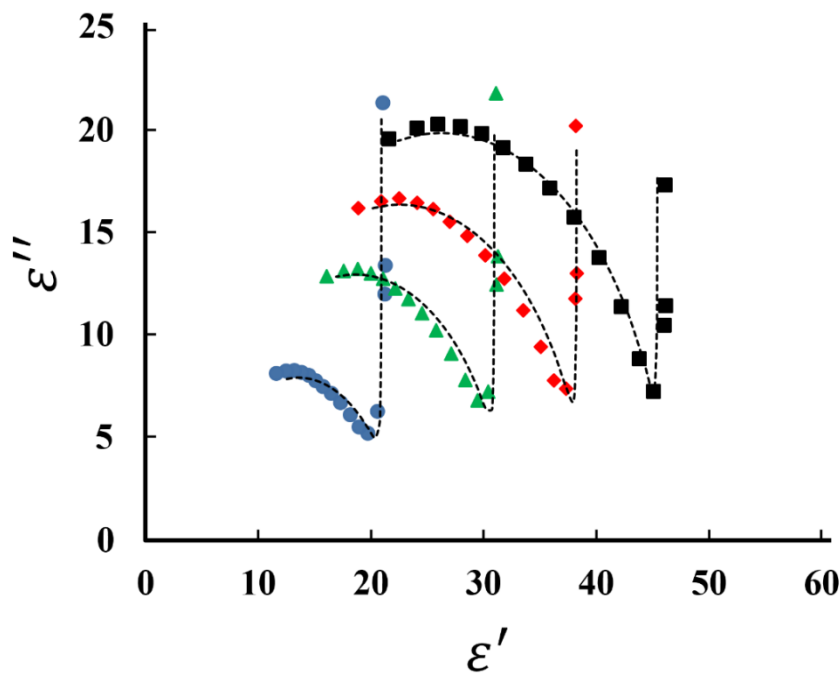




1)



2)



ง)

รูปที่ 1.8 ผลการจำลองด้วยแบบจำลองแบบผ่อนคลายทวี (Dash line) เปรียบเทียบกับค่าเพอร์มิตติวิตีที่วัดได้จริงของน้ำยางที่ DRC 60.08% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆), และ 23.25% (■) ที่อุณหภูมิ (ก) 10°C, (ข) 15°C, (ค) 27°C, และ (ง) 40°C.

3.2 การศึกษาผลการเติมแป้งมันและปูนขาวในน้ำยางต่อค่าปริมาณของแข็ง (Total solid content : TSC) ที่เหลือหลังจากการอบแห้ง

เนื่องจากน้ำยางประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ น้ำ เนื้อยาง และส่วนที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งส่วนที่ไม่ใช่ยางจะมีประมาณร้อยละ 1-2 เท่านั้น ที่เหลือก็จะเป็นน้ำ และเนื้อยาง ค่า DRC ในน้ำยางสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างมวลของเนื้อยางเทียบกับมวลของน้ำ ถ้า DRC สูงแสดงว่ามีมวลของเนื้อยางมากเมื่อเทียบกับมวลของน้ำ การผสมสารที่ไม่ใช่ยางในน้ำยางจะเพิ่มมวลที่เป็นของแข็ง ดังนั้น หากใช้ค่าปริมาณของแข็งที่เหลือจากการอบแห้ง (Total Solid Content : TSC) มาแทนค่า DRC แล้วจะทำให้ค่า DRC ที่ได้มากเกินจริงและผู้ซื้อก็ต้องจ่ายเงินมากขึ้น ในตลาดซื้อขายหลายที่ต่างก็ใช้ค่า TSC เป็นตัวแทนของค่า DRC ซึ่งหากพิจารณาตามหลักวิชาการแล้ววิธีการ TSC จะไม่สามารถใช้ในการซื้อขายได้เพราะจะผิดเพี้ยนเมื่อมีการเติมสารที่ไม่ใช่ยางในน้ำยาง ผลเสียนอกจากจะทำให้ตลาดไม่เป็นธรรมแล้ว การปลอมปนสารอื่นลงไปในน้ำยางจะส่งผลเสียให้น้ำยางนั้นเสียคุณภาพ เสถียรภาพของน้ำยางลดลง และเมื่อนำน้ำยางไปใช้ในอุตสาหกรรมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพลดลง

3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองจะเริ่มจากน้ำยางชั้นที่มีค่า DRC ประมาณร้อยละ 20 มาวิเคราะห์ โดยแบ่งเป็น 2 การทดลอง การทดลองแรกเป็นการผสมแป้งมันสำปะหลัง และการทดลองที่สองเป็นการผสมปูนขาว ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. นำแป้งมันสำปะหลังจำนวน 1 กรัมผสมลงไปในน้ำยางชั้นร้อยละ 20 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ข. คำนวณค่า DRC ในน้ำยางหลังจากเพิ่มแป้งมันสำปะหลังลงไปจากอัตราส่วนของมวลของเนื้อยางแห้งรวมกับมวลของแป้งที่ใส่เพิ่มลงไปและมวลของทั้งหมด มวลของเนื้อยางสามารถหาได้จาก

$$D = \frac{m}{V} \quad (1.8)$$

เมื่อ D คือความหนาแน่นของน้ำยางซึ่งมีค่าประมาณ 0.975 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

m คือมวลของเนื้อยางมีหน่วยเป็นกรัม

V คือปริมาตรของน้ำยางที่นำมาใช้ทดลอง ในที่นี้ใช้ 50 มิลลิลิตร

คำนวณ TSC จาก

$$\%TSC = \frac{(m_{rubber} + m_2)}{(m_{total} + m_2)} \times 100 \quad (1.9)$$

เมื่อ m_{rubber} คือ มวลของเนื้อยางมีหน่วยเป็นกรัม

m_{total} คือ มวลของน้ำยางมีหน่วยเป็นกรัม

m_2 คือ มวลของสารปลอมปนมีหน่วยเป็นกรัม

ค. คนให้แป้งละลายในน้ำยางจนทั่ว จากนั้นวัดค่า DRC ด้วยเครื่องวัดค่า DRC

ง. บันทึกค่า DRC ในน้ำยางที่ได้จากการคำนวณ การวัดด้วยเครื่อง DRC และการวัดค่า

TSC

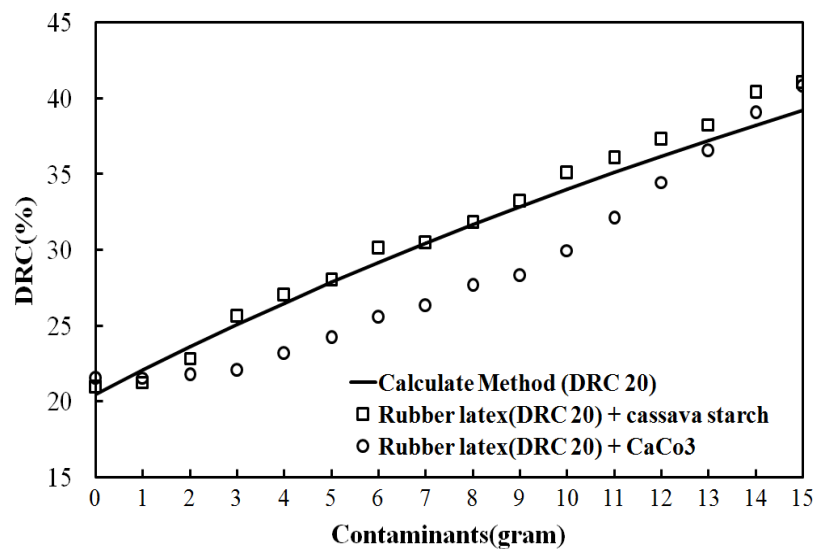
จ. เพิ่มแป้งครั้งละ 1 กรัมลงในน้ำยางจากนั้นทำซ้ำข้อ ข ถึง ง จนกว่าจะมีแป้งผสมในน้ำยาง 15 กรัม

ฉ. เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังครบ 15 กรัมแล้วให้เปลี่ยนเป็นปูนขาว แล้วทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ ก-จ

3.2.2 ผลการทดลอง

หลังจากทดลองผสมแป้งมันสำปะหลังและปูนขาวลงในตัวอย่างน้ำยางชั้นร้อยละ 20 เมื่อเติมสารปลอมปนลงไปในน้ำยางครั้งละ 1 กรัม นำตัวอย่างไปอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ค่า TSC รูปที่ 1.9 แสดงกราฟของค่า TSC ที่คำนวณจาก (1.9) เปรียบเทียบกับผลค่า TSC ที่คำนวณจากน้ำหนักหลังอบ จากรูปที่ 1.9 พบว่า ค่า TSC ของน้ำยาง

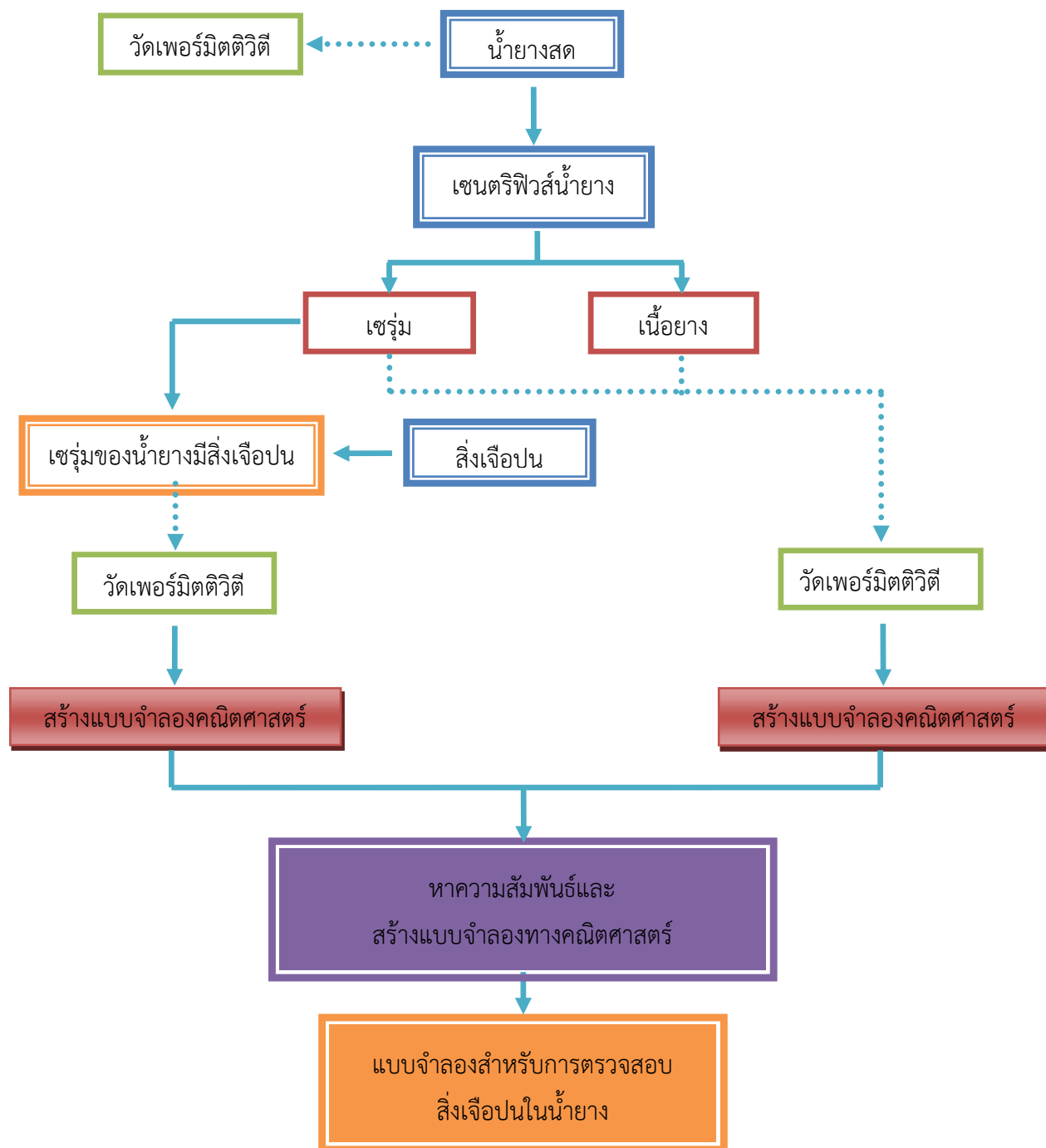
ที่เติมแป้งมันสำปะหลังจะสอดคล้องกับค่า TSC ที่คำนวณจาก (1.9) อย่างไรก็ตาม ค่า TSC ของกรณีนี้ น้ำยางที่เติมปูนขาวต่ำกว่าค่า TSC ที่คำนวณได้ ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวละลายในน้ำยางได้ไม่ดี เท่ากับแป้งมันสำปะหลัง ปูนขาวจับตัวกับน้ำยางเป็นก้อนและตกตะกอนไปที่ก้นภาชนะ น้ำหนักที่ ซึ่งหลังจากอบแห้งจึงน้อยกว่าน้ำหนักจริง อย่างไรก็ตาม กราฟในรูปที่ 1.9 ได้แสดงให้เห็นชัดเจนแล้วว่าไม่สามารถใช้วิธีการวัดค่า TSC มาแทนการวัดค่า DRC ได้แน่นอน



รูปที่ 1.9 TSC ที่ทดสอบได้หลังมีการเติมปูนขาวและแป้งมันสำปะหลัง

3.3 การพัฒนาแบบจำลองเพอร์มิติวิตีเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในน้ำยาง

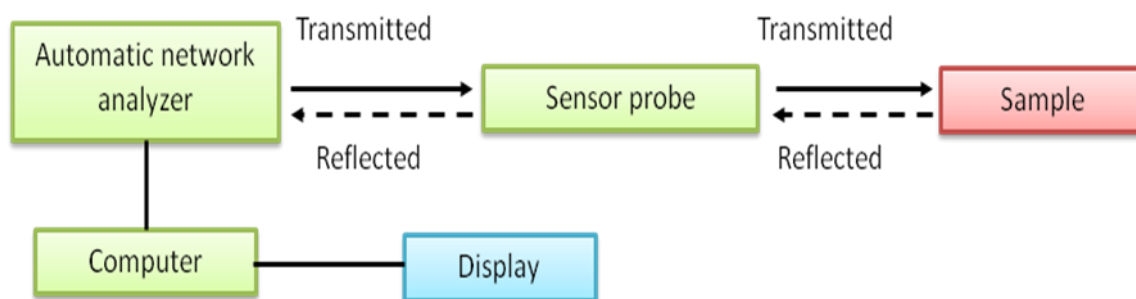
การออกแบบจำลองจากค่าเพอร์มิติวิตีของน้ำยาง ซึ่งในน้ำยางจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของเนื้อยาง และส่วนที่ไม่ใช่ยาง เมื่อมีสิ่งเจือปนอยู่ในน้ำยาง สิ่งเหล่านั้นจะถูกไปรวมกับส่วนที่ไม่ใช่ยาง โดยการนำน้ำยางสดมาปั่นโดยเครื่องเซนตริฟิวด์ (Centrifuge) เพื่อแยกส่วนของเนื้อยาง และเซรัมของน้ำยาง (ส่วนที่เป็นของเหลว) และเติมสิ่งเจือปนคือ แป้งมันและปูนขาว ลงในเซรัม วัดค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิติวิตี หาความสัมพันธ์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การแยกเนื้อยางจากน้ำยางจะใช้จำนวนการปั่นที่เหมาะสมตามข้อมูลวิชาการ ผลผลิตที่ได้คือ เซรัมและเนื้อยาง จากนั้นก็จะเติมสิ่งเจือปนในน้ำยาง กระบวนการทดลองทั้งหมดตั้งแต่ทดสอบไปจนถึงการทำแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาแบบจำลองเพอร์มิตติวิตีของน้ำยาง

การวัดเพอร์มิตติวิตีจะวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟในช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ช่วงความถี่นี้เป็นช่วงความถี่ที่ออกแบบอุปกรณ์ง่ายและครอบคลุมความถี่ที่เครื่องวัดเดิมที่มีอยู่แล้ว จากข้อมูลเดิมที่ได้พบว่าค่าเพอร์มิตติวิตีแปรผันกับอุณหภูมิช่วง 22-40 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงวัดค่าเฉพาะอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียสเพราะสามารถควบคุมในห้องปฏิบัติการได้ รูปที่ 1.10 แสดงผังภาพซึ่งประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และเซนเซอร์โพรบ

แบบสลิ้มโดยจุ่มเซ็นเซอร์ลงในตัวอย่างน้ำยาที่ต้องการวัด คลื่นไมโครเวฟถูกปล่อยจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติผ่านมายังเซ็นเซอร์โพรบแบบสลิ้มที่จุ่มลงในตัวอย่าง แล้วคลื่นก็จะสะท้อนกลับมายังเซ็นเซอร์โพรบแบบสลิ้ม ผลการวัดจะถูกแสดงผ่านคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 การวัดค่าเพอร์มิตติวิตีด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.3.1 ขั้นตอน

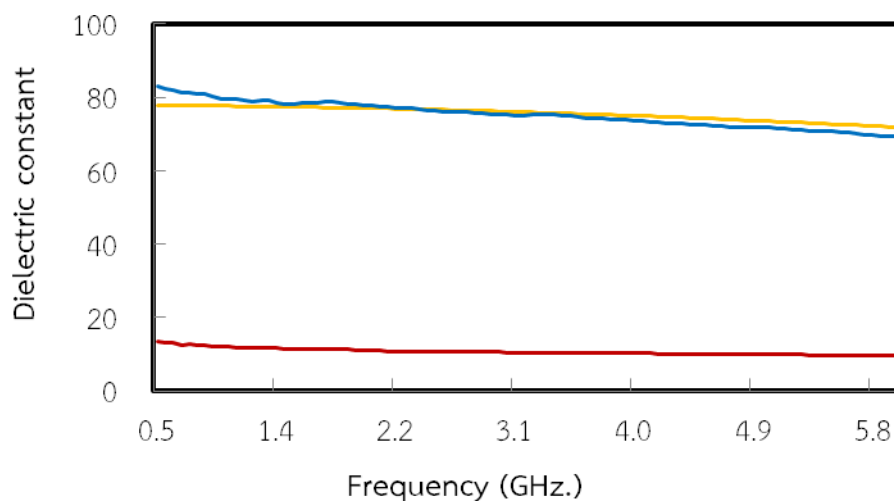
การทดลองในหัวข้อนี้มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ปั่นน้ำยางสดประมาณ 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Ultracentrifuge XL-100k ใช้ความเร็ว 25,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 1 ชม. 15 นาที เพื่อแยกส่วนของเนือยางและเซรัม
- 2) วัดค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของเนือยาง และเซรัม วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ
- 3) นำเซรัมที่ได้จากการปั่นมาแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ลงในบีกเกอร์ (เซรัมแต่ละบีกเกอร์ประมาณ 10 มิลลิลิตร) กำหนดให้เซรัมในบีกเกอร์ใบที่ 1 เติมน้ำมันสำปะหลัง และในบีกเกอร์ใบที่ 2 เติมน้ำมันข้าว
- 4) เติมน้ำมันสำปะหลัง 3 กรัม ลงในบีกเกอร์ใบที่ 1 คนให้เป็นเนื้อเดียวกันและวัดค่าเพอร์มิตติวิตี
- 5) เติมน้ำมันสำปะหลังอีก 3 กรัม ลงในของผสมที่ได้จากข้อ 4) (มีน้ำมันสำปะหลังผสมอยู่ 6 กรัม) คนให้เป็นเนื้อเดียวกันและวัดค่าเพอร์มิตติวิตี
- 6) เติมน้ำมันสำปะหลังอีก 3 กรัม ลงในของผสมที่ได้จากข้อ 5) (มีน้ำมันสำปะหลังผสมอยู่ 9 กรัม) คนให้เป็นเนื้อเดียวกันและวัดค่าเพอร์มิตติวิตี
- 7) เติมน้ำมันข้าว 3 กรัม ลงในบีกเกอร์ใบที่ 2 คนให้เป็นเนื้อเดียวกันและวัดค่าเพอร์มิตติวิตี
- 8) เติมน้ำมันข้าว 3 กรัม ลงในของผสมที่ได้จากข้อ 7) (มีน้ำมันข้าว ผสมอยู่ 6 กรัม) คนให้เป็นเนื้อเดียวกันและวัดค่าเพอร์มิตติวิตี
- 9) และเติมน้ำมันข้าว 3 กรัม ลงในของผสมที่ได้จากข้อ 8) (มีน้ำมันข้าว ผสมอยู่ 9 กรัม) คนให้เป็นเนื้อเดียวกันและวัดค่าเพอร์มิตติวิตี
- 10) นำผลที่ได้จากการวัดทั้งหมดมาสร้างกราฟ

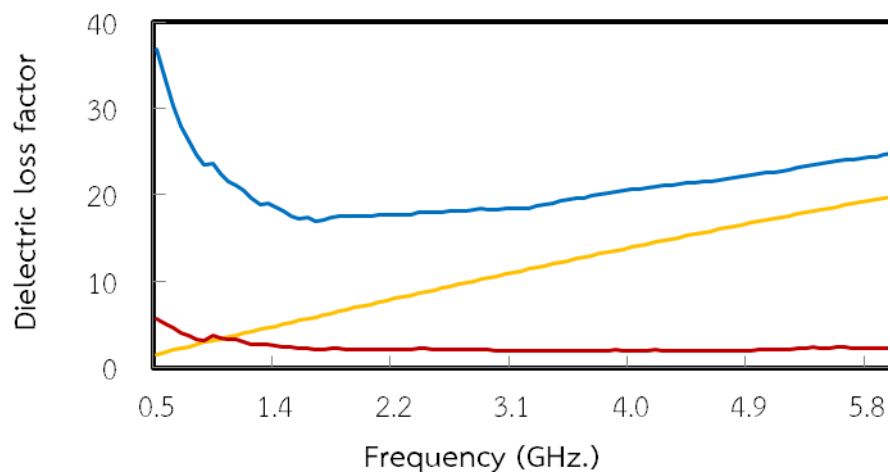
- 11) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิตติวิตีจากกราฟ
- 12) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ที่ได้จากข้อ 11)
- 13) ทดสอบแบบจำลองที่ได้จากข้อ 12)

3.3.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองได้จากการทดลองกับน้ำยาง 5 กลุ่มตัวอย่าง แต่ละกลุ่มตัวอย่าง จะมี DRC ไม่เท่ากัน จากนั้นจะหาผลเฉลี่ยของค่าผลลัพธ์ที่ได้จากทั้ง 5 กลุ่มตัวอย่าง



(ก)



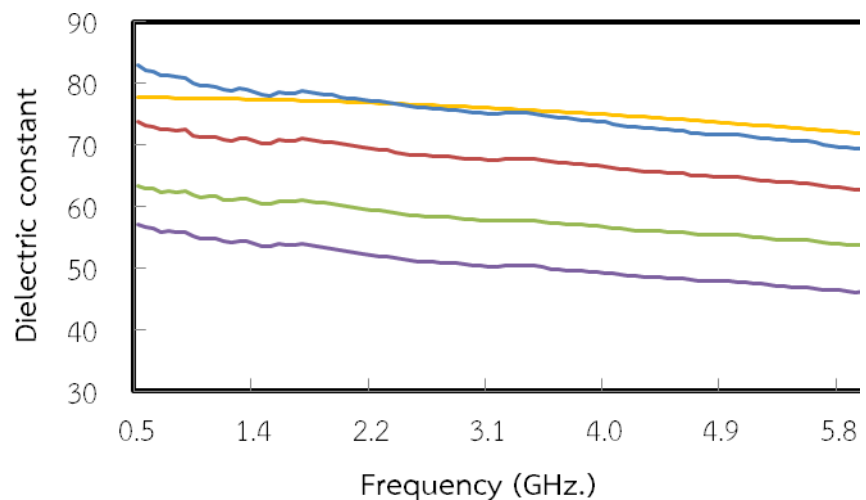
(ข)

รูปที่ 1.12 ค่าเพอร์มิตติวิตีเฉลี่ยจากน้ำยาง 5 กลุ่มตัวอย่างในช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และ (ข) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ϵ'')

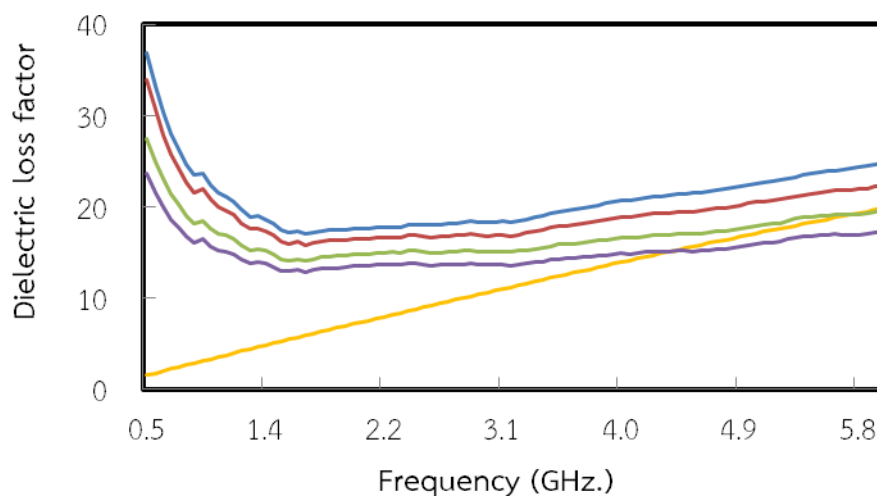
— Water (ref.) — Serum — Rubber content

รูปที่ 1.12 (ก) และ (ข) แสดงผลวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ϵ'') ของเซรัมของน้ำยาง เนื้อยาง และน้ำ กำหนดให้อุณหภูมิคงที่ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่า

สูญเสียทางไดอิเล็กตริกขึ้นกับความถี่ ในรูป 1.12 ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเซรัมของน้ำยางกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำใกล้เคียงกันมาก ในบางช่วงความถี่จะไม่สามารถแยกแยะข้อแตกต่างระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำกับเซรัมได้ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อยางที่เหลือจากป็นมีค่าที่แปรผันกับความถี่น้อยมาก สำหรับค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรัมกับน้ำแตกต่างกันอย่างชัดเจน เส้นกราฟที่วัดขึ้นของค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรัมในช่วงความถี่ต่ำแสดงว่าเซรัมนำไฟฟ้าได้



(ก)



(ข)

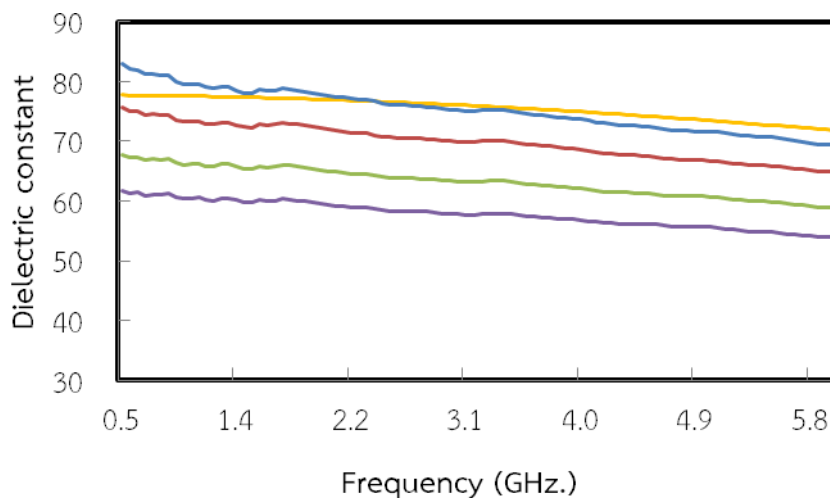
รูปที่ 1.13 ค่าเพอร์มิตติวิตีช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และ (ข) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ϵ'')

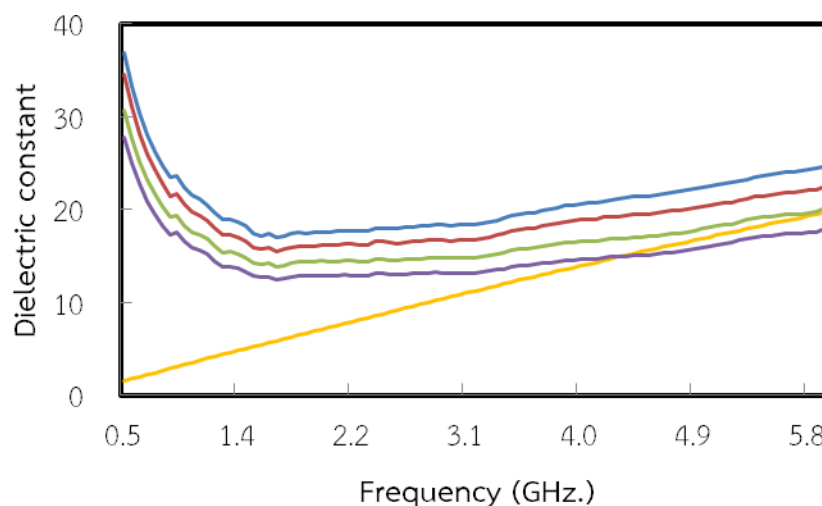
— Water (ref.) — Serum — Serum with flour 3 g — Serum with flour 6 g — Serum with flour 9 g

รูปที่ 1.13 (ก) และ (ข) แสดงผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ϵ'') ของน้ำ เซรัม และเซรัมที่เติมแป้งมันในปริมาณ คือ 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม ตามลำดับ

คสบคุมให้อุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบคงที่ จากกราฟ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกขึ้นกับความถี่และปริมาณของแป้งมัน เมื่อปริมาณแป้งมันเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรั่มที่มีแป้งมันผสมจะลดลง



(ก)



(ข)

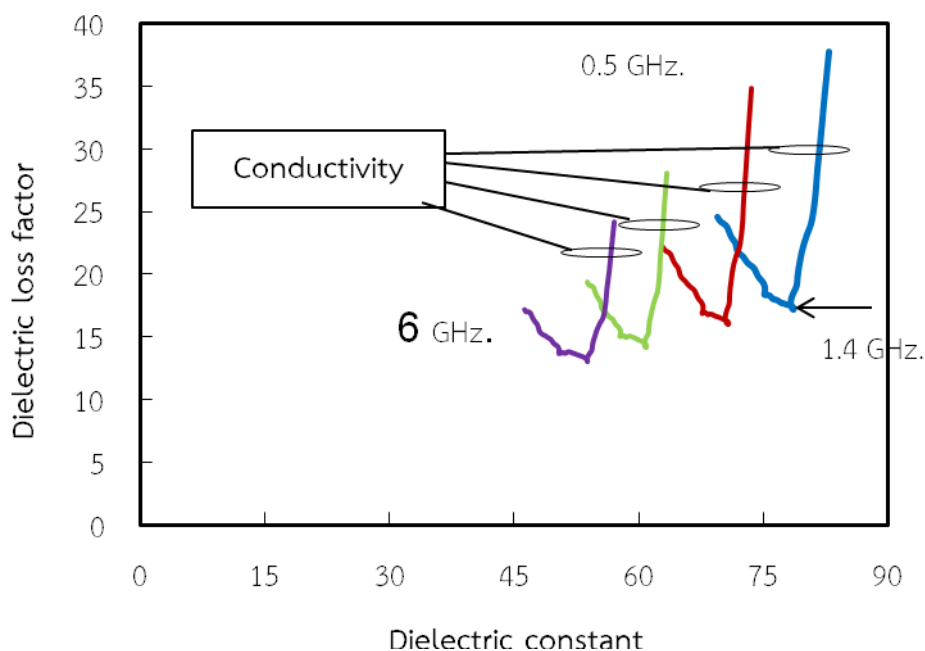
รูปที่ 1.14 ค่าเพอร์มิตติวิตีที่ความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และ (ข) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ϵ'')

— Water (ref.) — Serum — Serum with lime 3 g — Serum with lime 6 g — Serum with lime 9 g

รูปที่ 1.14 (ก) และ (ข) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ϵ'') ของน้ำ เซรั่ม และเซรั่มที่เติมปูนขาวในปริมาณ 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม ตามลำดับ ให้อุณหภูมิคงที่ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกขึ้นกับความถี่และปริมาณของปูนขาว เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรั่มที่ถูกปลอมปนด้วยปูนขาวลดลง

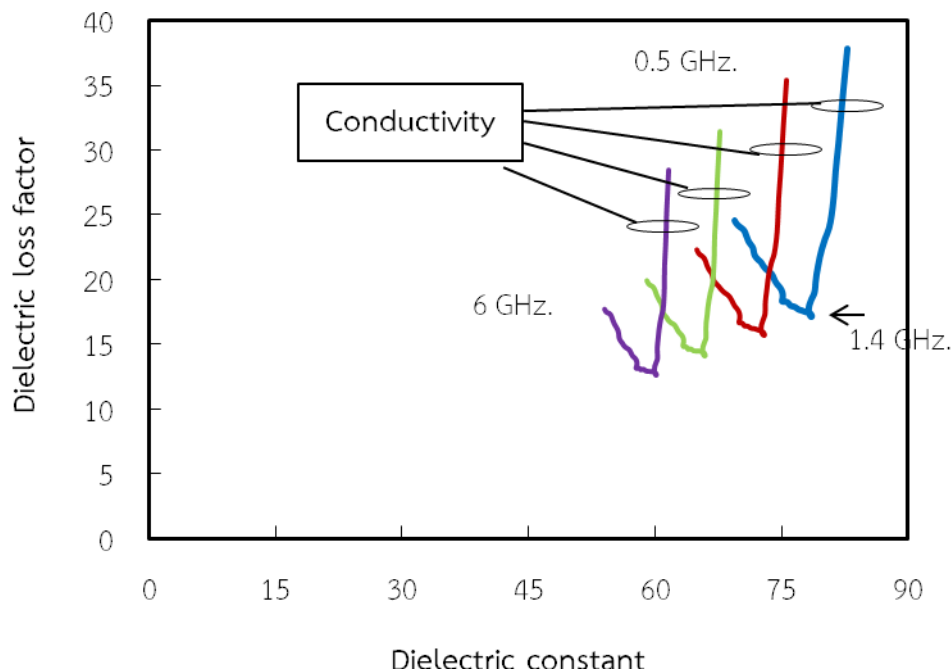
จากรูปที่ 1.12 – 1.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ต่ำกว่า 1.6 GHz ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าลดลง และความถี่สูงกว่า 1.6 GHz ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าในเซรั่มมีแร่ธาตุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จากรูปที่ 1.13 และ 1.14 พบว่า การเติมแป้งมันหรือปูนขาวลงในเซรั่มของน้ำยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกลดลง



รูปที่ 1.15 ค่าเพอร์มิตติวิตีของเซรั่มที่ผสมด้วยแป้งแสดงในรูปผังภาพแบบ Cole – Cole ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

— Serum — Serum with flour 3 g — Serum with flour 6 g — Serum with flour 9 g

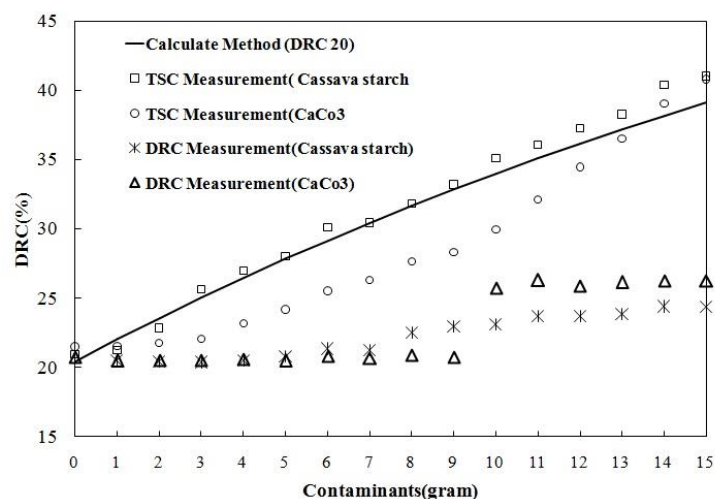
รูปที่ 1.15 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกในรูปแบบผังภาพ Cole-Cole plot ซึ่งประกอบด้วยค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของเซรั่มที่ถูกผสมด้วยแป้งมันสำปะหลังในปริมาณ 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม สามารถสังเกตได้ว่า ณ ความถี่ที่ต่ำกว่า 1.4 GHz จะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากในเซรั่มของน้ำยางมีแร่ธาตุ และน้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีประจุเคลื่อนที่อย่างอิสระ ในส่วนความถี่ที่สูงกว่า 1.4 GHz พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง แต่ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น ค่าเพอร์มิตติวิตีของเซรั่มที่ผสมแป้งมัน 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งมันเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมคล้ายกับเซรั่ม



รูปที่ 1.16 ค่าเพอร์มิตติวิตีของเซรัมที่ผสมด้วยปูนขาวในรูปผังรูปแบบ Cole – Cole ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

— Serum — Serum with lime 3 g — Serum with lime 6 g — Serum with lime 9 g

รูปที่ 1.16 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกในรูปผังกราฟ Cole-Cole ซึ่งประกอบด้วยค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของเซรัมที่ถูกผสมด้วยปูนขาวปริมาณ 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม สามารถสังเกตได้ว่า ที่ความถี่ที่ต่ำกว่า 1.4 GHz จะเกิดการนำไฟฟ้าเพราะว่าในเซรัมมีแร่ธาตุซึ่งมีประจุเคลื่อนที่อย่างอิสระ กรณีความถี่สูงกว่า 1.4 GHz พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง แต่ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ลดลง รวมทั้งค่าเพอร์มิตติวิตีของเซรัมที่ผสมปูนขาว 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมคล้ายกับเซรัมของน้ำยาง นอกจากนี้พฤติกรรมของค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของเซรัมที่ผสมด้วยปูนขาว จะคล้ายกับพฤติกรรมของค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของเซรัมที่ผสมด้วยแป้งมัน แต่ค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของเซรัมที่ผสมด้วยปูนขาวจะสูงกว่าเมื่อผสมในอัตราส่วนที่เท่ากัน เมื่อประยุกต์แบบจำลองเพอร์มิตติวิตีของน้ำยางและเซรัมในเครื่องวัด DRC และกำหนดเงื่อนไขสำหรับการรับรู้การปลอมปนของปูนขาวและแป้งมันสำปะหลัง รูปที่ 1.17 แสดงผลการวัดค่า DRC เปรียบเทียบกับผลวิธีวัด TSC จากกราฟจะเห็นว่าเครื่องวัด DRC ที่ใช้แบบจำลองเพอร์มิตติวิตีสามารถแสดงค่า DRC ได้ถูกต้องแม้จะเติมสารที่ไม่ใช่เนื้อยางในน้ำยางน้อยๆ เครื่องวัด DRC จะให้ผล DRC คลาดเคลื่อนจากค่า DRC ที่ถูกต้องเมื่อเติมปูนขาวหรือแป้งมันสำปะหลังมากกว่า 7 กรัม



รูปที่ 1.17 ผลการวัดค่า DRC ด้วยเครื่องวัด DRC ที่ใส่แบบจำลองน้ำยางและอัลกอริทึมที่จัดการแก้ปัญหาการเติมสารที่ไม่ใช่น้ำยาง

4. สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับวัด DRC ในน้ำยางและสามารถแสดงผล DRC ได้คลาดเคลื่อนน้อยแม้จะมีการเติมสารที่ไม่ใช่น้ำยาง ค่า DRC ผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ช่วง ± 1.5 เทียบกับวิธีมาตรฐานซึ่งอนุเคราะห์โดยศูนย์วิจัยยางสงขลา ณ ขณะนี้ ผู้วิจัยกำลังศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการตรวจจับการปลอมปนในน้ำยางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เครื่องวัด DRC และเพิ่มความน่าเชื่อถือด้วยการออกแบบเชิงวิศวกรรม

5. หนังสืออ้างอิง

- [1] D. C. Blackley, *Polymer Latices: Science and technology Volume 2: Types of latices*, 2nd ed. Springer, 1997.
- [2] วิภาวี พัฒนกุล "ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์" กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง , งานนิทรรศการพืชสวน เชียงใหม่ ตุลาคม 2554
- [3] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ,วารสารยางพารา PARA RUBBER ELECTRONIC BULLETIN ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2556
- [4] K. B. Khalid, "Determination of dry rubber content of hevea latex by microwave technique," *Pertanika J Sci Technol*, vol. 5(2), pp. 192–195, 1982.
- [5] L.M.K Tillekeratne, L.Karunanayake, P.H. Sarath Kumara, S. Weeraman ,A rapid and accurate method for determining the dry rubber content and total solid content of NR latex, *International Journal of Polymer Testing* , Elsevier , volume 8 , issue 5, 1988-1989, page 353-358

- [6] Zeena P. Hamza, Anna Dilfi, Muralidharan M N , Thomas Kurian, "Microwave Oven for the Rapid Determination of Total Solids Content of Natural Rubber Latex," *International Journal of Polymeric Materials* (Impact Factor: 2.78). 09/2008; 57(9), pp. 918-923.
- [7] “เตือนเกษตรกรอย่าใส่สารปลอมปนในน้ำยาง,” 15-Nov-2556. [Online]. Available: www.dailynews.co.th/Content/agriculture/82703.
- [8] สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), “ประเด็นโจทย์วิจัยยางพารา,” 02-Mar-2014. [Online]. Available: http://ird.rmutp.ac.th/old/files_upload/rubber2.pdf.
- [8] K. B. Khalid, “Microwave dielectric properties of hevea rubber latex,” *Asia-Pacific Microwave Conference, 1992*, Adelaide, Australia , pp. 611-616.
- [9] G. F. Engen, “A (Historical) Review of the Six-port Measurement Technique”, *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, vol. 45, no. 12, December 1997, pp. 2414-2417.
- [10] Vladimir Bilik, “SIX-PORT MEASUREMENT TECHNIQUE: PRINCIPLES, IMPACT, APPLICATIONS”, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Ilkovicova 3, SK-81219 Bratislava, Slovakia.
- [11] L. Qiao and S. P. Yeo, Member, IEEE, “Improved Implementation of Four-StandaProcedure for Calibrating Six-port Reflectometers”, *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 44, No.3, June 1995, pp 632-636
- [12] Hoer. C. A., “Using Six-port and Eight-Port Junction to Measure Active and Passive Circuit Parameter”, National Bureau of Standards Technical Note. No.673, September 1975
- [13] M. A. Stuchly, T. W. Athey, G. M. Samaras, and G. E. Taylor, “Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part II - experimental results,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 87-92, Jan. 1982.
- [14] N. I. Sheen and I. M. Woodhead, “An open-ended coaxial probe for broad-band permittivity measurement of agricultural products,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 74, no. 2, pp. 193-202, Oct. 1999.
- [15] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. Wiley, 2004.
- [16] E. Tuncer, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, “Dielectric mixtures: electrical properties and modeling,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 809- 828, Oct. 2002.
- [17] H. Jumiah, K. Khalid and W. Mohammad Daud Wan Yusoff, "Microwave Dielectric Properties of Hevea Rubber Latex in the Temperature Range of -30C to 50C" *Pertanika J Sci Technol*, vol. 5(2), pp. 179–190, 1997

- [18] K. Khalid, J. Hassan and W. D.W. Yusof, "Dielectric phenomena in hevea rubber latex and it application", *The 5th international conference on properties and application of dielectric materials*, May 35-30, 1997, Korea, pp.78-81.
- [19] K. B. Khalid, J. Hassan, and W. M. Daud, "The effect of ionic conductivity and dipole orientation on the dielectric loss of the hevea rubber latex," *Microwave Symposium conference*, San Francisco, 1996.
- [20] M. M. Gheretli, "Development of dual frequency microwave moisture sensor based on circular microstrip antenna," *Ph.D Thesis*, University Putra Malaysia, 2005
- [21] T.Jayanthi, P. E. Sankaranarayanan, "Measurement of Dry Rubber Content in latex Using Microwave Technique", *Measurement scient review* , vol. 5 ,section 3, 2005
- [22] 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 Sens. J.*, vol. 12, no. 10, pp. 3019–3030, 2012.
- [23] S.Darayan, C.Liu, L.C. Shen and D. Shattuck, "Measurement of electrical properties of contaminated soil," *Geophysical Prospecting*,1998, vol.46, pp.477-488
- [24] R. Maina, V.Tumiatti, "Dielectric Loss Characteristics of Copper-Contaminated Transformer Oils", *IEEE Transactions on power delivery*, vol.25, no.3 , July 2010
- [25] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย, ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, 2547, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- [26] เสาวณีย์ ก่ออุฎติกุลรังษี, การผลิตยางธรรมชาติ, 2547, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- [27] Engen F. Glenn, "Six-port measuring circuit", *United States Patent 4104583*, 1978.
- [28] T.S. Cooper, G. Baldwin and R. Farrell, "Six-port precision directional coupler", *ELECTRONICS LETTERS*, 12th October 2006 vol. 42 no. 21
- [29] G.F Engen, "An Improved Circuit for Implementing the Six-port Technique of Microwave Measurement", *IEEE Transactions on microwave Theory AND Techniques*, vol. 25, no.12, December 1977, pp. 1080-1984
- [30] G.F Engen, "The Six-port Reflectometer: An Alternative Network Analyzer", *IEEE Transactions on microwave Theory and Techniques*, vol. 25, no.12, December 1977, pp. 1075-1079
- [31] ไม่น้อย ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2544.
- [32] A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed. 2012.
- [33] M. Zahn, Y. Ohki, B David. Fenneman, Ronald J. Gripshover and Victor H. Gehman, " Dielectric Properties of Water and Water/Ethylene Glycol Mixtures for Use in Pulsed

Power System Design ", *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, vol. 74, no 9, september 1986, pp. 1182-1221.

- [34] Nelson, S.O. and Datta, A.K., 2001, Dielectric Properties of Food Materials and Electric Field Interactions. Handbook of Microwave Technology for Food Applications. New York. pp. 69-114.
- [35] Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., Wang, Y.,. "Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Ratio Frequency and Microwave Treatments," *Biosystems Engineering*, 2003, pp. 201-212.
- [36] Noh, S. H. and Nelson, S.O., "Dielectric properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz," *Trans. ASAE*, vol.32(3), 1989, pp. 991-998.
- [37] G.F Engen, "An Improved Circuit for Implementing the Six-port Technique of Microwave Measurement", *IEEE Transactions on microwave Theory AND Techniques*, vol. 25, no.12, December 1977, pp. 1080-1984

โครงการวิจัยย่อย

การตัดแยกผลปาล์มและการประเมินหา
เปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์ม

1. เกริ่นนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยและของโลกเนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงที่สุดในบรรดาจากกลุ่มพืชน้ำมันทั้งหมด ผลผลิตจากปาล์มน้ำมันคือน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ทั้งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสินค้าอุปโภคและบริโภค เช่น สบู่ เนยเทียม ครีมเทียม ฯลฯ นอกจากนี้ ผลผลิตของน้ำมันดิบจากปาล์มยังสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกทดแทนการใช้ น้ำมันจากซากฟอสซิลที่นับวันจะหมดไปจากโลก ในประเทศไทย ปาล์มน้ำมันสายพันธุ์เทอร์เนรา (*var. Tenera*) เป็นสายพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุดเนื่องจากสามารถให้ผลผลิตน้ำมันสูงและไม่เป็นหมัน

ข้อมูลสถิติจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรรายงานว่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554-2557 ราคาและปริมาณการส่งออกของปาล์มไม่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ราคาในตลาด คุณภาพ และปริมาณการผลิต คุณภาพและปริมาณของผลผลิตน้ำมันปาล์มดิบในอุตสาหกรรมขึ้นกับคุณภาพของผลผลิตที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวโดยตรงและส่งผลกับราคาในท้องตลาดด้วย ปัจจุบัน ในการซื้อขายผลผลิตปาล์มน้ำมัน เกษตรกรจะนำทะลายปาล์มดิบมาขายให้กับลานรับซื้อ จากนั้นลานรับซื้อจะรวบรวมผลผลิตไปขายให้กับโรงงานอุตสาหกรรม ในการกำหนดราคาซื้อขายในสองขั้นตอนที่กล่าวมา จะประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญที่พิจารณาจากสีภายนอกพร้อมกับลักษณะอื่นๆ ประกอบกัน เกณฑ์การพิจารณานั้นไม่ชัดเจน มีการใช้ดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญนั้น ราคาของผลผลิตที่เกษตรกรได้รับจึงเป็นราคาที่ประเมินจากผู้เชี่ยวชาญคุณกับน้ำหนักที่ชั่ง การประเมินโดยอิงกับความสามารถของมนุษย์จะไม่เหมาะสมหากต้องประเมินทะลายปาล์มจำนวนมากและต้องทำงานติดต่อกันเป็นเวลานาน นอกจากนี้ ลานรับซื้อจะต้องรับความเสี่ยงจากการประเมินของโรงงาน ทำให้เกษตรกรที่ขายผลผลิตให้กับลานรับซื้อจะต้องรับความเสี่ยงดังกล่าวด้วย ส่งผลให้เกษตรกรได้ราคาที่ต่ำลง นอกจากนี้ ในบางกรณีพบเจอเกษตรกรนำผลผลิตที่มีคุณภาพด้อยเพราะปาล์มยังไม่สุกเต็มที่มาขายให้กับลานรับซื้อด้วย ส่งผลให้โรงงานผลิตจะต้องแบกรับภาระต้นทุนในการผลิตที่สูงขึ้น เนื่องจากผลผลิตที่ด้อยคุณภาพต่อการผลิตในแต่ละครั้ง

ตัวบ่งชี้คุณภาพของผลปาล์มน้ำมันคือปริมาณน้ำมันในผลนั้น มีวิธีการมาตรฐานที่ประเมินการประเมินสามารถทำได้โดยสุ่มตัวอย่างผลปาล์มในทะลายปาล์มแล้วนำมาวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการซอกซ์เลต (Soxhlet Extraction) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวกินเวลา ใช้สารเคมี ใช้เครื่องมือและผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง และต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมสำหรับลานรับซื้อซึ่งเป็นงานภาคสนาม นอกเหนือจากวิธีมาตรฐานแล้ว ยังมีวิธีการประเมินระดับความสุกและปริมาณน้ำมันในผลปาล์มทางอ้อมดังต่อไปนี้

- วิธีการประเมินด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นวิธีที่รวดเร็ว หลักการคือการส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปสั่นผลปาล์ม จากนั้นจึงใช้โพรมิตการตอบสนองของการสั่นดังกล่าวและไปคำนวณปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วย คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกล การติดตั้งระบบและการใช้งานค่อนข้างจึงต้องการความละเอียด

- วิธีการส่งคลื่นไมโครเวฟ มีงานวิจัยของนักวิจัยชาวมาเลเซียใช้วิธีการส่งคลื่นไมโครเวฟไปตกกระทบเนื้อปาล์มเพื่อวัดความชื้นภายในผลปาล์ม ต่อมาได้พบว่าความชื้นในผลปาล์มมีความแปรผันกันกับปริมาณน้ำมันได้ผลปาล์ม จึงได้มีงานวิจัยหาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำมันในผลปาล์มเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่วัดได้โดยผลลัพธ์ได้เปรียบเทียบกับวิธีการชอกห์เลต อย่างไรก็ตามวิธีวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก ต้องทำลายผลปาล์ม และใช้จุดวัดหลายจุด ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการวัด
- วิธีการเนียร์อินฟราเรด (NIR) ได้มีงานวิจัยนำเสนอการวัดด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนพลังงานคลื่นใกล้ย่านอินฟราเรดที่ช่วงความยาวคลื่น 700-2,500 นาโนเมตร แต่วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ใช้เครื่องมือราคาสูง จึงได้พยายามพัฒนาต่อยอดในงานวิจัย เพื่อสร้างเครื่องเนียร์อินฟราเรดแบบไฮโอดที่มีราคาถูกลง สำหรับวัดปริมาณน้ำมันและความชื้นในผลปาล์มสำหรับผู้ประกอบการ
- วิธีการประมวลผลภาพ เนื่องจากสีของผลปาล์มแปรตามปริมาณน้ำมันปาล์มในแต่ละช่วงความสุขของผลปาล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากสารแคโรทีนอยด์และแอนโทไซยานินในผลปาล์ม จึงมีงานวิจัยที่นำเสนอการใช้ความสัมพันธ์ของสีผิวกับความสุกหรือปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม เช่น ในงานวิจัย ของชาวมาเลเซีย ได้มีการคัดแยกผลปาล์มออกเป็นสีเกรด คือ ดิบ อ่อน สุก และ แก่ จากภาพถ่ายผลปาล์ม โดยใช้ค่าสี Hue เป็นหลัก งานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำถึงร้อยละ 91.5

ในโครงการวิจัยนี้ ได้สังเคราะห์แนวทางการวิเคราะห์เพื่อประเมินระดับความสุขและประเมินเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลและทะลายปาล์มด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพและไมโครเวฟ โครงการนี้มีงานย่อยจำนวน 3 งานได้แก่

- (1) เทคนิคการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- (2) โปรแกรมวัดความระดับความสุขของผลปาล์มบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ สำหรับให้เกษตรกรนำไปใช้ในการวางแผนการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีที่สุดออกสู่ท้องตลาด
- (3) อุปกรณ์ประเมินระดับความสุขและประเมินปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม ซึ่งสามารถใช้ได้กับผลที่สุ่มออกมาจากทะลาย หรือผลปาล์มร่วง เพื่อช่วยประกอบการตัดสินใจในการประเมินราคาในเบื้องต้น

ทั้งสามงานออกแบบมาสำหรับประเมินคุณภาพของผลปาล์มเบื้องต้นเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจคุณภาพของผลปาล์มก่อนหรือหลังเก็บเกี่ยว ให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว และเป็นเครื่องมือในการประเมินราคาซื้อขายโดยไม่ต้องใช้ดุลยพินิจ ขอบเขตของงานวิจัยชุดนี้จะเลือกใช้พันธุ์ปาล์มสายพันธุ์ เทอนาร่า สายพันธุ์ย่อย สุราษฎร์ธานี 2 (*Elaeis quineensis* Jacq. var. *Tenera*) ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่นิยมเพาะปลูกในภาคใต้ ลักษณะผลปาล์มอ่อนจะมีสีดำ ส่วนถ้าสุกแล้วจะมีสีแดงส้ม

เทคนิคการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในขณะที่ผลปาล์มกำลังสุก คาร์โบไฮเดรตในชั้นเนื้อปาล์ม (Mesocarp) จะทำการเปลี่ยนจากกลีเซอรไรด์ ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม เนื่องจากกลไกต่างๆที่เกิดขึ้นภายในผลปาล์มแต่ละส่วนมีการกระจายไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการสร้างฟังก์ชันทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ซึ่งสัมพันธ์กับความชื้นที่เปลี่ยนไปภายในผล จะใช้ค่าเฉลี่ยที่วัดจากจุดต่างๆในผลปาล์มเป็นหลัก โดยค่าความชื้นดังกล่าวสามารถนิยามได้ด้วยสัดส่วนดังสมการที่ 1

$$MC = \frac{W_w}{W_w + W_o + W_f} \quad (2.1)$$

เมื่อ W_w , W_o และ W_f คือ น้ำหนักของน้ำ น้ำมันปาล์ม และไฟเบอร์ในผลปาล์มตามลำดับ จากสมการที่ 2.1 สามารถกล่าวได้ว่า ในขณะที่ผลปาล์มกำลังสุก สัดส่วนของน้ำหนักจะเปลี่ยนไป โดยปริมาณน้ำจะลดลง ในขณะที่เดียวกันน้ำมันปาล์มจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถนิยามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันปาล์มกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งแปรผันกับน้ำหรือความชื้นในผลปาล์มได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสอง ดังสมการที่ 2.2

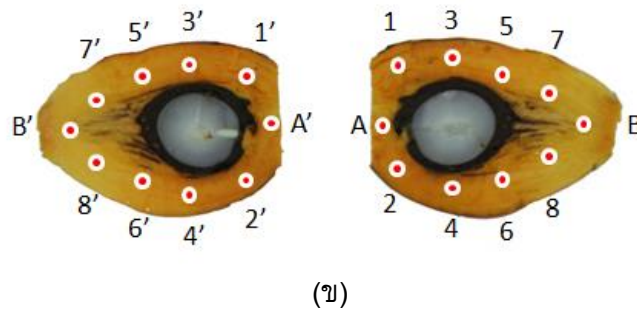
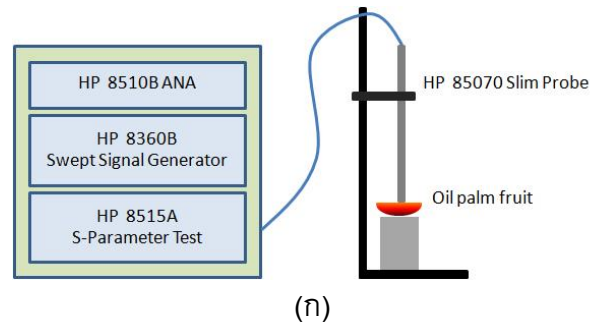
$$OER = a\bar{\epsilon}'^2 + b\bar{\epsilon}' + c \quad (2)$$

เมื่อ a , b และ c คือ สัมประสิทธิ์ของสมการ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอย (Least square regression)

3. การทดลองและผลการทดลอง

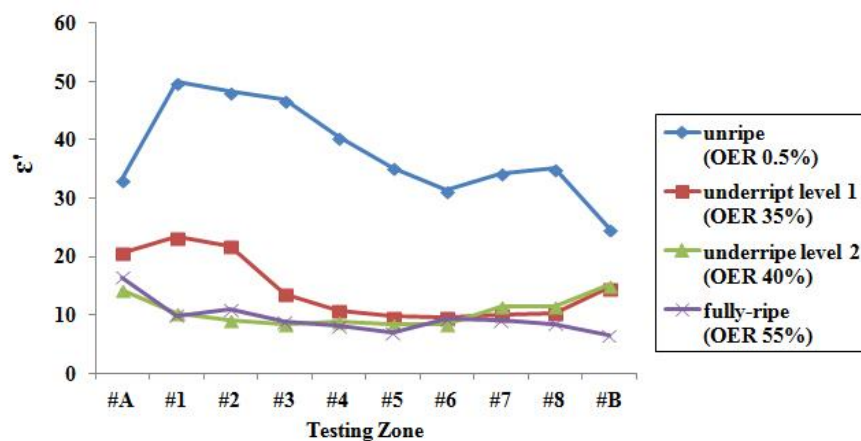
3.1 เทคนิคการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการทดลองจะใช้โพรวัดไดอิเล็กตริกรุ่น HP85070E เชื่อมต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รุ่น HP 8510C ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก) ทดสอบวัดที่ความถี่ 2.45 GHz ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส โดยได้ผ่าผลปาล์มออกเป็นสองส่วนและได้แบ่งจุดวัดออกเป็น 20 ส่วน (ฝั่งละ 10 ส่วนสมมาตรกัน) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ข) จุด A คือบริเวณปลายของผล และ จุด B คือบริเวณหัวของผลปาล์ม

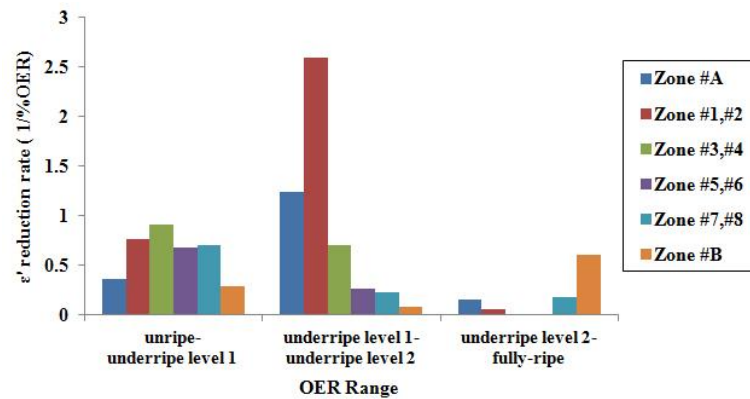


รูปที่ 2.1 การจัดการทดสอบเพื่อวัดค่าไดอิเล็กตริกของผลปาล์ม (ก) ไลอะแกรมของการทดลอง (ข) ตำแหน่งที่วัดผลปาล์ม

ในการสร้างฟังก์ชัน ใช้ตัวอย่างในการสร้างฟังก์ชัน จำนวน 5 ตัวอย่างต่อระดับความสุกทั้งหมด 4 กลุ่ม คือ อ่อน กำลังสุกระดับที่ 1 กำลังสุกระดับที่ 2 และ สุกเต็มที่ รวมเป็น 20 ตัวอย่าง จากกราฟในรูปที่ 2.2(ก) พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่วัดได้ในผลปาล์มโดยเฉลี่ยลดลง ในขณะที่ผลปาล์มมีระดับความสุกเพิ่มขึ้น โดยอัตราการลดลงของค่าไดอิเล็กตริกแสดงได้ดังรูปที่ 2.2(ข)



(ก)

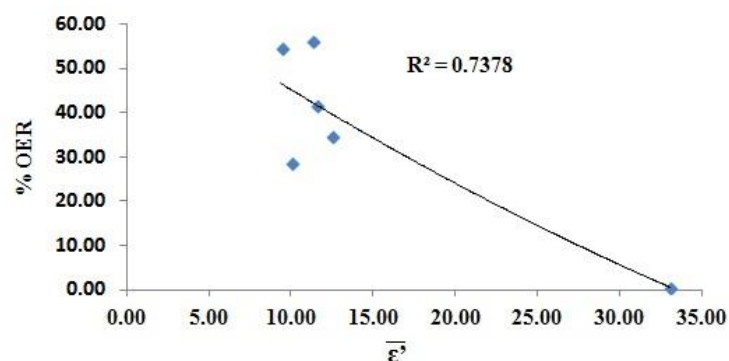


(ข)

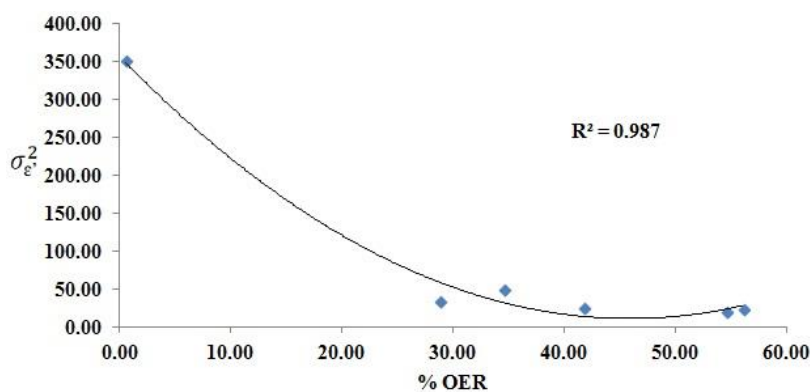
รูปที่ 2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ณ จุดวัดต่างๆ (ก) ค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) อัตราการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์ม (OER) ที่นำมาใช้ในการสร้างฟังก์ชันทำนายปริมาณน้ำมันปาล์ม จะได้จากวิธีการมาตรฐานชอกห์เลต ซึ่งวัดโดยห้องปฏิบัติการกลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผลปาล์มที่ทดสอบมีปริมาณน้ำมันในช่วง 0.5-55 % กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเฉลี่ยกับปริมาณน้ำมันในผลปาล์มแสดงดังรูปที่ 2.3(ก) อธิบายได้ดังสมการที่ 2.2 จากความสัมพันธ์ดังกล่าว นอกจากค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแล้วยังพบว่า ความแปรปรวนของปริมาณน้ำมันในผลปาล์มจากจุดวัดทั้ง 20 จุด จะเริ่มลดลงขณะผลปาล์มกำลังสุก ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข)

$$\text{OER} = 0.0137\bar{\epsilon}'^2 - 2.5269\bar{\epsilon}' + 69.09 \quad (2.3)$$



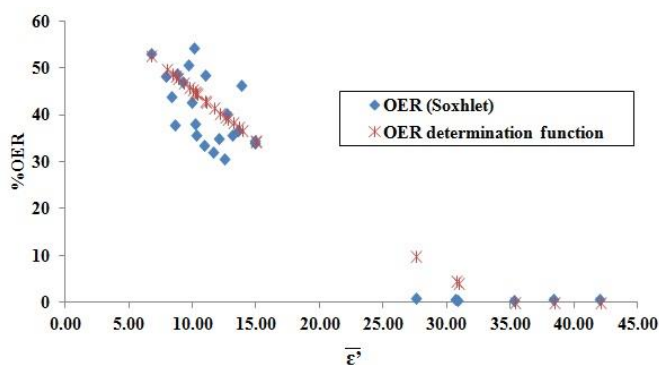
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม กับ (ก) ค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ (ข) ค่าความแปรปรวนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เมื่อนำสมการที่ 2.3 มาทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อน ด้วยตัวอย่างอีก 28 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.4 พบว่าได้ความแม่นยำร้อยละ 95.63 ในช่วงปริมาณน้ำมันทดสอบ 0-55% ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.29-10.39%



รูปที่ 2.4 ผลทดสอบฟังก์ชันทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

3.2 การทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ

การทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าสีภายนอกของผลปาล์ม ในหลายกรณีพบว่า สภาพภายนอกของผลิตผลทางการเกษตร (สี ผิว ลักษณะรูปผล ฯลฯ) สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรนั้นได้ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายคุณภาพของผลผลิตจากคุณลักษณะสีผิวซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นเทคนิคการวัดแบบไม่ทำลายผลผลิต มีการนำเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลและเทคนิคการคัดแยกกลุ่มตัวอย่างมาใช้เป็นกระบวนการหลักสำหรับทำนายคุณภาพผลผลิตดังกล่าว เทคนิคดังกล่าวมีการนำข้อมูลความเข้มของสีสามสี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) หรือ ความเข้มของสีเชิงสเปกตรัม หรือฮิว (Hue) มาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ งานวิจัยเหล่านี้เช่นการทำนายคุณภาพของมังคุดหลังการเก็บเกี่ยวโดยหาความสัมพันธ์ของค่าสีฮิวของเปลือกมังคุดกับองค์ประกอบของสาร

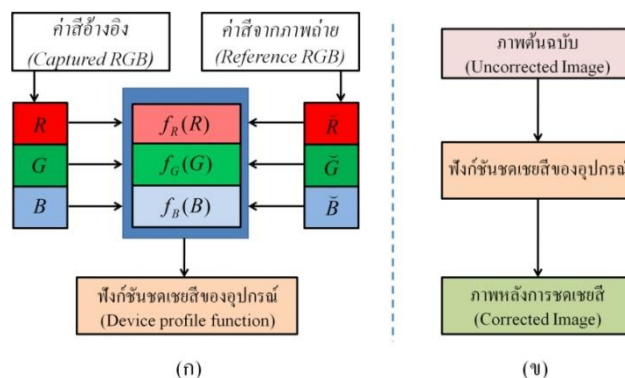
แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) การทำนายสีของเนื้อลูกพีชคลิงสโตน (Clingstone peach) จากความสัมพันธ์ระหว่างสีผิวของเนื้อและสีของเปลือก การคัดแยกคุณภาพของผลมันฝรั่งด้วยการสร้างดัชนีค่าสี 1 ขนาดมิติ (1-Dimensional Index) บนปริภูมิสีสามมิติของสีแดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่แปลงค่าสีแดง เขียว และน้ำเงิน ของผลแอปเปิ้ลเป็นโทนสีเทา (Gray scale) และนำไปวัดคุณภาพของผลแอปเปิ้ล ดังนั้น หากใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลอื่นๆจะสามารถนำไปคัดแยกระดับความสุกรวมถึงทำนายปริมาณน้ำมันปาล์มในผลและทะลายปาล์มได้

เนื่องจากในปัจจุบัน วงจรประมวลผล (Processor) มีสมรรถนะการทำงานที่ระดับสัญญาณพิกเซลความถี่สูง สามารถประมวลผลข้อมูลได้เร็ว นอกจากนี้ ด้วยเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้ผู้ผลิตสามารถพัฒนาเซ็นเซอร์รับภาพและซีมอส (Digital CMOS sensor) ที่มีความละเอียดสูง ราคาถูก และขนาดเล็กได้ ทำให้อุปกรณ์กล้องเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ติดตั้งในอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ยุคใหม่ (Smart device) เช่น แท็บเล็ต (tablet) โทรศัพท์มือถือ (mobile phone) รวมถึงเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (Notebook) การติดตั้งอุปกรณ์กล้องดิจิทัลพร้อมหน่วยประมวลผลสมรรถนะสูงทำให้สามารถพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อปรับแต่งภาพตลอดจนการชดเชยสีได้ และยังเปิดโอกาสในการพัฒนาฟังก์ชันรองรับการใช้งานในด้านเกษตรอิเล็กทรอนิกส์ได้

ภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักสามส่วนคือ ตัวกล้อง สภาวะแสง และลักษณะวัตถุที่ถ่าย กรณีส่วนของตัวกล้อง อุปกรณ์เซ็นเซอร์รับภาพ เลนส์ ตลอดจนไปถึงโปรแกรมประมวลผลภาพในกล้อง เช่น กระบวนการปรับสมดุลสีขาวอัตโนมัติ (Automatic white-balance หรือ AWB) ล้วนส่งผลให้ภาพที่ได้จากกล้องต่างรุ่นจะมีค่าสีที่แตกต่างกัน (Device-dependence effect) แม้ถ่ายภาพวัตถุเดียวกันและที่สภาวะแสงเดียวกัน แม้แต่กระบวนการปรับสมดุลสีขาวอัตโนมัติจากกล้องดิจิทัลแต่ละรุ่นก็ถูกออกแบบมาเฉพาะด้วยอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน ดังนั้นสมรรถนะในการชดเชยสภาวะแสงที่แตกต่างกัน (different illuminants) จึงแตกต่าง

3.2.1 กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่น

กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่นกันที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้มีสองขั้นตอน คือ การวิเคราะห์หาฟังก์ชันของกล้อง (Device profile function) และการชดเชยสี ฟังก์ชันนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเลนส์ดิจิทัลในกล้อง อัลกอริทึมสำหรับประมวลผลภาพของกล้อง เป็นต้น รายละเอียดขั้นตอนของวิธีการคำนวณฟังก์ชันสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.5(ก) ขั้นตอนหาฟังก์ชันจะใช้อัลกอริทึม Least Square Regression ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าสีอ้างอิงโดยวัดจากเครื่อง Colorimeter HunterLab ColorFlex กับค่าสีที่ได้จากการถ่ายภาพที่อ้างอิงได้ ด้วยสมการพหุนามอันดับสอง ดังสมการที่ 2.4 ผลลัพธ์ของภาพสีที่ได้จะเป็นภาพที่มีค่าสีที่ผ่านการชดเชยแล้วตามขั้นตอนแสดงในรูปที่ 2.5(ข)



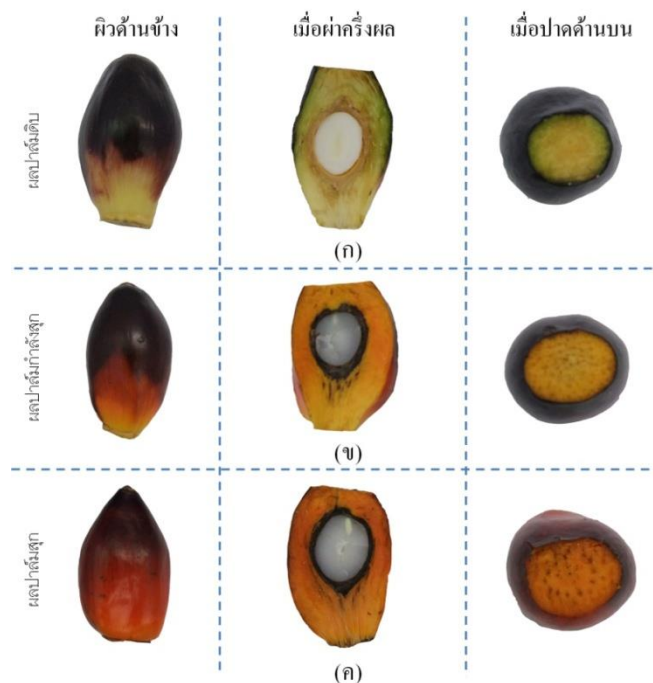
รูปที่ 2.5 กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่น
(ก) การหาฟังก์ชันชดเชยสีของอุปกรณ์ และ (ข) กระบวนการชดเชยสี

$$\begin{aligned}\tilde{R} &= f_R(R) \\ \tilde{G} &= f_G(G) \\ \tilde{B} &= f_B(B)\end{aligned}\tag{2.4}$$

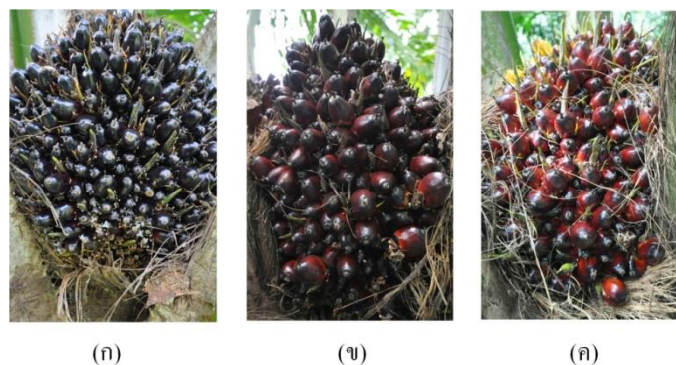
3.2.2 ลักษณะสีของผลและทะลายปาล์มน้ำมัน

รงควัตถุ (Natural pigment) คือองค์ประกอบพื้นฐานของสีในสิ่งมีชีวิตที่ปรากฏ เช่น สีใบ ดอก ผลของพืช รวมถึงผิวหนังของสัตว์ สำหรับผลปาล์มน้ำมันมีรงควัตถุคือคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และ แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) คลอโรฟิลล์คือ สารสีเขียวที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของพืชที่ดูดซับคลื่นแสงในช่วง 430 และ 670 นาโนเมตร แคโรทีนอยด์เป็นสารสีส้มแดงสามารถสกัดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเรียกว่าแคโรทีน เช่น อัลฟา-แคโรทีน และ เบต้า-แคโรทีน สำหรับรงควัตถุพื้นฐานสุดท้ายคือแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) ซึ่งสีที่ปรากฏจะขึ้นอยู่กับสภาวะกรดหรือด่าง สำหรับในผลปาล์ม รงควัตถุแอนโทไซยานินจะผสมกับสารฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และปรากฏเป็นสีเหลืองส้มโดยจะดูดกลืนคลื่นแสงในย่าน 530 นาโนเมตร

ในขณะที่ผลปาล์มกำลังสุกดังแสดงในรูปที่ 2.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตจะลดลงและจะเปลี่ยนไปเป็นกรดกลีเซอไรด์ (Glyceride acid) นอกจากนี้ ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงจะทำให้สีผลปาล์มเปลี่ยนจากเหลืองเป็นแดงส้มซึ่งจะถูกดูดซับคลื่นในช่วง 430 และ 670 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีอิว (Hue) ซึ่งอยู่บนปริภูมิ HSV (Hue Saturation Value) แล้ว พบว่าสีของผลปาล์มจะเปลี่ยนแปลงในช่วง -10 ถึง 70 องศา และค่าสีอิวจะเข้าใกล้ 0 องศา (ซึ่งเป็นสีแดง) มากที่สุดเมื่อผลปาล์มสุกเต็มที่ ส่งผลให้ลักษณะสีของทะลายปาล์มเป็นไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 สีของผลปาล์มขณะผลปาล์มสุก (ก) ผลปาล์มดิบ (ข) ผลปาล์มกำลังสุก และ (ค) ผลปาล์มสุก



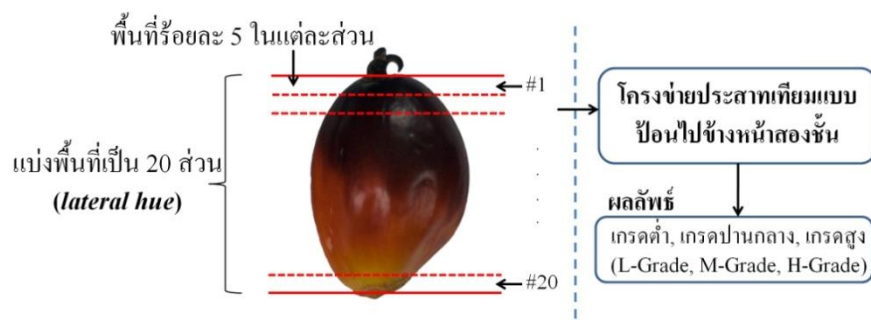
รูปที่ 2.7 สีของทะลายปาล์มขณะทะลายปาล์ม (ก) ดิบ (ข) กำลังสุก และ (ค) สุก

3.2.3 การคัดแยกระดับความสุกและทำนายปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมัน

กระบวนการคัดแยกระดับความสุกและทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มน้ำมัน (Oil Extraction Rate : OER) ทั้งหมดเริ่มต้นจากการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมันเป็น 3 ระดับ เมื่อคัดแยกระดับความสุกแล้ว ผลลัพธ์จะต่อไปยังกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมัน

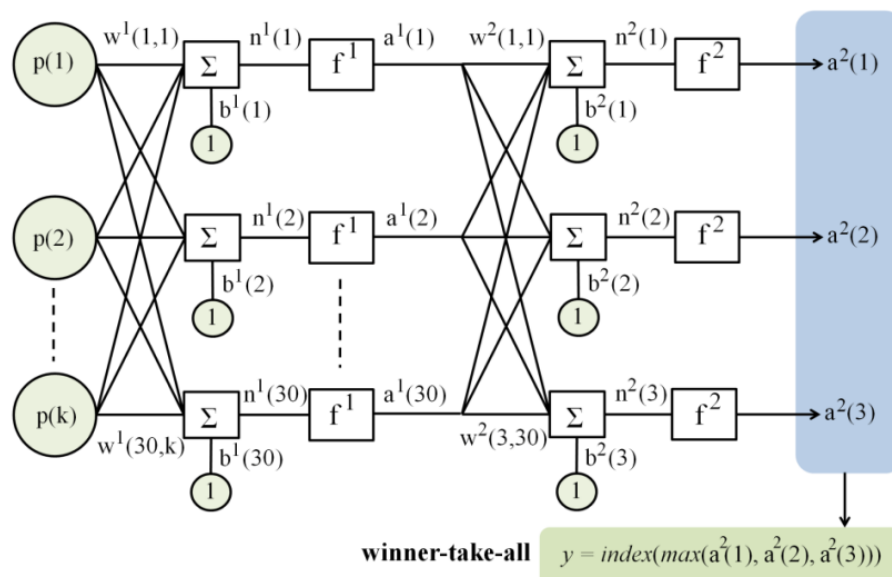
(1) แบบจำลองการแบ่งระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม (RDC) โดยใช้คุณลักษณะเด่น (Feature) จากสีผิวของผลปาล์มดังแสดงในแผนผังกระบวนการในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพรวมของอัลกอริทึมสำหรับคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 2.8 สีผิวของผลปาล์ม (Lateral hue) ถูกแบ่งออกเป็น 20 ส่วน ($k=20$) ตามแนวความสูงของผลปาล์มเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าสีผิวในแต่ละส่วน จากนั้นผลลัพธ์จะส่งต่อไปยังตัวคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม (RDC) ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนด้านหน้าสองเลเยอร์ (Two-layer feedforward neural network) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม (RDC)

กระบวนการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มจะเลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบซ่อนเลเยอร์ (Layer) ขนาด 30 โหนด (Node) ในรูปที่ 2.8 แสดงโครงข่ายที่นำเสนอประกอบด้วยเลเยอร์ผลลัพธ์ (Output layer) 3 โหนดตามค่าระดับความสุก ได้แก่ สุกน้อย (L-Grade) ปานกลาง (M-Grade) และสุกมาก (H-Grade) ระดับความสุกของผลปาล์มจะวิเคราะห์จากเทคนิค “winner take all” ซึ่งเลือกค่าน้ำหนักของเลเยอร์ผลลัพธ์ที่ให้ค่ามากที่สุดจากทั้งหมด กำหนดให้ค่าน้ำหนักผลลัพธ์ของแต่ละเลเยอร์คือ a^1 , a^2 และระดับความสุกของผลปาล์ม y จะสามารถนิยามได้จากสมการ (2.5)-(2.7)

$$\mathbf{a}^1 = \mathbf{f}^1(\mathbf{W}^1\mathbf{p} + \mathbf{b}^1) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2\mathbf{a}^1 + \mathbf{b}^2) \quad (2.6)$$

$$y = \text{index}(\max\{\mathbf{a}^2\}) \quad (2.7)$$

เมื่อ $\mathbf{f}^1, \mathbf{f}^2$ คือฟังก์ชันซิกมอยด์ของเวกเตอร์ (Sigmoid function vector) ของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

$\mathbf{p}$ คือเวกเตอร์ของสีผิวของผลปาล์ม ($\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2$) คือเมตริกซ์ค่าน้ำหนักของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์ และ

$(\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2)$ คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

ค่า $(\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2)$ และ $(\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2)$ จะคำนวณจากกระบวนการเรียนรู้แบบ SCG (Scaled Conjugate Gradient Back propagation training process) ผลลัพธ์ค่าระดับความสุขของผลปาล์ม y จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อกำหนดเลือกฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่า OER ในกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มในขั้นตอนต่อไป

3.2.4 ประสิทธิภาพของแบบจำลองการคัดแยกระดับความสุขของผลปาล์มน้ำมัน

การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการแบ่งระดับความสุขของผลปาล์มน้ำมันที่ใช้จำนวน 45 ตัวอย่างเปรียบเทียบกับกระบวนการวิเคราะห์แบบซอกท์เลต การทดลองพบว่า ผลปาล์มที่นำมาเป็นตัวอย่างทั้ง 45 ตัวอย่างมีค่า OER ในช่วงร้อยละ 30-73 ตารางที่ 2.1 กำหนดระดับความสุขของผลปาล์ม 3 ระดับโดยสัมพันธ์กับค่า OER ในกลุ่มตัวอย่าง 45 ตัวอย่าง โดยคัดผลปาล์มที่มีระดับความสุขระดับละ 15 ตัวอย่าง

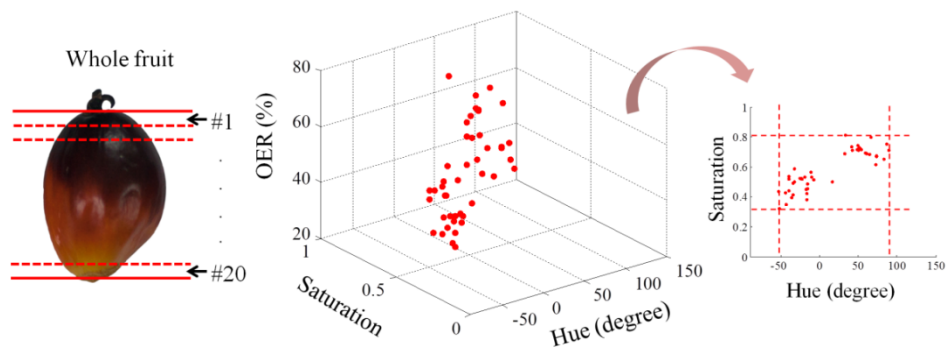
ตารางที่ 2.1 ช่วงปริมาณน้ำมันของผลปาล์มในแต่ละระดับความสุข

ระดับความสุข	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
OER	30.0-40.0	40.0-50.0	>50.0

ผลการทดสอบพบว่าค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเรียนรู้เท่ากับ 4.2×10^{-3} ในระหว่างกระบวนการเรียนรู้ไม่พบการจำแนกระดับความสุขผิด นอกจากนี้ เมื่อทดสอบเพิ่มเติมกับผลปาล์ม 64 ผลที่ยังไม่เคยถูกนำไปใช้ในกระบวนการเรียนรู้ ไม่พบการจำแนกระดับความสุขที่ผิดพลาดเช่นกัน

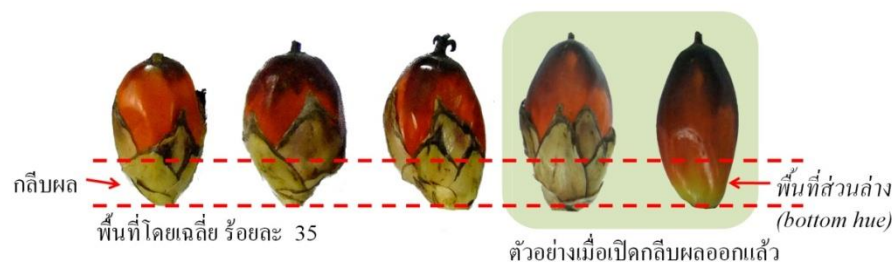
3.2.5 กระบวนการทำนาย OER (OER Determination Algorithm)

ในการทำนายค่า OER จะนำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบสมการพหุนามเพื่อให้ระบบทั้งหมดมีความซับซ้อนน้อยที่สุด คุณลักษณะเด่นที่นำมาประยุกต์ใช้คือค่าสีผิว และค่าความอิ่มตัวของสีของผลปาล์ม (Hue and Saturation) ของภาพผลปาล์มเป็นบริเวณย่อยทั้งสิ้น 20 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

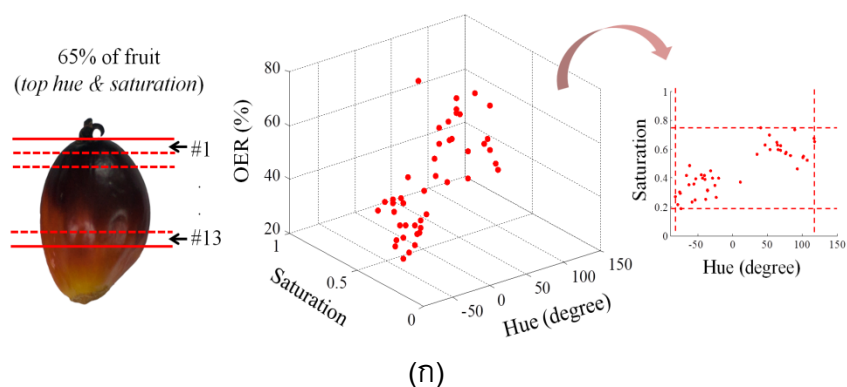


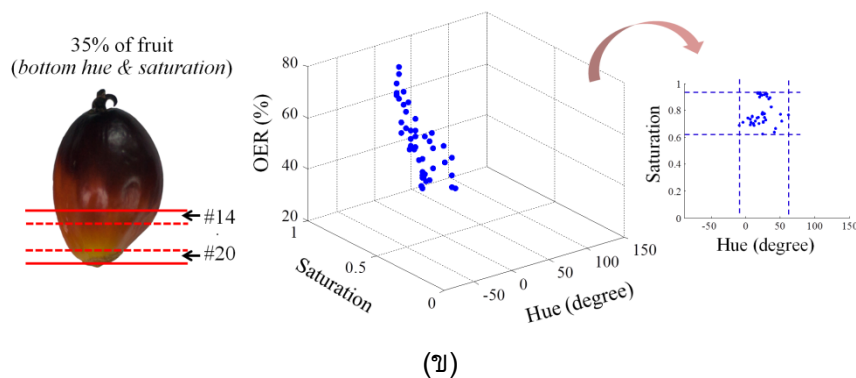
รูปที่ 2.10 ค่าสีและความอืดตัวเฉลี่ย 20 ส่วนของผลปาล์มช่วงน้ำมัน 30-73%

กราฟในรูปที่ 2.10 พบว่า มีการกระจายตัวของข้อมูลสูงเนื่องจากผลปาล์มอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้ เช่น แสง ความชื้น ฯลฯ จึงทำให้ผิวด้านบนของผลปาล์มมีโอกาสถูกรบกวน ดังนั้นจึงแบ่งการพิจารณาลักษณะของผลปาล์มออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 จะพิจารณาจากกลีบของผลที่ช่วยปิดบังไม่ให้เกิดการถูกรบกวนซึ่งมีพื้นที่โดยประมาณร้อยละ 35 ของพื้นที่ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และส่วนที่สองคือ ส่วนผลปาล์มที่เหลือ จากการทดลองพบว่า ค่าความแปรปรวนของข้อมูลสี ความอืดตัว และ ปริมาณน้ำมันที่วัดได้จากผลปาล์มส่วนที่กลีบบังมีความแปรปรวนต่ำกว่าส่วนบนดังรูปที่ 2.12 ดังนั้น ฟังก์ชันสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มจึงออกแบบจากข้อมูลบริเวณส่วนของผลปาล์มที่กลีบบังส่วนล่าง ดังแสดงในสมการที่ 2.8



รูปที่ 2.11 ผลปาล์มที่ถูกปกปิดด้วยกลีบผล





รูปที่ 2.12 ค่าสีและความอืดตัวของเนื้อ 20 ส่วนของผลปาล์มแต่ละช่วงน้ำมัน (ก) ส่วนบน (ข) ส่วนล่าง

$$OER = p_{00} + p_{10}H_{ave} + p_{01}S_{ave} + p_{20}H_{ave}^2 + p_{11}H_{ave}S_{ave} + p_{02}S_{ave}^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ H_{ave} คือค่าเฉลี่ยสีฮิวของบริเวณพื้นที่ส่วนล่าง

S_{ave} คือค่าเฉลี่ยความอืดตัวของสีของบริเวณพื้นที่ส่วนล่าง

จากการทดลองสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 45 กลุ่มพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ทำนายปริมาณน้ำมัน สามารถนิยามได้ดังตารางที่ 2.2 และเมื่อทดสอบด้วยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 64 กลุ่มพบว่า มีความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 2.2 %OER ดังแสดงในตารางที่ 2.3

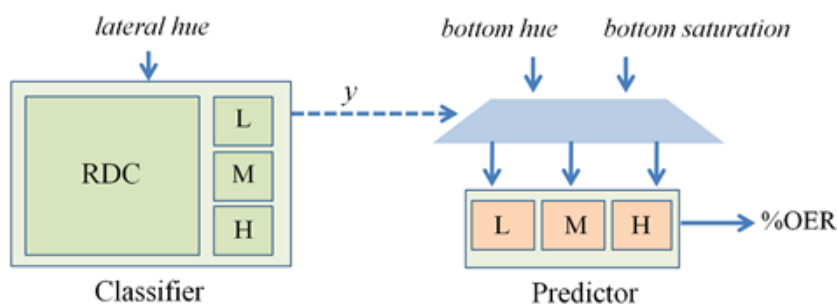
ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ทำนายปริมาณน้ำมัน

ระดับความสุก	ค่าสัมประสิทธิ์					
	p_{00}	$p_{10} \times 10^{-2}$	p_{01}	$p_{20} \times 10^{-4}$	$p_{11} \times 10^{-2}$	p_{02}
เกรดต่ำ	-433.1	-34.83	1322.00	-45.12	90.35	-937.70
เกรดกลาง	47.8	6.68	-17.49	27.30	-35.41	23.22
เกรดสูง	408.1	80.54	-923.80	-35.70	-117.70	602.60

ตารางที่ 2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม
ด้วยกลุ่มตัวอย่าง 64 ผล

ค่าความคลาดเคลื่อน (OER) แต่ละเกรด			
ต่ำ	กลาง	สูง	เฉลี่ย
1.38	1.30	2.81	2.20

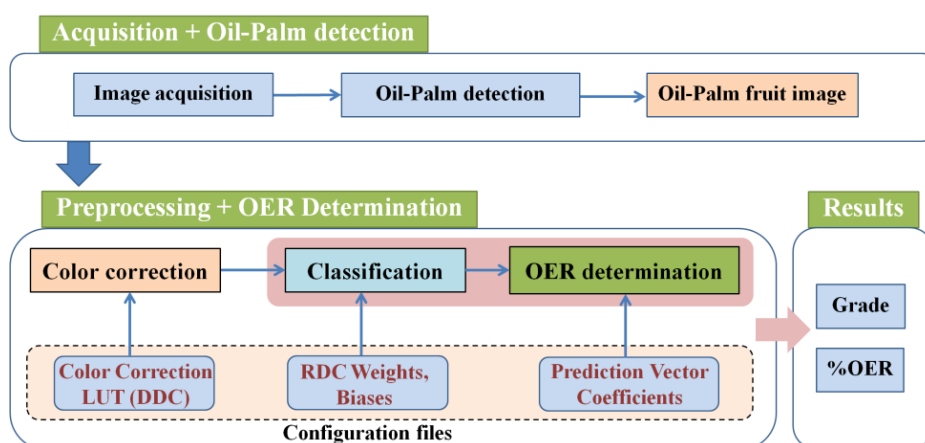
จากกระบวนการทั้งหมด สามารถเขียนเป็นกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเป็นกระบวนการสำหรับนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปบน โทรศัพท์มือถือ และ อุปกรณ์วัดระดับความสูงของผลปาล์มต่อไป



รูปที่ 2.13 กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม

3.2.6 การออกแบบโปรแกรมทำนาย OER ในผลปาล์มบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่

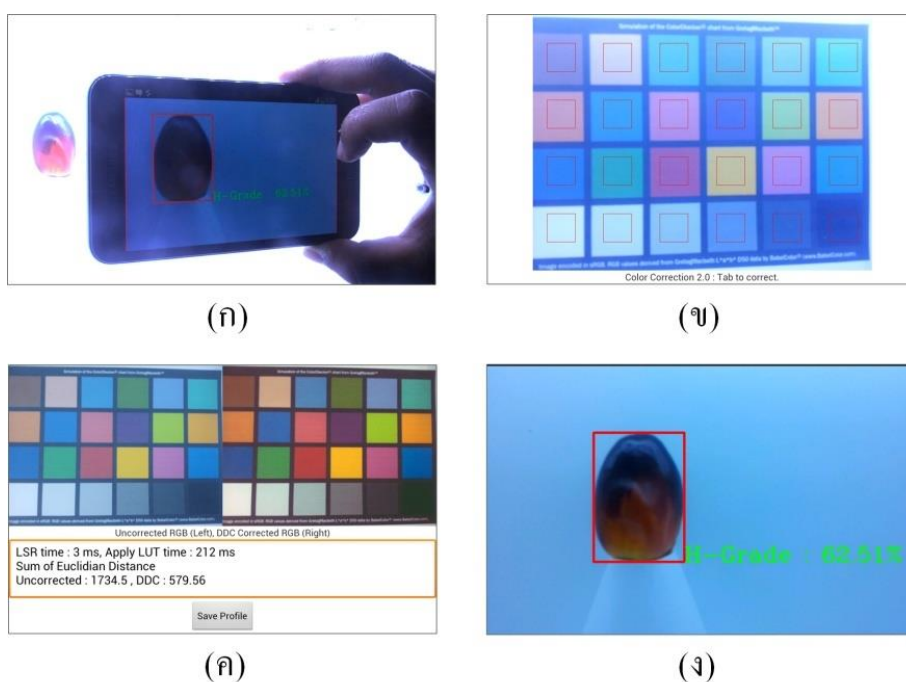
ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอ การประยุกต์กระบวนการชดเชยสี คัดแยกระดับความสูง ตลอดจนถึง กระบวนการทำนาย OER เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ โปรแกรมดังกล่าวถูก พัฒนาบนพื้นฐานระบบโค้ดแบบเปิดเผย (Open source) ประกอบด้วย OpenCV, JAMA (A java matrix package) และ ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) โครงสร้างของโปรแกรมทั้งหมดดัง แสดงในรูปที่ 2.14 โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือส่วนจับภาพผลปาล์ม ชดเชยสี และคำนวณ OER ในการจับภาพของผลปาล์ม ภาพผลปาล์มจะถูกแยกออกจากพื้นหลังด้วยเทคนิคการหาเส้นรอบรูป ของผลปาล์มที่อยู่ในฉาก การประมวลผลภาพจะพัฒนาโดย OpenCV เป็นหลักใน และจะ ประยุกต์ใช้ JAMA เป็นหลักในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์และสร้างขึ้นบนพื้นฐาน ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่มีลักษณะหน้าจการทำงานแบบโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่านทางจอภาพแบบ สัมผัส (Graphic user interface, GUI)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม

สำหรับกระบวนการชดเชยสี จะใช้ JAMA เป็นหลักในการประมวลผล โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบถดถอยสำหรับสมการชดเชยสีของอุปกรณ์ (device profile function) ซึ่งสามารถลดเวลาในการประมวลผลได้อย่างมาก เนื่องจากพื้นฐานการคำนวณเมตริกซ์มีการเรียกใช้ชุดคำสั่งแบบ SIMD (Single instruction, multiple data) บนหน่วยประมวลผลกลาง เช่น สถาปัตยกรรม ARM 11 นอกจากการลดเวลาการประมวลผลด้วยชุดคำสั่ง SIMD แล้ว การคำนวณตารางเทียบสีไว้ล่วงหน้าสำหรับกระบวนการชดเชยสีบนพื้นฐานของฟังก์ชัน LUT (Lookup Table) ยังช่วยลดเวลาการประมวลผลเป็นอย่างมาก ทำให้เวลารวมของการประมวลผลโดยรวมต่ำกว่าวิธีการคำนวณแบบทำซ้ำ (Iteration)

ในกระบวนการคัดแยกระดับความสุกสำหรับผลปาล์ม คำนวณทั้งหมดสำหรับเวกเตอร์ทำนายปริมาณน้ำมันถูกเก็บลงในไฟล์ตั้งค่า โดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งโปรแกรมแล้วแสดงดังรูปที่ 2.15(ก) ซึ่งมีหน้าจอโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.15(ข-ง)



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างโปรแกรมบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ (ก) ตัวอย่างการใช้งาน (ข) โปรแกรมชดเชยสี (ค) ผลลัพธ์การชดเชยสี (ง) ผลลัพธ์ของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมัน

ตารางที่ 2.4 ระยะเวลาการประมวลผลของโปรแกรมทำนาย OER ในผลปาล์ม

วิธีการคำนวณ	เวลาประมวลผล (มิลลิวินาที)		
	เตรียมภาพถ่าย	คำนวณปริมาณน้ำมัน	รวมเวลา
วนรอบ	35.80×10^3	164	35.96×10^3
SIMD + LUTs	215	158	373

ประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มจะทดสอบบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ Samsung Galaxy Note (ARM Cortex A9 Dual Core 1.4GHz, RAM 1 GB) ด้วยภาพถ่ายขนาด 2048x1536 พิกเซล ในรูปแบบ ARGB-8888 ความเร็วในการประมวลผลดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งพบว่า วิธีการ SIMD + LUTs สามารถลดเวลาประมวลผลได้ร้อยละ 98.94 เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณแบบวนลูปปกติ อย่างไรก็ตาม เวลาการประมวลผลที่นำเสนอตั้งกล่าวยังไม่รวมเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ อ่าน-เขียน ไฟล์ภาพ ซึ่งเวลารวมทั้งหมดอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมอื่นๆภายในระบบปฏิบัติการอีกมากมาย ผลรวมของเวลาประมวลผลในโปรแกรมที่นำเสนอ ใช้เวลาเพียง 379 มิลลิวินาทีซึ่งถือว่าเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับโปรแกรมประมวลผลด้วยเวลาจริง (Real time processing)

4. สรุปและวิจารณ์

จากผลงานวิจัยทั้งหมดพบว่า ในแง่วิชาการแล้ว งานที่นำเสนอมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง สามารถประยุกต์ใช้ทั้งขั้นตอนก่อนและการหลังเก็บเกี่ยว อย่างไรก็ตาม การศึกษาความเป็นไปได้ในมิติอื่น เช่น ด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านนโยบาย และการประยุกต์เทคนิคใช้กับการทำนายระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสำหรับระบบฟาร์มอัจฉริยะ (Smart farm) และการทำนายทั้งทะลายปาล์มสำหรับกรณีรับซื้อปาล์มจำนวนมากๆ เป็นโจทย์ที่ควรดำเนินการในขั้นถัดไป

5. หนังสืออ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, <http://www.oae.go.th>, สืบค้นเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2558
- [2] De Castro, M. L., & Garcia-Ayuso, L. E. (1998). Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. *Analytica chimica acta*, 369(1), 1-10.
- [3] Suwannarat, S., Khaorapapong, T., & Chongcheawchamnan, M. (2012). Prediction of oil content in fresh palm fruit based on an ultrasonic technique. *Kasetsart Journal Natural Sciences*, 46(2), 318–324.
- [4] Yee, L.K., Abbas, Z., Jusoh, M.A., Yeow, Y.K., & Meng, C.E. (2011). Determination of moisture content in oil palm fruits using a five-port reflectometer. *Sensors*, 11(4), 4073–4085.
- [5] Yeow, Y.K., Abbas, Z., & Khalid, K. (2010). Application of microwave moisture sensor for determination of oil palm fruit ripeness. *Measurement Science Review*, 10(1), 7–14.
- [6] Abbas, Z., Yeow, Y.K., Shaari, A.H., Khalid, K., Hassan, J., & Saion E. (2005). Complex permittivity and moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor. *IEEE Sensors Journal*, 5(6), 1281–1287.

- [7] Pamornnak, B., Limsirorattana, S., & Chongcheawchamnan, M. (2013). Oil extraction rate determination technique based on dielectric constant of palm fruit. *Applied Mechanics and Materials*, 498–501.
- [8] รณฤทธิ์ ฤทธิธ, สุรีย์พร ณรงค์วงศ์วัฒนา, ปวีณา เอี่ยมเอม, มณีรัตน์ วงศ์จันทร์ และ ภรวรรณ นิจจรัลกุล (2553) การประเมินปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด (NIR). *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 42:71-74.
- [9] รณฤทธิ์ ฤทธิธ, ดุสิต ชนเพทาย, สุรีย์พร ณรงค์วงศ์วัฒนา, พันธิภา สีดาว, เพ็ญพิไล เพ็ญธิสาร และ วิไลภรณ์ โหงั่วสกุล (2555) การสร้างเครื่อง Diode Array NIR Spectrometer สำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและความชื้นในผลปาล์ม. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 43:3:127-130.
- [10] Delgado-Vargas, F., Jiménez, A.R., & Paredes-López O. (2000). Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains — characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(3), 173–289.
- [11] Edem D.O. (2002). Palm oil: biochemical, physiological, nutritional, hematological and toxicological aspects: a review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 57(3), 319–341.
- [12] Tan, Y.A., Low, K.W., Lee, C.K., & Low, K.S. (2010). Imaging technique for quantification of oil palm fruit ripeness and oil content. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(8), 838–843.
- [13] Wrolstad, R.E., Durst, R.W., & Lee, J., (2005). Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science & Technology*, 16(9), 423–428.
- [14] Abdullah, M.Z., Guan, L.C., & Mohd Azemi B.M.N. (2001). Stepwise discriminant analysis for colour grading of oil palm using machine vision system. *Food and Bioproducts Processing*, 79(4), 223–231.
- [15] Pamornnak, B., Limsirorattana, S., & Chongcheawchamnan, M. (2015). Oil content determination scheme of postharvest oil palm for mobile devices. *Biosystems Engineering*, 134, 8-19.
- [16] Alfatni, M.S.M., Shariff, A.R.M., Shafri, H.Z.M., Saaed, O.M.B., & Eshanta O.M. (2008). Oil palm fruit bunch grading system using red, green and blue digital number. *Journal of Applied Sciences*, 8(8), 1444–1452.
- [17] Saeed, O. M. B., Sankaran, S., Shariff, A. R. M., Shafri, H. Z. M., Ehsani, R., Alfatni, M. S., & Hazir, M. H. M. (2012). Classification of oil palm fresh fruit bunches based on their maturity using portable four-band sensor system. *Computers and electronics in agriculture*, 82, 55-60.
- [18] Jaffar, A., Jaafar, R., Jamil, N., Low, C. Y., & Abdullah, B. (2009). Photogrammetric grading of oil palm fresh fruit bunches. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng*, 9, 18-24.

- [19] Jamil, N., Mohamed, A., & Abdullah, S. (2009, December). Automated grading of palm oil Fresh Fruit Bunches (FFB) using neuro-fuzzy technique. In *Soft Computing and Pattern Recognition, 2009. SOCPAR'09. International Conference of* (pp. 245-249). IEEE.
- [20] Makky, M., & Soni, P. (2013). Development of an automatic grading machine for oil palm fresh fruits bunches (FFBs) based on machine vision. *Computers and electronics in agriculture*, 93, 129-139.

โครงการวิจัยย่อย

การนึ่งผลปาล์มสำหรับโรงขนาดเล็ก

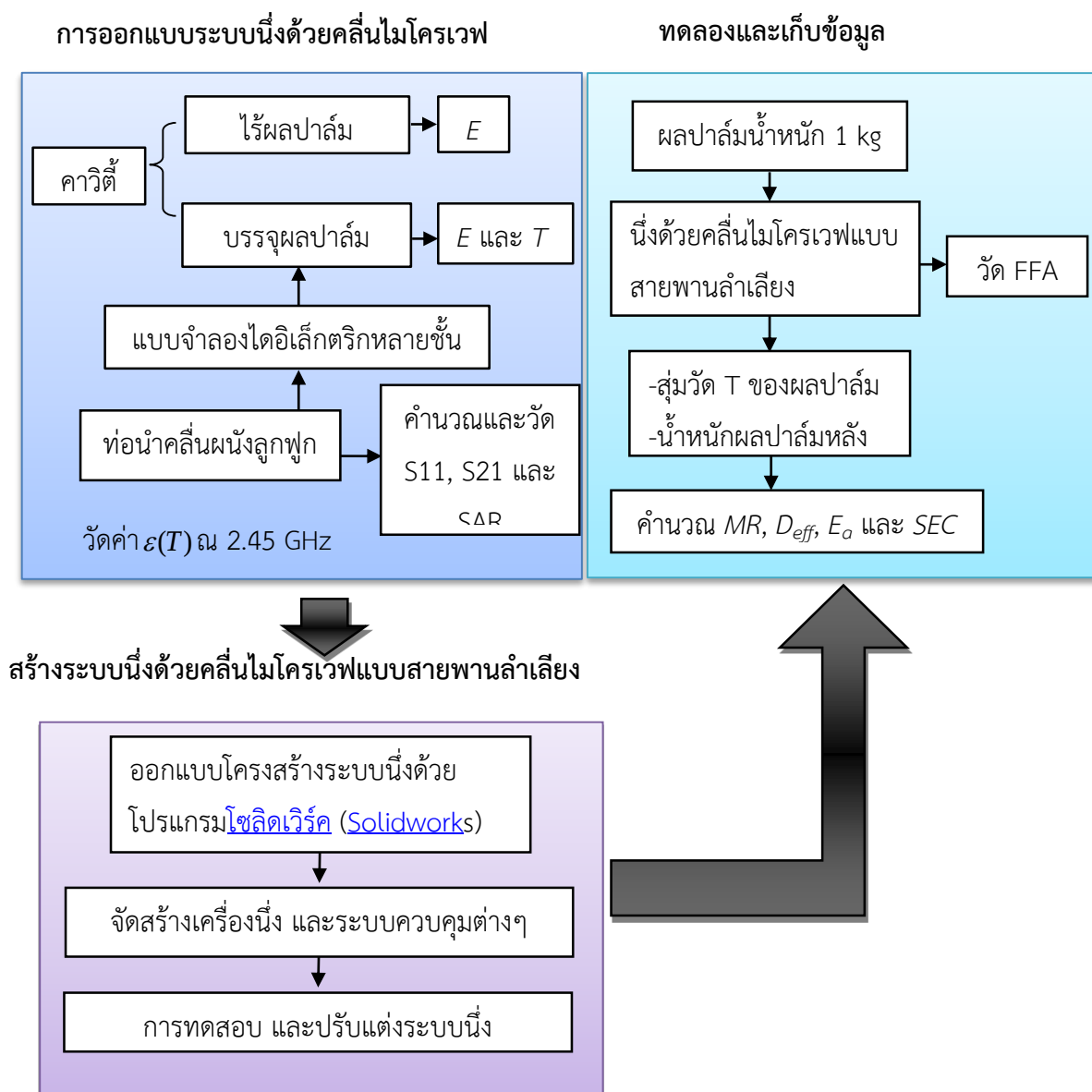
1. เกริ่นนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจหลักสามารถให้ปริมาณน้ำมันมากที่สุดเมื่อเทียบกับพืชเศรษฐกิจน้ำมันชนิดอื่น (ประยงค์ สุขเดชะพันธ์ 2551; Prasertsan และ Prasertsan 1996, 387-395) การผลิตไบโอดีเซลสำหรับทดแทนการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงโดยเฉพาะน้ำมันดีเซลจากต่างประเทศจะเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานภายในประเทศ ประเทศไทยมีการปลูกปาล์มน้ำมันมีจำนวนมากเป็นปัญหาทำให้โรงงานหีบสกัดน้ำมันปาล์มดิบรองรับผลผลิตปาล์มน้ำมันเหล่านี้ไม่เพียงพอ เกษตรกรต้องขายผลผลิตน้ำมันในราคาต่ำ เพื่อนำส่งโรงงานหีบสกัดน้ำมันปาล์มดิบในเขตพื้นที่ส่วนโรงงานหีบสกัดน้ำมันปาล์มขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่ไกล ซึ่งมีต้นทุนเพิ่มตามระยะทางการขนส่ง (กฤษฎ สมนึก และคณะ 2551)

ผลผลิตน้ำมันที่ได้จากการสกัดปาล์มน้ำมัน ปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทยมีขั้นตอนการให้ความร้อนปาล์มน้ำมัน 2 วิธีคือ การทอดปาล์มน้ำมันด้วยกระทะ และการอบแห้งปาล์มน้ำมันด้วยลมร้อนเพื่อไล่ความชื้นโดยใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง (ธีระ เอกสมทราเมษฐ์ 2546; ผาสุก กุลละวณิชย์ และคณะ 2528; พรชัย เหลืองอาภาพงศ์ 2523) กระบวนการให้ความร้อนดังกล่าวใช้วิธีธรรมชาติทั่วไป (Convictional method) ที่อาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนเป็นหลัก อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้อาจเผชิญปัญหาสำคัญคือ สิ้นเปลืองระยะเวลา ประสิทธิภาพ (ใช้พลังงานต่ำ) และได้ผลผลิตไม่มีคุณภาพ (แห้งไม่สม่ำเสมอ) (รัชดา โสภาคะยัง 2548; Drouzas และคณะ 1999, 117-122)

วิธีหนึ่งปาล์มน้ำมันด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) สามารถแก้ไขปัญหากในการผลิตได้ทดแทนระบบอบแห้งแบบการพาความร้อน หลักสำคัญคือ การตั้งสมมติฐานว่าผลปาล์มน้ำมันมีส่วนประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำ น้ำมัน เส้นใย และสารประกอบอื่นๆ โครงสร้างสารเหล่านี้สามารถอธิบายด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเปลี่ยนรูปพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปสู่พลังงานความร้อน ดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นภายในผลปาล์มจึงสามารถไล่ความชื้นได้อย่างรวดเร็ว (Mohd และคณะ 2009, 583-592; กฤษฎา พวงสุวรรณ และคณะ 2555) นอกจากนี้ ณ ระดับอุณหภูมิประมาณ 55 °C ขึ้นไปสามารถสลายเอนไซม์ไลเปส (Lipase enzyme) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเปลี่ยนน้ำมันเป็นกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid, FFA) (สาวิตรี และคณะ 2551) งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ที่คาดว่าจะสามารถตอบสนองต่อภาคการผลิตน้ำมันปาล์มระดับชุมชนได้

2. กรอบแนวคิดการวิจัย



รูปที่ 3.1 แนวคิดกระบวนการทำงานทั้งหมด

กรอบแนวคิดงานวิจัยในการสร้างระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์กลไกการถ่ายเทความร้อน และถ่ายโอนมวลสารภายในผลปาล์ม ขณะรับกำลังงานคลื่นไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในผังภาพรูปที่ 3.1 ได้สรุปกรอบแนวคิดของกระบวนการทั้งหมดออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

(1) การออกแบบระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การแผ่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการถ่ายเทความร้อนภายในผลปาล์ม สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้นที่พัฒนาขึ้น (กฤษฎา

พวงสุวรรณ และคณะ 2555, 68-75) แต่แบบจำลองดังกล่าวทำนายอุณหภูมิภายในผลปาล์มยังไม่ค่อยแม่นยำ เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริก (ϵ) ภายในแต่ละชั้นของผลปาล์มไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิในงานวิจัยชิ้นนี้จึงทดลองวัด ϵ แต่ละชั้นของผลปาล์มแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิเพื่อนำมาบรรจุภายในแบบจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้นของผลปาล์ม ในการวิเคราะห์ขนาดของคาร์บิ และตำแหน่งของหลอดแมกนีตรอนเพื่อให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่ให้เกิดการหักล้างกันภายในคาร์บิที่ออกแบบไว้ นำไปสู่การคำนวณหาอุณหภูมิภายในผลปาล์มขณะลำเลียงผ่านคาร์บิ เพื่อนำไปออกแบบการควบคุมความเร็วสายพานลำเลียงของระบบหนึ่งด้วยคลื่นไมโครเวฟให้ได้อุณหภูมิภายในผลปาล์มที่เหมาะสมที่สามารถยับยั้ง FFA ได้ อย่างไรก็ดี ระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงจะมีช่องเปิดสำหรับเป็นทางให้ผลปาล์มเคลื่อนเข้า-ออกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้น จะใช้ท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการป้องกันคลื่นรั่วเพื่อความปลอดภัย

(2) การนำผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาจัดสร้างระบบหนึ่งด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

(3) การทดลองหนึ่งผลปาล์มและทำการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ (T) อัตราส่วนความชื้น (MR) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) และลักษณะทางกายภาพของปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้ยังพิจารณา FFA ภายในผลปาล์ม

3. การทดลองและผลการทดลอง

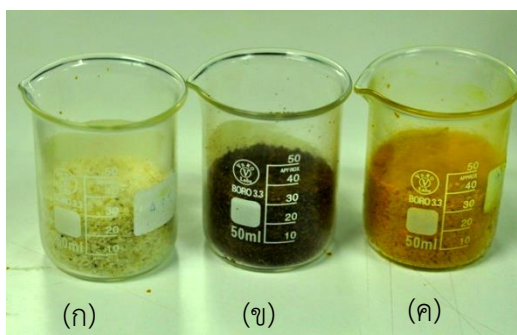
การออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงคือจะต้องประเมินอุณหภูมิภายในผลปาล์มให้ถูกต้องแม่นยำซึ่งหลักการสำคัญการอธิบายกลไกการเปลี่ยนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนคือการสร้างคือการด้วยแบบจำลองเพอร์มิตติวิตีหลายชั้นของผลปาล์มพันธุ์เทเนอรา (เมล็ดใน กะลา และเปลือกนอก) ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ ϵ กับความถี่และอุณหภูมิ โดยองค์ความรู้เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบระบบหนึ่งด้วยคลื่นไมโครเวฟให้มีประสิทธิภาพสูงแบบจำลองไดอิเล็กตริกที่นำเสนอจะอธิบายแต่ละชั้นผลปาล์มและเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (10-70 °C) และความถี่ (0.5-6 GHz) อย่างไรก็ดี งานวิจัยนี้จะนำความถี่ 2.45 GHz มาประยุกต์ใช้ใน ดังนั้น แบบจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้นของผลปาล์มจะสังเคราะห์ที่ความถี่นี้เป็นหลัก

3.1 การวัดค่าเพอร์มิตติวิตีแต่ละชั้นของผลปาล์ม

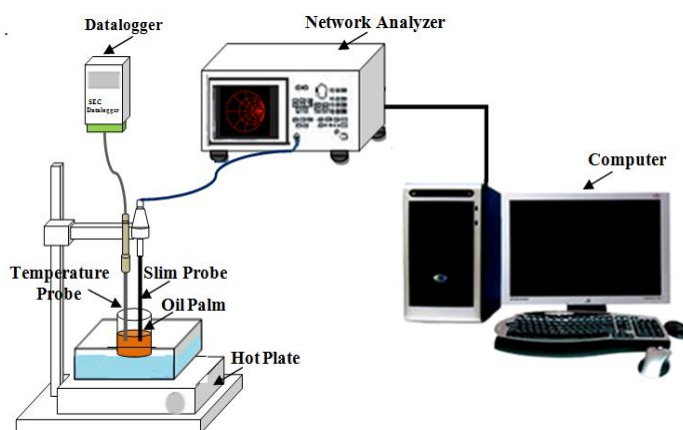
ตัวอย่างในการทดลองใช้ผลปาล์มพันธุ์เทเนอราอายุ 8 ปี ในบริเวณพื้นที่จังหวัดสงขลา ประเทศไทย ปาล์มน้ำมันพันธุ์นี้ให้ผลผลิตน้ำมันมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์อื่นๆ (Prasertsan และ Prasertsan 1996, 387-395) การทดลองภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงตั้งแต่ตัดผลปาล์มจากต้น ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของผลปาล์มคำนวณตามมาตรฐาน Association Of Analytical

Communities, AOAC (Horwitz และ Latimer Jr 1995) ใช้ตาชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.1 กรัม และบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลปาล์มทุกๆ นาที จำนวน 102 ผล มีความชื้นเริ่มต้นมาตรฐานเปียกในช่วงร้อยละ 27.81-33.13 ค่าความชื้นเฉลี่ย (Statistical mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เป็น 30.81 และ 2.27 ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างแต่ละชั้นของผลปาล์ม (เมล็ดใน กะลา และเปลือกนอก) จะสับแต่ละชั้นจนละเอียด ส่วนชั้นผิวเปลือกนอกมีลักษณะบางมากจึงไม่สนใจชั้นนี้ ใช้บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างลักษณะกึ่งของแข็งบรรจุลงปริมาณ 30 มิลลิลิตร และบีบอัดตัวอย่างให้แน่นเพื่อลดอากาศที่เกิดขึ้นภายในรูปพรุนของตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 3.2 การวัดค่า ϵ ทั้งสามชั้นของผลปาล์มที่มีความถี่ 0.5-6 GHz และอุณหภูมิ 10-70 °C การทดลองประยุกต์ใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งอุณหภูมิที่เลือกอยู่ในช่วงเหมาะสมที่สุดในการสลายเอนไซม์ไลเปสของผลปาล์มประมาณ 55 °C (สาวิตรี คำหอม และคณะ 2009)



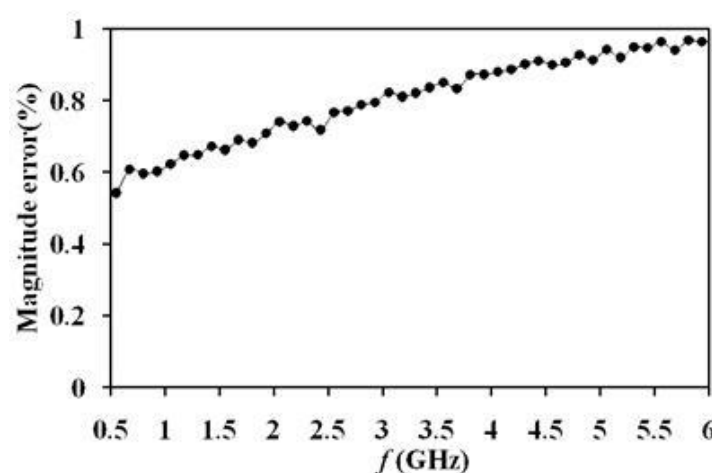
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแต่ละชั้นของผลปาล์ม (ก) เมล็ดใน (ข) กะลา และ (ค) เปลือกนอก



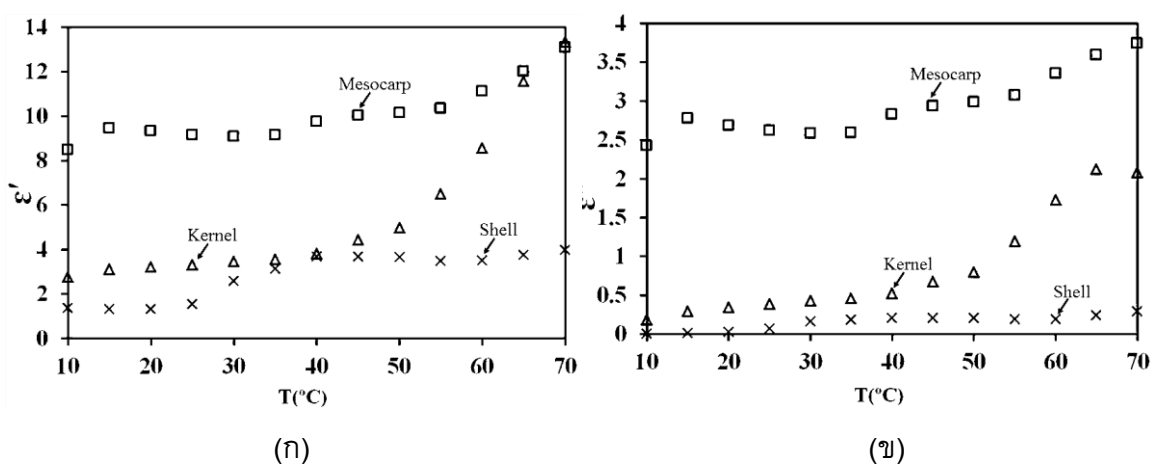
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการวัด ϵ แต่ละชั้นของผลปาล์ม

ในรูปที่ 3.3 แสดงการวัด ϵ แต่ละชั้นของผลปาล์มด้วยโพรบ (85070E Dielectric Probe Kit) เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ ผ่านสายเคเบิลแกนร่วมรุ่น HUBER+SUHNER® SUCOFLEX_102 ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการทำงาน 55-165 °C และสเปคเซ็นเซอร์โพรบการทำงานสามารถวัดความถี่ได้ 0.5-50 GHz และอุณหภูมิ 0-125 °C ก่อนการวัด

จะเปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติเพื่ออุ่นเครื่องอย่างน้อย 30 นาที หลังจากนั้นต้องสอบเทียบเซ็นเซอร์โพรมิตด้วยอุปกรณ์สอบเทียบมาตรฐานแบบลัดวง (Series 85070-60004 short for slim from) จากอากาศและน้ำกลั่นเพื่อยืนยันว่าเซ็นเซอร์โพรมิตให้ผลถูกต้องมีมาตรฐานตรงตามทฤษฎีตามคำแนะนำใน (Huber+Suhner Sucoflex 102 data sheet) ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิแบบ K จุ่มลงในตัวอย่างบริเวณกึ่งกลางของบีกเกอร์ห่างจากเซ็นเซอร์โพรมิตประมาณ 20 มิลลิเมตร การปรับอุณหภูมิของตัวอย่างนำบีกเกอร์ไปแช่ภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง 27 °C ซึ่งอุณหภูมิภายในตัวอย่าง 10-70 °C เพิ่มขึ้นทีละ 10 °C เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการจะใช้เพลทความร้อนและน้ำแข็ง ซึ่งค่า ε แต่ละชั้นของผลปาล์มถูกส่งมาเก็บผลยังคอมพิวเตอร์ผ่านสายสัญญาณ GPIB



รูปที่ 3.4 ความผิดพลาดจากการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีน้ำกลั่นเทียบกับทฤษฎีที่อุณหภูมิ 27 °C



รูปที่ 3.5 (ก) ε' และ (ข) ε'' ของแต่ละชั้นผลปาล์มที่ความถี่ 2.45 GHz ณ อุณหภูมิต่างๆ

การวัดสอบเทียบ ε ของอากาศและน้ำกลั่นเทียบกับผลเชิงทฤษฎีที่อุณหภูมิ 27 °C (Debye และคณะ 1929) พบว่า ε ของอากาศมีค่าคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีไม่เกินร้อยละ 1 ส่วนการ

วัดและข้อมูลเชิงทฤษฎีของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแมกนิจูด ε ของน้ำกลั่นที่ความถี่ 0.5-6 GHz มีค่าน้อยกว่า 0.97 % ดังรูปที่ 3.4 (Julrat และคณะ 2012, 3019–3030; Kaatze 1989, 371–374)

จากรูปที่ 3.5 ค่า ε' และ ε'' แต่ละชั้นของผลปาล์มที่ความถี่ 2.45 GHz ในช่วงอุณหภูมิ 10-70 °C มีลักษณะความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 3.5 (ก) ค่า ε' แต่ละชั้นของผลปาล์มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เพราะกระบวนการไดโพลาร์ (Dipolar process) ค่า ε' ของชั้นเปลือกนอกสูงกว่าอีกสองชั้น นั้นหมายถึงสามารถกักเก็บพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชั้นนี้ดีกว่าชั้นกะลา และชั้นเมล็ดใน เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการสลายเอนไซม์ไลเปสของชั้นเปลือกนอก ส่วนรูปที่ 3.5 (ข) ค่า ε'' ของชั้นเปลือกนอก และชั้นเมล็ดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ในขณะที่ชั้นกะลาค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ความชันของการเปลี่ยนแปลง ε'' ของชั้นเปลือกนอก และชั้นเมล็ดกับอุณหภูมิ $\left(\frac{d\varepsilon''}{dT}\right)$ มีค่าเป็นบวก จะนำไปสู่ปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal runaway) หรือสภาวะที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในวัสดุได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญยิ่งสำหรับการนั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยหลังจากวัสดุเริ่มดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าวัสดุดังกล่าวมี ε'' ความชันมีค่าเป็นบวกด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียหายได้ เช่น การเกิดรอยแตก และเกิดการไหม้ (Huangt 1976, 305-313) การหลีกเลี่ยงผลกระทบจากปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์สามารถควบคุมระดับพลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าอย่างเหมาะสม ค่า ε'' ของชั้นกะลามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากความสมดุลระหว่างการหมุนของไดโพล (Dipole rotation) และค่าการนำแบบไอออนิก (Ionic conduction)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ใช้คำนวณความสัมพันธ์ของแบบจำลองระหว่างค่า ε กับอุณหภูมิของตัวอย่างทั้งสามชั้น แบบจำลองนำค่าการวัด ε' และ ε'' ของตัวอย่างทั้งสามชั้นที่อุณหภูมิ 10-70 °C เพิ่มทีละ 5 °C ดังรูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติระหว่างแบบจำลองกับผลการวัดค่า ε ของตัวอย่างทั้งสามชั้นของผลปาล์มที่ความถี่ 2.45 GHz มีระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งสอดคล้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อทำนายอุณหภูมิภายในผลปาล์มในการนั่งเพื่อให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้

3.2 แบบจำลองควาวิตีทรงสี่เหลี่ยมแบบ 3 มิติ

ข้อจำกัดในเรื่องการออกแบบควาวิตีที่มีขนาดใหญ่จะต้องมีการติดตั้งแหล่งป้อนคลื่นจำนวนหลายตัว ปัญหาหลักคือ ติดตั้งแหล่งป้อนคลื่นแต่ละตัวไว้ตำแหน่งไหนและติดตั้งอย่างไร ในส่วนของควาวิตีมีลักษณะการเกิดคลื่นแบบมัลติโหมด (Multi-mode) ซึ่งมีความซับซ้อนต่อการวิเคราะห์อย่างมาก การออกแบบควาวิตีที่มีขนาดใหญ่ต้องอาศัยความเข้าใจและความรู้เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อผลปาล์มมีการลำเลียงผ่านบริเวณคลื่นแบบมัลติโหมดภายในควาวิตีสามารถออกแบบระบบนั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงที่มีประสิทธิภาพสูง จึงได้

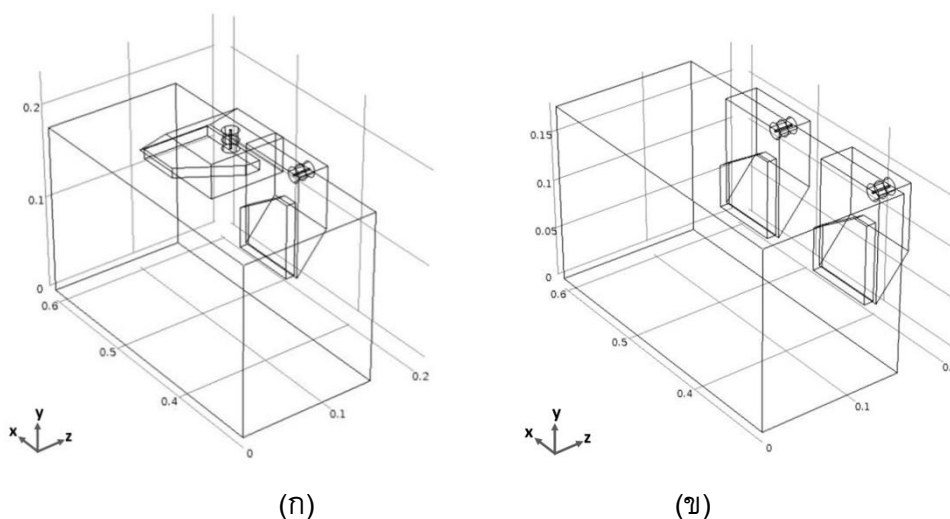
พัฒนาสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยลดปัญหาการครอสคัปปลิง (Cross coupling) ที่เกิดขึ้นจากแหล่งป้อนคลื่นหลายตำแหน่งได้เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ ต้องออกแบบให้เกิดการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสม่ำเสมอเพื่อให้อุณหภูมิภายในผลปาล์มมีความสม่ำเสมอทั้งผล

ในลำดับแรกพิจารณาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในควิตัสภาวะไร้ผลปาล์ม เพื่อหาตำแหน่งการป้อนคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม โดยวางเป้าหมายว่าผลการวิเคราะห์การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าภายในควิตัสว่างจะทำให้เข้าใจสิ่งที่เกิดขึ้นภายในควิตัสภาวะบรรจุผลปาล์มได้เช่นกัน นำไปสู่การคำนวณอุณหภูมิภายในผลปาล์มขณะลำเลียงผ่านควิตัส

3.2.1 แบบจำลองคลื่นไมโครเวฟภายในควิตัสทรงสี่เหลี่ยม

การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควิตัส โดยอาศัยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำเร็จ COMSOL™ Multiphysics ซึ่งคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ มาสนับสนุนในการคำนวณ การจำลองผลล่วงหน้าก่อนสร้างระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากร การจำลองแบ่งเป็น 2 กรณีคือ การป้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านบนและข้าง และการป้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านข้างของควิตัสแบบสมมาตรแกน x ดังรูปที่ 3.6 รายละเอียดของการจำลองระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงจะมีตำแหน่งป้อนคลื่นรูปแบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

(1) ขนาดควิตัสทรงสี่เหลี่ยมที่บรรจุผลปาล์ม กว้าง 147.2 มิลลิเมตร ยาว 610 มิลลิเมตร และสูง 180 มิลลิเมตร ได้คำนวณเชิงทฤษฎีสามารถอธิบายความถี่เรโซแนนซ์กับโหมดต่างๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นภายในควิตัสแสดงดังตารางที่ 3.1 ค่า f_{mnp} ที่โหมดต่างๆ พบว่าความถี่ที่มีค่าใกล้เคียง 2.45 GHz ในการจำลองควิตัสแบบสมมาตรแนวแกน x จะกำหนดให้หนึ่งควิตัสเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ส่งผลให้ผนังตัวนำนี้ไม่ดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งหมายถึงว่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟทั้งหมดจะถูกกักอยู่ภายในควิตัสนี้



รูปที่ 3.6 แบบจำลองทางกายของควิตัสแบบสมมาตรแนวแกน x (ก) การป้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านบนและด้านข้าง (ข) การป้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านข้าง

(2) กำหนดให้หลอดแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจะปล่อยพลังงานคลื่นรูปซายน์บริสุทธิ์ ณ ความถี่ 2.45 GHz มีจำนวนทั้งสิ้น 4 หลอด กำลังงานไมโครเวฟสูงสุดคือ 3.2 kW (800 W/1 แมกนีตรอน) ผ่านท่อนำคลื่นที่สนับสนุนเฉพาะโหมดคลื่น TE_{10} (Transversed Electric Field)

(3) ลักษณะทางกายภาพผลปาล์มพันธุ์เทนอรา ประยุกต์ใช้แบบจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้น (Puangsuwan และคณะ 2014, 1415-1423) ประกอบด้วยคุณสมบัติ ϵ แปรตามอุณหภูมิ และคุณสมบัติเชิงความร้อน ผลปาล์มมีการลำเลียงผ่านควิต้อย่างต่อเนื่อง จึงกำหนดให้รูปร่างผลปาล์มเป็นทรงกระบอก (เสมือนทรงกลมลำเลียงต่อเนื่องกัน)

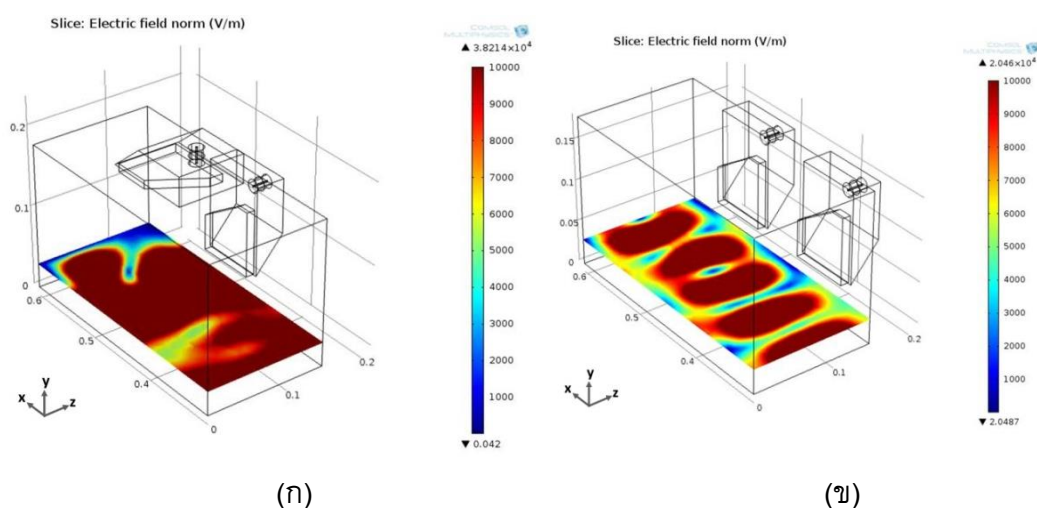
ตารางที่ 3.1 ความน่าจะเป็นของโหมดต่างๆ ที่อาจจะเกิดภายในควิตี้

m	n	p	f (GHz)	m	n	p	f (GHz)
2	3	0	2.54	7	2	0	2.40
3	1	2	2.39	8	2	0	2.57
5	0	2	2.44	9	0	1	2.45
6	0	2	2.57	9	1	1	2.59

3.2.2 ผลเฉลยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระบบหนึ่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(1) ผลเฉลยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในควิตี้ว่าง

พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของควิตี้ว่างและกำหนดตำแหน่งแหล่งป้อนคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมได้ ทั้งนี้คาดว่าผลวิเคราะห์การแผ่กระจายของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควิตี้ว่างจะแสดงสามารถเชื่อมโยงกรณีบรรจุผลปาล์มภายในควิตี้ได้

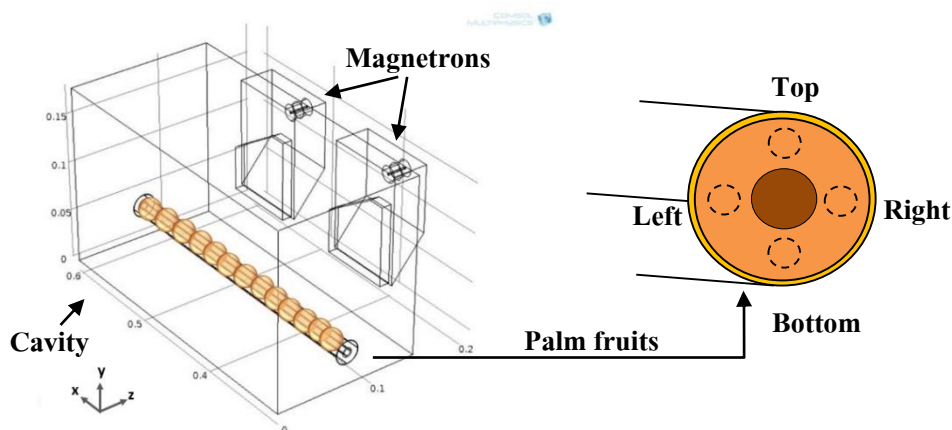


รูปที่ 3.7 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าภายในควิตี้ว่างแบบสมมาตรแนวแกน x (ก) การป้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านบนและด้านข้าง (ข) การป้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านข้าง

ในการพิจารณาคลื่นไมโครเวฟที่ตำแหน่งด้านบนและข้างของควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x จะเห็นว่าโหมดของคลื่นมีการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าภายในควิตีไม่ค่อยดีนัก ดังรูปที่ 3.7 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการพิจารณาคลื่นที่ตำแหน่งด้านข้างของควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x ดังรูปที่ 3.7 (ข) ดังนั้น จึงเลือกการพิจารณาคลื่นไมโครเวฟที่ตำแหน่งด้านข้างของควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x นำสู่การวิเคราะห์กระจายของอุณหภูมิภายในผลปาล์มต่อไป ซึ่งพบว่าความถี่เรโซแนนซ์เกิดโหมด TE_{901} ที่ความถี่ 2.45 GHz คือ $m=9$, $n=0$ และ $p=1$ เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าภายในควิตีแบบสมมาตรบนระนาบ zx มีคลื่น 4 ลูกครึ่งตามแนวแกน x และมีคลื่น 1 ลูกครึ่งตามแนวแกน z สอดคล้องตามการคำนวณเชิงทฤษฎีที่ออกแบบของควิตีไว้ อย่างไรก็ตาม สนามไฟฟ้าสูงสุดภายในควิตีว่างเท่ากับ 2.0378×10^4 V/m จะเห็นว่า ณ บริเวณทางลำเลียงผลปาล์มมีโหมดคลื่นของสนามไฟฟ้าภายในควิตีอย่างสม่ำเสมอ โดยปกติสนามไฟฟ้าภายในควิตีว่างสามารถจำลองและเข้าใจง่ายกว่ากรณีควิตีที่มีผลปาล์ม สามารถเป็นพื้นฐานที่ดีในการออกแบบควิตีสำหรับทำความร้อนผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงที่เหมาะสม

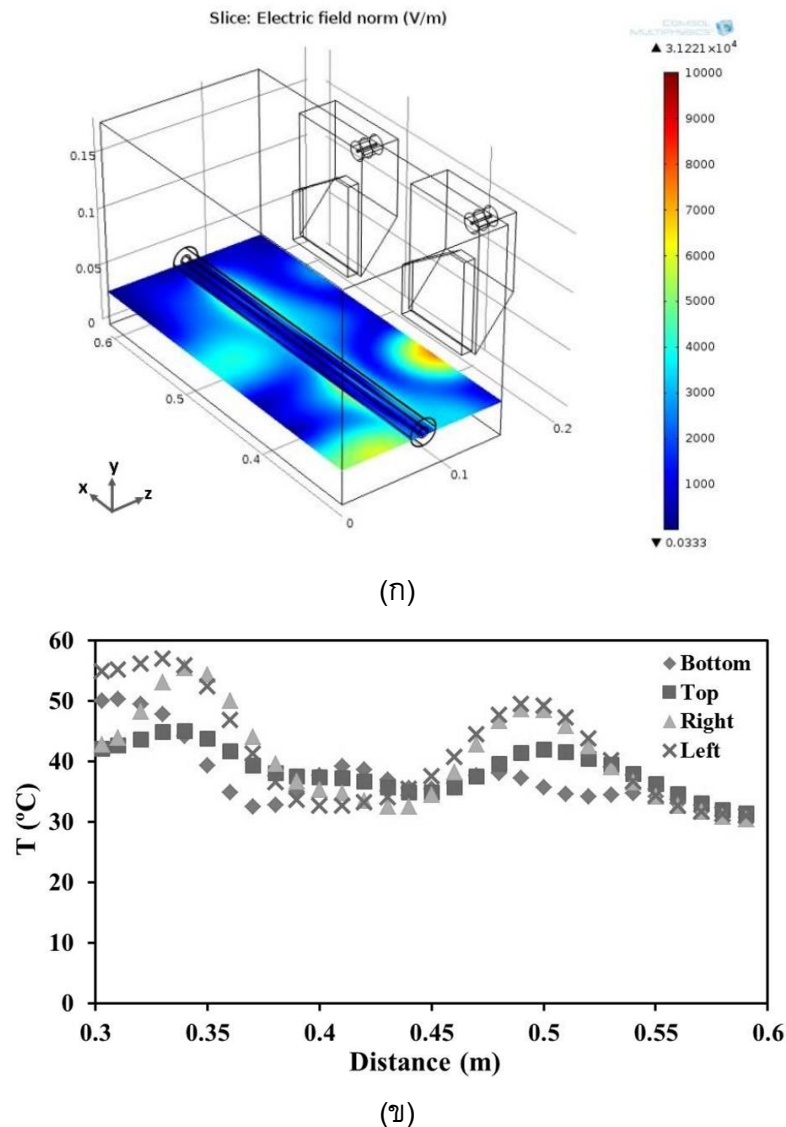
(2) ผลเฉลยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิกรณีควิตีบรรจุผลปาล์ม

แบบจำลองคลื่นไมโครเวฟภายในควิตีที่มีผลปาล์ม โดยสมมติว่าผลปาล์มอยู่ ณ กึ่งกลางในควิตี เพื่อศึกษาลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในผลปาล์ม ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองควิตีที่มีผลปาล์มรูปทรงกระบอก

รูปที่ 3.9 (ก) แสดงลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าภายในควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x เป็นจุดเย็นและจุดร้อน คือจะมีจุดที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงและต่ำอยู่ทั่วทั้งควิตี ในช่วง 1×10^4 V/m ถึง 4×10^4 V/m และความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง 3.1×10^4 V/m เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.7 (ข) พบว่าผลปาล์มมีอิทธิพลต่อลักษณะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกดูดซับโดยผลปาล์ม



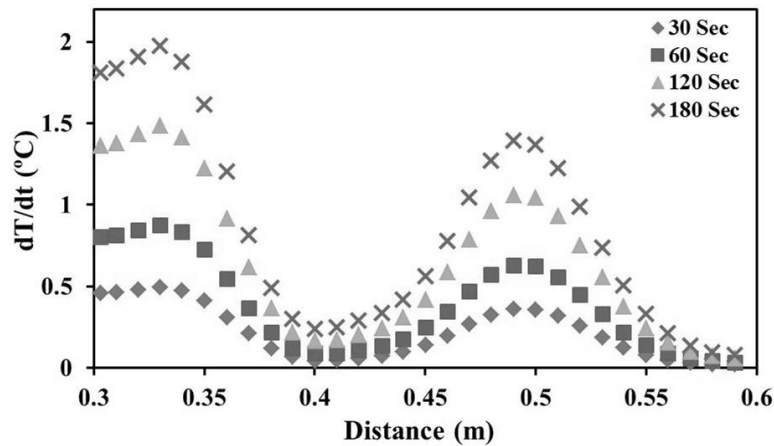
รูปที่ 3.9 ผลเฉลยการวิเคราะห์หาค่าสนามไฟฟ้าในควิตีที่มีผลปาล์มแบบสมมาตรแนวแกน x
(ก) การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้า (V/m) (ข) การกระจายของอุณหภูมิภายในผล
ปาล์ม (°C) ที่ระยะเวลา 60 วินาที

รูปที่ 3.8 แสดงผลเฉลยการกระจายอุณหภูมิของผลปาล์มทรงกระบอกทั้ง 4 ตำแหน่งคือ ด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวา ภายในควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x เมื่อให้ความร้อน 60 วินาที พบว่าอุณหภูมิภายในผลปาล์มสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการโมเลกุลที่มีชีวิตทางไฟฟ้าในผลปาล์มมีการสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วและเสียพลังงานระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นรูปพลังงานความร้อนเมื่อดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นการกระจายของอุณหภูมิต่ำสุด 33 °C และอุณหภูมิสูงสุด 58 °C จะเกิดขึ้นบริเวณด้านซ้ายภายในชั้นเปลือกนอกของผลปาล์มดังรูปที่ 3.9 (ข) เพื่อไปทำนายอุณหภูมิภายในผลปาล์มขณะลำเลียงผ่านควิตีทรงสี่เหลี่ยมในการออกแบบควบคุมความเร็วสายพานลำเลียงให้เหมาะสมและสามารถยับยั้งกรดไขมันอิสระได้

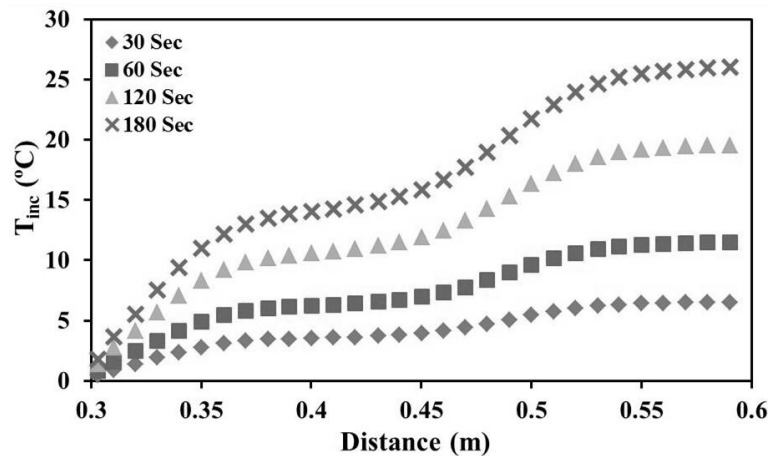
3.2.3 อุณหภูมิภายในผลปาล์มขณะลำเลียงผ่านควิตีทรวงสี่เหลี่ยม

การออกแบบระบบโดยมีการลำเลียงผลปาล์มจะช่วยร่นระยะเวลาในการเนื่องและทำให้ได้ผลผลิตจากระบบต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics เพื่อทำนายอุณหภูมิภายในผลปาล์มขณะลำเลียงผ่านควิตี ($T_{\text{continuous conveyor belt}}$) เป็นผลรวมระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature, T_i) และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Temperature increase, T_{inc}) ของผลปาล์ม สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_{\text{continuous conveyor belt}} = T_i + T_{\text{inc}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.10 $\left(\frac{dT}{dt}\right)$ ภายในผลปาล์มตามระยะควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x ที่ระยะเวลาต่างๆ



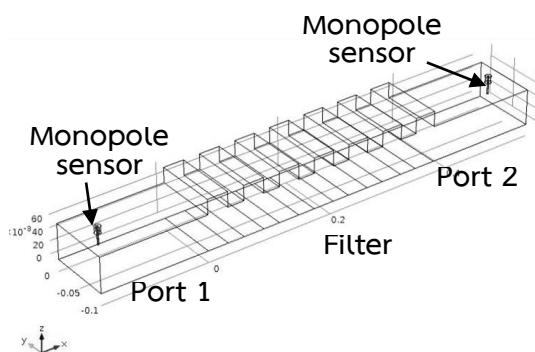
รูปที่ 3.11 T_{inc} ภายในผลปาล์มตามระยะควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x ที่ระยะเวลาต่างๆ

รูปที่ 3.10 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature rate, $\left(\frac{dT}{dt}\right)$) ของผลปาล์มภายในควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x ที่ระยะเวลาอบ 180 วินาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ระยะเวลาให้ความร้อน 180 วินาทีนี้จะสูงกว่ากรณีใช้เวลา 120, 60 และ 30 วินาที ตามลำดับ รูปที่ 3.11 แสดง T_{inc} ของผลปาล์มภายในควิตีแบบสมมาตรแนวแกน x เท่ากับ 7, 12, 20 และ 26 °C ที่

ระยะเวลาอบ 30, 60, 120 และ 180 วินาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม หากทำนาย $T_{\text{continuous conveyor belt}}$ ของผลปาล์มภายในคาวิตีตั้งสมการ (1) เท่ากับ 43, 53, 69 และ 82 °C ที่ระยะเวลาอบ 30, 60, 120 และ 180 วินาที ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาให้ความร้อน 180 วินาทีนานเกินกว่าอุณหภูมิเป้าหมายและอาจทำให้ผลปาล์มไหม้ได้ ขณะที่ระยะเวลาให้ความร้อน 30 และ 60 วินาที อุณหภูมิภายในผลปาล์มสูงไม่เพียงพอ ดังนั้น จึงเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 120 วินาที อุณหภูมิของผลปาล์มในกรณีนี้ 69 °C และสามารถยับยั้งกรดไขมันอิสระได้ นอกจากนี้ ระยะเวลาไม่สั้นเกินไปสามารถออกแบบระบบสายพานลำเลียงได้

3.3 การออกแบบท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผนังลูกฟูก

ในระบบหนึ่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ลักษณะการใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นแบบสายพานลำเลียงเพื่อลำเลียงผลปาล์มร่วนผ่านบริเวณการแผ่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมออย่างต่อเนื่องเพื่อต้องการปริมาณการผลิตจำนวนมาก ดังนั้นระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวจะมีช่องเปิดสำหรับลำเลียงผลปาล์มร่วนเคลื่อนเข้า-ออกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งทางเข้า-ออกนี้คลื่นไมโครเวฟอาจลอดผ่านออกมาได้หากไม่มีการจัดการที่ดี วิธีที่ใช้ป้องกันคลื่นรั่วสามารถทำได้โดยการออกแบบและติดตั้งท่อนำคลื่นผนังลูกฟูกเพื่อดูดซับหรือลดทอนกำลังคลื่นไมโครเวฟที่เหลือแผ่กระจายออกมาไม่ให้เกิดพิภพจากช่องทางเข้า-ออก (Pianroj และคณะ 2008, 226–229; VonKoaghnnett และคณะ 1973, 101–110)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.12 ท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผนังลูกฟูก (ก) แบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics และ (ข) อุปกรณ์จริง

3.3.1 แบบจำลองและสร้างท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผนังลูกฟูก

แบบจำลองท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผนังลูกฟูกด้วยโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics และนำมาสร้างจริงดังรูปที่ 3.12 กำหนดให้ขนาดท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมสูง 55.1 มิลลิเมตร และกว้าง 100 มิลลิเมตร ส่วนลูกฟูกสูง 23.6 มิลลิเมตร กว้าง 32 มิลลิเมตร ลูกฟูกห่างกัน 25.7 มิลลิเมตร ต้องการลดทอนกำลังงานให้ได้ 1 ล้านเท่าหรือ 60 dB ดังนั้นจำนวนลูกฟูกจึงมีขนาดเท่ากับ 7 ลูกต่อแบบเรียงกันซึ่งเป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของเทคนิคและต้นทุน

3.3.2 การทดลอง

ในการสร้างท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าลูกฟูกจะยืนยันผลของแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยการวัดค่า S_{21} สามารถลดทอนกำลังงานคลื่นไมโครเวฟได้จริงถึง 60 dB ตามที่ได้ออกแบบหรือไม่



รูปที่ 3.13 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดค่า S_{11} และ S_{21}

การจัดวางอุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 3.13 ทางด้านซ้ายและด้านขวาของท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าลูกฟูกต่ออยู่กับท่อนำคลื่นปลายปิดที่เชื่อมต่อกับสายอากาศแบบโมนโพลใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นและตัวรับคลื่น ตามลำดับ สายอากาศดังกล่าวเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายพอร์ต 1 (แหล่งกำเนิดคลื่น) และพอร์ต 2 (ตัวรับคลื่น) (Pianroj และคณะ 2008, 226–229; Soto และคณะ 2000, 2133–2140)

การออกแบบระบบนี้ส่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียง พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ว่าท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าลูกฟูกมีกำลังงานคลื่นไมโครเวฟรั่วไหลออกมาได้มากน้อยเท่าไร คือ ค่า $P_{out}(W)$ สามารถคำนวณตามสมการ (3.2) ในหน่วย dB

$$P_{out} = P_{in} + \alpha \quad (3.2)$$

เมื่อ P_{in} คือ การป้อนกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ในหน่วย dB

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อเยื่อ (Saito และคณะ 2006, 3443–3449)

เนื้อเยื่อ (Tissue)	σ (S/m)	ρ (kg/m ³)
ผิวหนัง (Skin)	2.16	1,125
ไขมัน (Fat)	0.13	916
กล้ามเนื้อ (Muscle)	1.60	1,047

พอร์ต 2 ของท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกผูกนำ $\vec{E}$ สูงสุดมาคำนวณหาอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate, SAR) เป็นขีดจำกัดการรับคลื่นไมโครเวฟที่สัมผัสร่างกายมนุษย์ มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) ดังสมการที่ (3.3) โดยหน่วยความปลอดภัยรวมมือกับองค์การอนามัยโลกได้มีข้อกำหนดสำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นไมโครเวฟจากการทำงานจะมีขีดจำกัดของค่า SAR ต้องไม่เกิน 10 W/kg สำหรับส่วนลำตัวและศีรษะขีดจำกัดค่า $\vec{E}$ ต้องไม่เกิน 137 V/m ที่ตำแหน่งคลื่นไมโครเวฟรั่วไหลที่ระยะห่างร่างกายมากกว่า 20 เซนติเมตรขึ้นไป ซึ่งค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนภายในเนื้อเยื่อมีค่าคงที่ (Saito และคณะ 2006, 3443–3449) ดังตารางที่ 3.2

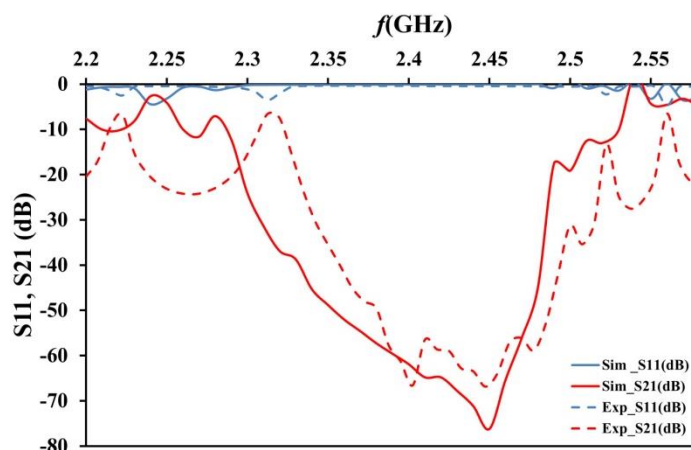
$$SAR = \frac{\sigma \vec{E}^2}{2\rho} \quad (3.3)$$

σ คือ สภาพการนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ (Electric conductivity of tissue, S/m)

ρ คือ ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อ (Density of tissue, kg/m³)

(1) ผล S-Parameter

การเปรียบเทียบค่า S_{11} และ S_{21} ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโครงสร้างท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกผูกมัลักษณะใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.14

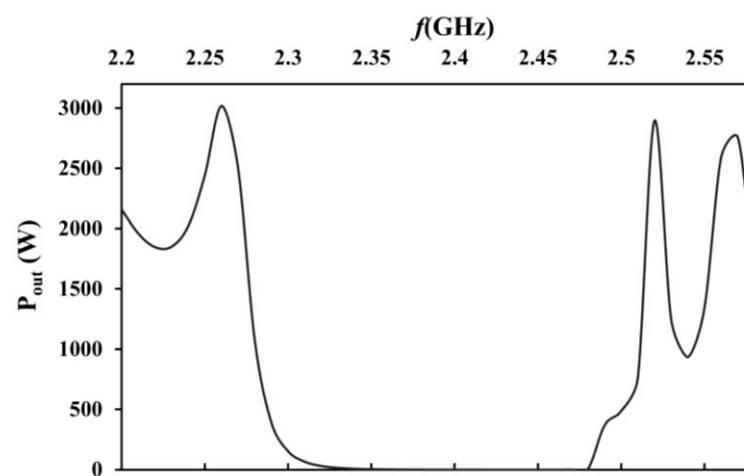


รูปที่ 3.14 ค่า S-Parameter (dB) ช่วงความถี่ 2.2 ถึง 2.6 GHz ที่กำลังงานอินพุต 3.2 kW

รูปที่ 3.14 แสดงค่า S_{11} และ S_{21} จะบ่งชี้ถึงการลดทอนของคลื่นไมโครเวฟ เมื่อเดินทางผ่านท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยขณะที่คลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่จากพอร์ตหนึ่งไปสู่อีกพอร์ตหนึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสองพอร์ตไม่เท่ากัน ทำให้คลื่นไมโครเวฟบางส่วนเดินทางผ่านท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขณะเดียวกันคลื่นไมโครเวฟอีกส่วนหนึ่งสะท้อนกลับออกมายังจุดเดิม ผลการวัดค่า S_{11} ของท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถสะท้อนคลื่นกลับได้มากที่สุด ณ ความถี่ประมาณ 2.27 ถึง 2.48 GHz และค่า S_{21} ที่ความถี่ประมาณ 2.43 ถึง 2.46 GHz ผลทดลองวัดจริงสอดคล้องตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ออกแบบไว้ ณ ความถี่กลาง 2.45 GHz ได้ประมาณ 68 dB หรือกว่า 8 ล้านเท่าซึ่งถือว่าได้ผลที่น่าพอใจ เนื่องจากค่าลดทอนเป้าหมายคือ 60 dB (Soto และคณะ 2000, 2133–2140; Pianroj และคณะ 2008, 226–229)

(2) P_{out} (w)

P_{out} (w) โดยมีการป้อน P_{in} เท่ากับ 3.2 kW (หลอดแมกนีตรอน 4 หลอด แต่ละหลอดมีกำลังงานไมโครเวฟ 800 W) ของท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 P_{out} (w) ที่การป้อน P_{in} เท่ากับ 3.2 kW

รูปที่ 3.15 แสดงค่า P_{out} (w) หลังผ่านท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ออกแบบไว้ที่ป้อน P_{in} เท่ากับ 3.2 kW จะสังเกตค่า P_{out} (w) ที่ช่วงความถี่ 2.33 ถึง 2.47 GHz โดยครอบคลุมช่วงความถี่กลาง 2.45 GHz ที่ได้ออกแบบไว้ พบว่าไม่มีการรั่วไหลของกำลังคลื่นไมโครเวฟออกมาภายนอก ผลคงเพียงพอและมั่นใจได้ว่าท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างขึ้นเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงในแง่ของความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง

(3) SAR

แบบจำลองท่อนำคลื่นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถวัด E สูงสุดจากพอร์ต 2 เท่ากับ 1.9442 V/m นำมาคำนวณค่า SAR ของเนื้อเยื่อในสมการที่ (3) และใช้ค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อเยื่อในตารางที่ 3.2 ในงานวิจัยชิ้นนี้คำนวณค่า SAR ของเนื้อเยื่อในย่านความถี่ 100 kHz ถึง 10 GHz ดังตารางที่ 3.3 พบว่าค่า SAR ไม่เกินขีดจำกัดมาตรฐานจึงมี

ความปลอดภัย สำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไปอ้างอิงตามมาตรฐานหน่วยงานความปลอดภัย ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ต้องมีค่าไม่เกินค่า (Ziegelber 2009, 257-258) ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ค่า SAR ของเนื้อเยื่อในงานวิจัยชิ้นนี้

เนื้อเยื่อ	SAR (mW/kg)
ผิวหนัง	3.63
ไขมัน	0.27
กล้ามเนื้อ	2.89

ตารางที่ 3.4 ค่า SAR สำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มทั่วไป

SAR (W/kg)		
	กลุ่มผู้ได้รับคลื่นจากการทำงาน	กลุ่มผู้ได้รับคลื่นทั่วไป
ทั่วร่างกาย	0.4	0.08
ส่วนศีรษะและลำตัว	10	2
เฉพาะส่วนแขนขา	20	4

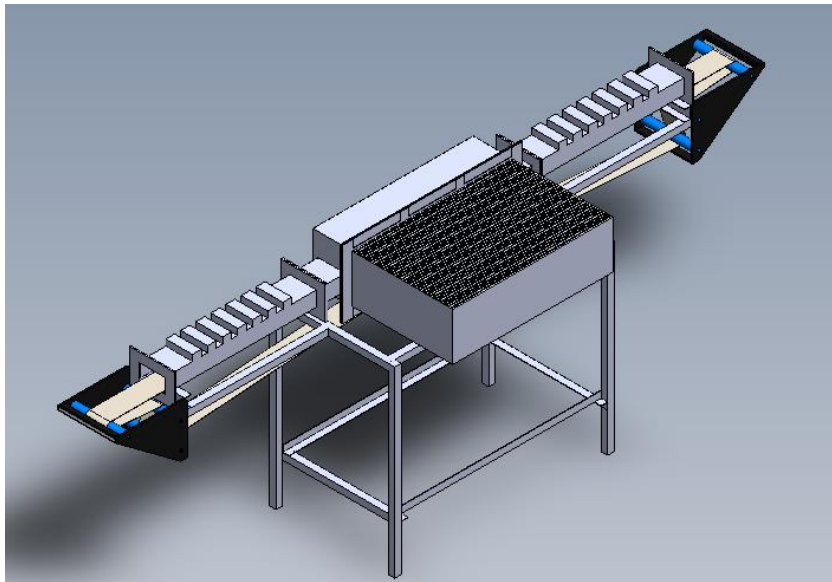
3.4 ระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียง

ในการพัฒนาระบบหนึ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียง ภายใต้ความถี่ 2.45 GHz หลอดแมกนีตรอนจำนวน 4 หลอด กำลังงานไมโครเวฟสูงสุด 4x800 W ถือว่าเป็นระบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบไมโครเวฟปกติทั่วไป กล่าวคือ ได้รับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วทั้งผลปาล์มและระยะเวลารับคลื่นมากหรือน้อยได้ตามความต้องการเพียงควบคุมความเร็วของระบบสายพานลำเลียง ส่วนความชื้นไม่มีสะสมอยู่ในควาวิตีเนื่องจากมีระบบระบายความร้อนดังรูปที่ 3.16 อย่างไรก็ดี เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานนี้จึงวัดการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟตามมาตรฐานไม่เกิน 5 mW/cm² มีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบระบบหนึ่งต้นแบบดังนี้

3.4.1 ควาวิตีทรงสี่เหลี่ยม

การสร้างควาวิตีทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดกว้างเท่ากับ 147.2 มิลลิเมตร ยาว 610 มิลลิเมตร และสูง 180 มิลลิเมตร จะมีทางเข้า-ออกของการลำเลียงผลปาล์มสองด้านมีขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร และสูง 55.1 มิลลิเมตร เชื่อมต่อระบบท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อลดทอนกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ในการการเลือกวัสดุสำหรับสร้างควาวิตีทรงสี่เหลี่ยมที่ได้ออกแบบไว้ขึ้นอยู่กับ

ประสิทธิภาพในการใช้งานต่างๆ เช่น ความสะอาด และความคงทน วัสดุที่เหมาะสมนำมาสร้างควาวิดีเป็นอย่างมากคือ สแตนเลสจะไร้ความเป็นแม่เหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและผิวเนื้อไม่มีปัญหาในเรื่องของการกัดกร่อนหรือเป็นสนิม โดยมีการติดตั้งหลอดแมกนีตรอนในตำแหน่งที่ได้ ออกแบบด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 3.2 การจัดวางแต่ละหลอดแมกนีตรอนไม่ให้เกิดการหักล้างกันระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขณะทำงานพร้อมกัน รวมถึงการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สม่ำเสมอภายในควาวิดี



รูปที่ 3.16 ต้นแบบระบบนิ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียง

3.4.2 สายพานลำเลียง

ทางลำเลียงเข้า-ออกของผลปาล์มขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน การเจาะผนังของควาวิดีทรงสี่เหลี่ยมเพื่อวางตำแหน่งทางลำเลียงของควาวิดีที่ออกแบบ โดยพิจารณาจากลักษณะของสนามไฟฟ้าภายในควาวิดีที่บริเวณตำแหน่งของผลปาล์มลำเลียงผ่านว่ามีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จากโครงสร้างควาวิดีได้เลือกทางลำเลียงสูงจากผนังด้านล่าง 4.5 เซนติเมตร และใช้แผ่นอะคริลิกเป็นวัสดุในการสร้าง เนื่องจากราคาไม่แพง แข็งแรงและคงทน

3.4.3 ระบบจ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

ต้นแบบระบบนิ่งผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงประยุกต์ใช้หลอดแมกนีตรอนเตาอบในครัวเรือนรุ่น 2M213 ของบริษัท LG จำนวน 4 หลอด แต่ละหลอดมีกำลังงาน 800 W ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยมีการป้องกันการแผ่กระจายคลื่นไบอัสที่ขั้วไบอัสจะใช้วงจร LC ทำหน้าที่กรองแรงดันชั่วครู่จากแหล่งจ่ายกำลังงานที่จะเข้าไปรบกวนการทำงานของหลอดแมกนีตรอน อย่างไรก็ตาม การทำงานของหลอดแมกนีตรอนจะเกิดความร้อนขึ้นบริเวณโดยรอบ จึงใช้พัดลมดูดผ่านของหลอดแมกนีตรอนในการระบายความร้อนออก เพื่อไม่ให้หลอดแมกนีตรอนเกิดความเสียหายเมื่อทำงานต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

3.4.5 ชุดขับเคลื่อนและสายพานลำเลียง

ในชุดขับเคลื่อนนั้นใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนสายพานที่สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้และในการเลือกใช้มอเตอร์นั้นควรเลือกใช้ที่มีแรงบิดค่อนข้างมาก เพื่อประสิทธิภาพในการชักพาผลปาล์ม นอกจากนี้ด้านตัวตามมีระบบตัวปรับความตึงของสายพานลำเลียง ในระบบนี้ด้วยคลื่นไมโครเวฟต้นแบบใช้สายพานลำเลียงที่เป็นเทฟลอน (Teflon) ยี่ห้อ AVTIKEL 7148 มีความหนา 0.35 มิลลิเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร ถูกม้วนที่ปลายทั้งสองด้านด้วยลูกกลิ้งอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร จำนวนทั้งหมด 6 ลูก ความยาวสายพานทั้งหมดประมาณ 5200 มิลลิเมตร ในการเชื่อมต่อสายพานลำเลียงจะเย็บด้วยเส้นด้ายสามารถรับแรงดึงได้ สาเหตุที่ใช้สายพานลำเลียงเป็นเทฟลอนคือไม่เป็นโลหะ เนื่องจากการเคลื่อนโลหะผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มสูงจะเกิดประกายไฟจากการอาร์คขึ้นอาจเป็นอันตรายได้

4. สรุปและวิจารณ์

ระบบนี้ผลปาล์มได้ถูกออกแบบด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของผลปาล์มขณะลำเลียงผ่านควาวิตีที่ออกแบบไว้ 2 กรณีคือ บ้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านบนและข้าง และบ้อนคลื่นสี่ตำแหน่งด้านข้างแบบสมมาตรแกน x โดยวัด ε แต่ละชั้นของผลปาล์มที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิเพื่อบรรจุแบบจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้น จากผลพบว่าสมการ ε แต่ละชั้นของผลปาล์มสามารถทำนายอุณหภูมิของผลปาล์มในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีความแม่นยำสูง และนำมาใช้ระบบนี้ไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงควรบ้อนคลื่นไมโครเวฟสี่ตำแหน่งด้านข้างแบบสมมาตรแกน x ซึ่งบริเวณพื้นที่ลำเลียงผลปาล์มมีสนามไฟฟ้าภายในควาวิตีสมาเสมอเมื่อผลปาล์มดูดซับพลังงานไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามช่องเปิดสำหรับเป็นทางลำเลียงให้ผลปาล์มเคลื่อนเข้า-ออกของระบบนี้ ได้ออกแบบและติดตั้งท่อนำคลื่นผนังลูกฟูกเพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ ผลพบว่าที่กระจายของคลื่นไมโครเวฟออกมาไม่ให้เกิดฟลักซ์ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังได้นำผลการวิเคราะห์มาออกแบบระบบนี้ด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียง โดยคาดว่าจะสามารถทดลองและเก็บค่าพารามิเตอร์คือ T , MR , D_{eff} , E_a , SEC และลักษณะทางกายภาพของปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้ยังพิจารณา FFA ของผลปาล์ม

5. หนังสืออ้างอิง

- [1] กฤษฎา พวงสุวรรณ มิตรชัย จงเชียวชานาญ และชาคริต ทองอุไร. 2555. แบบจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้นของผลปาล์มสำหรับการนึ่งด้วยวิธีคลื่นไมโครเวฟ. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50(4): 68-75.
- [2] กฤษฎา พวงสุวรรณ มิตรชัย จงเชียวชานาญ และชาคริต ทองอุไร. 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ของวิธีการนึ่งผลปาล์มน้ำมันด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [3] กฤษ สมนึก ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และวชร กาลาสี. 2551. พัฒนาการอบปาล์มน้ำมันด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. น.382-387.
- [4] ชีระ เอกสมทราเมษฐ์ และคณะ. 2546. คู่มือปาล์มน้ำมันและการจัดการสวน. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา.
- [5] ประยงค์ สุขเตชะพันธ์. 2551. ปาล์มน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: เกษตรสยามบุ๊คส์.
- [6] ผาสุก กุลละวณิชย์ และคณะ. 2528. ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม: คู่มือเกษตรกรรมเพื่อพัฒนามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [7] พรชัย เหลืองอาภาพงศ์. 2523. ปาล์มน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [8] รัชดา โสภาคะยัง. 2548. การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนยาง. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย.ชลบุรี
- [9] สาวิตรี คำหอม วรชัย อาจหาญ และชาญชัย ทองโสภา. 2551. การศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟแบบสายพานในกระบวนการนึ่งปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [10] "85070E dielectric probe kit, 200 MHz to 50 GHz-Technical overview", Agilent Technology, Datasheet 5989-0222EN, 2012.
- [11] Debye, P. J. W. 1929. Polar Molecules 172, New York.
- [12] Drouzas, A.E., Tsami, E. and Saravacos, G.D. 1999. Microwave/vacuum drying of model fruit gels. *Journal of Food Engineering* 39, no. 2 (Feb): 117-122.
- [13] Horwitz , W. and Latimer Jr, G. W. 1995. Official methods of analysis of AOAC International. *Association of Analytical Communities*, Washington, USA.
- [14] Huber+Suhner Sucoflex 102 data sheet [online] [cited 2007 July 20]. Available: DOC-0000177900
- [15] Julrat, S., Chongcheawchamnan, M., Khaorapapong, T., Patarapiboolchai, O., Kririksh, M. and Robertson, I. D. 2012. Single-frequency-based dry rubber content determination

- technique for in-field measurement application. *IEEE Sensors Journal* 12, no. 10: 3019–3030.
- [16] Kaatze, U. 1989. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature. *Journal of Chemical and Engineering Data* 34, no. 4: 371–374.
- [17] Ziegelber, G. 2009. ICNIRP statement on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 97, no. 3: 257–258.
- [18] Pianroj, Y., Jindarat, W. and Rattanadecho, P. 2008. A design of doubly corrugated filter for the continuous belt microwave drying system. in *Proceedings of the 22nd conference of mechanical engineering network of thailand*, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand, 226–229.
- [19] Prasertsan S. and Prasertsan P. 1996. Biomass residues from palm oil mills in Thailand: An overview on quantity and potential usage. *Biomass and Bioenergy* 11, no. 5: 387–395.
- [20] Saito, K., Hiroe, A. and Kikuchi, S. 2006. Estimation of heating performances of a coaxial slot antenna with endoscope for treatment of bile duct carcinoma. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 54, no. 8: 3443–3449.
- [21] Soto, P., Boria, V.E., Catalá-Civera, J. M., Chouaib, N., Guglielmi, M. and Gimeno, B. 2000. Analysis, design, and experimental verification of microwave filters for safety issues in open-ended waveguide systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 48, no. 11: 2133–2140.
- [22] VonKoaghnnett, A. L. and Dynnî, J. G. 1973 “Doubly corrugated chokes for microwave heating systems. *Journal of Microwave Power* 8, no. 1: 101–110.

ผลผลิตสำคัญของโครงการ

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ จำนวน 5 บทความในฐานข้อมูล ISI ได้แก่

- 1.1 S. Julrat, M. Chongcheawchamnan and I. D. Robertson, "Characterisation of the dielectric properties of rubber latex from 0.5 to 33 GHz", *Biosystems Engineering*, vol.125, pp. 1-8, 2014
- 1.2 K. Puangsuwan, B. Pamornak, C. Tongurai, and M. Chongcheawchamnan, "Complex permittivity of fully ripe palm fruit and its application for microwave heating." *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation.*, vol.21, no.3, pp.1415–1423, 2014.
- 1.3 B. Pamornnak, S. Limsiroratana and M. Chongcheawchamnan, "Oil content determination scheme of postharvest oil palm for mobile devices", *Biosystems Engineering*, 134, 8-19, 2015
- 1.4 S. Julrat, M. Chongcheawchamnan and I. D. Robertson, "Differential six-port reflectometer for determining dry rubber content of latex", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, pp.1-5, 2015
- 1.5 K. Puangsuwan, M. Chongcheawchamnan, and C. Tongurai, "Effective Moisture Diffusivity, Activation Energy and Dielectric Model for Palm Fruit Using a Microwave Heating." *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy.*, vol.49, no.2, pp.100–111, 2015.

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.1 เชิงสาธารณะ

มีเครือข่ายความร่วมมือกับห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีจี เอ็นจิเนียริง จำกัด และศูนย์วิจัยยางสงขลา

มีเครือข่ายความร่วมมือกับบริษัท ทำางงปาล์มน้ำมัน และ อุทยานวิทยาศาสตร์ ภาคใต้

2.2 เชิงวิชาการ

สร้างนักวิจัยที่สนใจในด้านเกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องวัดสำหรับน้ำยางและยางก้อนถ้วยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพิ่มเติม 2 ท่าน ได้แก่ ดร. ไพโรจน์ วุ่นชุม และ ดร. เกียรติศักดิ์ วัชรโสภนากุล

3. อื่น ๆ

3.1 การนำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 3 บทความ ได้แก่

- 3.1.1 K. Puangsuwan, C. Tongurai, and M. Chongcheawchamnan, "Complex permittivity of fully ripe palm fruit from 1–30 MHz." In: *TENCON 2013-2013 IEEE Region 10 Conference (31194)*. pp.1–4, IEEE 2013.

3.1.2 K. Puangsuwan, C. Tongurai, and M. Chongcheawchamnan, "Design of Microwave Heating Continuous Belt System for Palm Fruit." To be presented in: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference*. China, APMC 2015.

3.13 Somwong, S., Wunchum, P., Chongcheawchamnan, M. " Effects of contaminations in rubber latex on relative permittivity at 0.5–2.0 GHz ", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2015 12th International Conference on, Hua Hin, Cha-am, Thailand, 24-27 June 2015, pp.1-4

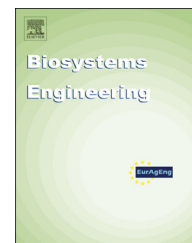
3.2 สิทธิบัตรในประเทศ จำนวน 1 สิทธิบัตร ได้แก่

B. Pamornnak, M. Chongcheawchamnan, S. Limsiroratana and S. Julrat, "An oil palm determination equipment", number 1401101813, 2014.

ภาคผนวก

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/issn/15375110

Research Paper

Characterisation of the dielectric properties of rubber latex from 0.5 to 33 GHz



Sakol Julrat ^a, Mitchai Chongcheawchamnan ^{a,*}, Ian D. Robertson ^b

^a Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai 90112, Songkhla, Thailand

^b Institute of Microwaves and Photonics, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 December 2013

Received in revised form

7 April 2014

Accepted 18 June 2014

Published online 5 July 2014

Keywords:

Dielectric measurements

Dielectric materials

Rubber industry

Relaxation time

This paper presents a detailed characterisation of the dielectric properties of rubber latex over the entire microwave frequency range (0.5–33 GHz), for samples with a range of dry rubber contents and over the temperature range 10–40 °C. The relaxation processes observed are analysed and compared to pure water, as modelled with the Debye equation. It is shown that two relaxation processes exist in rubber latex, with one of these attributed to the presence of bound water molecules. The extended Debye equation is then applied to model the dielectric permittivity. Each relaxation time extracted from the modelling exposes a different physical mechanism in rubber latex. It is believed that this is the most extensive study of the microwave properties of rubber latex yet reported, and that the results are an important step in the development of microwave sensors for determining the quality of rubber latex for agriculture and industrial application.

© 2014 IAGrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

It is well known that real part (ϵ') and imaginary part (ϵ'') of permittivity at microwave frequencies is related to the physical properties (for instance constituents, volume fraction, relaxation time, relaxation frequency, etc.) of a heterogeneous material (Debye, 1929). A substantial body of research has been published on the application of microwave complex permittivity measurements in determining the properties of various agricultural products (Guo, Wu, Zhu, & Wang, 2011; Julrat et al., 2012; Khalid, 1991; Nelson, 1992, 2005; Nelson & Trabelsi, 2008; Ragni, Gradari, Berardinelli, Giunchi, & Guarnieri, 2006; Sacilik, Tarimci, & Colak, 2006; Sosa-Morales et al., 2009; Trabelsi, Krazsewski, & Nelson, 1998; Trabelsi & Nelson, 2006; Trabelsi, Nelson, & Lewis, 2009). Water, a major

component, is sensitive to the applied microwave energy and so the measured complex permittivity is influenced by the water content. It is well known that bulk water molecules are dipolar and can polarise readily with the applied electromagnetic field at microwave frequencies. The bulk water molecules, formed in a tetrahedron shape (Eisenberg & Kauzmann, 1969; Kaatz, 2005; Sharp, 2001) are linked by the hydrogen bond. The behaviour of water molecules when solids are present is different to that in bulk water. In agricultural products, some water molecules are bound and the overall polarisation characteristic when an external electric field is applied will be influenced by these bound molecules. As the characteristic of bound water is generally different from bulk water (Nandi & Bagchi, 1997), the behaviour of bound water in agricultural products depends on its

* Corresponding author.

E-mail address: mitchai@fivedots.coe.psu.ac.th (M. Chongcheawchamnan).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.013>

1537-5110/© 2014 IAGrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

constituents, volume fraction and environment. No single definition can completely describe the characteristics of bound water. However, the bound characteristic can be described by studying the relaxation time, which is related to the bond strength and is determined by measuring the permittivity as a function of frequency.

Measurement of the dielectric properties of rubber latex can be applied to determine the dry rubber content (DRC), which is a quality indicator for latex in industrial centrifugal processing of rubber. Methods for measuring DRC have been briefly reviewed by Julrat et al. (2012). The latex obtained from rubber trees is a complex biological colloidal liquid consisting of a large water content (50–80%) with typically 25–45% hydrocarbon rubber (dry rubber) and 2–5% non-rubber constituents (Khalid, Hassan, & Yusof, 1997). The non-rubber components are, for example, proteins, lipids, carbohydrates, inorganic ions and salts. The proportion of these natural contents depends on the variety, season and environment. The DRC in rubber latex reflects the fraction of dry rubber. Since the non-rubber content is quite small in rubber latex, the DRC can be related to the water content in rubber latex. Understanding the characteristics of bound water in rubber latex is necessary in order to develop a model that enables DRC to be extracted from the microwave measurements, thereby assessing the rubber latex quality.

The characteristics of bound water in rubber latex were first investigated over the frequency range 10^{-2} – 10^6 Hz (Hassan, 1999) by measuring the complex permittivity of rubber latex samples that have different water contents at -30 °C and comparing it to ice. The complex permittivity of bound water was found to lie between that of bulk water and ice, while the relaxation peak depends on the water content in rubber latex. However, there is little knowledge of how bound water affects the complex permittivity of rubber latex at microwave frequencies, where the two key parameters are volume fractions (DRC, water content and non-rubber content) and the ambient temperature.

In this paper, the complex permittivity of rubber latex is extensively characterised, for the first time, over the full microwave frequency range. The relaxation characteristics of rubber latex with different ambient temperatures and volume fractions are analysed. Knowing the microwave properties of rubber latex is an important step in the development of microwave sensors for determining the quality of rubber latex for agriculture and industrial application. Section 2 describes the experimental setup and conditions for the measurements. In Section 3, the complex permittivity of several rubber latex samples with different DRC percentages is presented, for different conditions, and the Cole–Cole plots as a function of temperature and DRC are obtained. In Section 4, the relaxation processes and activation energy of rubber latex are analysed using a graphical method. In Section 5, the extended Debye equations are applied to model the rubber latex permittivity behaviour.

2. Experimental setup

As shown in Fig. 1, the complex permittivity of the rubber latex was determined using the Agilent 85070E dielectric

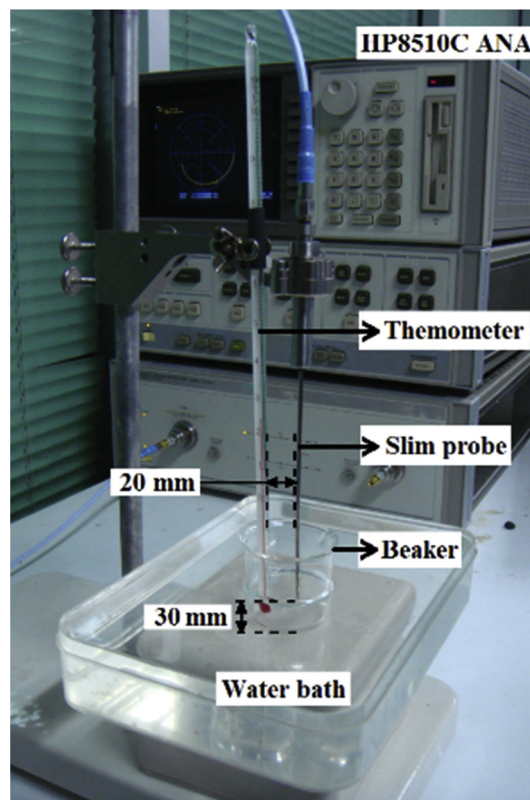


Fig. 1 – Experimental setup.

probe kit (Agilent Technologies, 2008) with a slim probe form, which is specially designed for liquid measurement applications. The reflection coefficient of the probe immersed in rubber latex was measured and the data transferred via GPIB (General Purpose Interface Bus) to a computer, where the dedicated Agilent dielectric measurement software extracted the complex permittivity. To obtain accurate and reliable measurement results, the dielectric probe kit needs to be calibrated. This was done by using a standard short circuit (series 85070-60004 short for the slim form probe), air, and then reference water, from 0.5 to 33 GHz. The temperature of the water during calibration was recorded and subsequently used by the calibration software.

Each sample was prepared as 40 ml of liquid (30 mm high from the beaker bottom) in a 50 ml beaker with 60 mm height. The slim probe was placed at the centre of the beaker, 20 mm from the beaker bottom. The temperature of the rubber latex sample was measured by a thermometer that was dipped in the sample and positioned close to the probe. The temperature of the sample was controlled by immersing the beaker in a water bath at room temperature of 27 °C. The desired temperature of rubber latex sample was achieved by mixing water in the bath with boiling water at 100 °C, or cooled water at 0 °C. The temperature in the water bath was monitored using a Fluke®62 mini IR thermometer. For each measurement, the controlled temperature liquid sample was left for 20 min and carefully stirred to obtain a uniform distribution of temperature and mixture in the liquid sample.

3. Complex permittivity measurement

The rubber latex samples were prepared to get different DRC percentages by diluting concentrated rubber latex (about 60% DRC, 38% water, 0.4% ammonia and non-rubber contents for the remainder) with Milli-Q® water. Four different DRC percentages of latex samples covering DRC ranges of concentrated and natural fresh latex were prepared. The DRCs of the rubber latex samples were validated immediately after the measurement using the standard oven-drying method (ISO 126:1972 Dry rubber content, DRC).

Figure 2 shows the Cole–Cole plots of the measured complex permittivity (ϵ' and ϵ'') of rubber latex samples at four different DRC percentages (60.80%, 45.05%, 37.79% and 23.25%) at 10 °C, 15 °C, 27 °C and 40 °C. The conductivity region is clearly evident at frequencies below 2.5 GHz. The characteristic of ϵ'' is mainly influenced by the ionic conductivity caused by the non-rubber contents in the rubber latex samples, such as ammonia (ammonium hydroxide). It is shown in this frequency region that ϵ'' decreases with frequency but increases with the ambient temperature, because the conductivity increases with temperature.

It appears that the diameter of the semi-circular part of the plot decreases with DRC for all temperatures. The diameter of the semi-circular part of the Cole–Cole plot is proportional to the relaxation amplitude and also decreases with DRC value for each temperature, implying that the relaxation time of rubber latex decreases with temperature.

The temperature variation of the complex permittivity of low-DRC rubber latex is more prominent than that of high-DRC rubber latex. This is because of the dominant role of bound water in the low-DRC rubber latex. At very low frequency, the temperature dependence of the complex

permittivity of the rubber latex is a result of the ionic conductivity. On the other hand, the complex permittivity of the rubber latex in the high frequency region changes little with temperature because the dielectric characteristic of rubber latex in this frequency region is mainly governed by the bound water molecules.

The complex permittivity above 2.5 GHz obviously varies with DRC and becomes less dependent on DRC at high frequency. We believe that this is because the water in the rubber latex is bound and therefore exhibits a different distribution of relaxation times for different DRC values.

4. Relaxation time and activation energy

It is observed from Fig. 2 and from Hasted (1973) and Kaatz (2005) that the Cole–Cole plots of the rubber latex have similar shape to that of bulk water. Hence, we can apply the same procedure as defined for bulk water to investigate the relaxation characteristic under the assumption that the dielectric properties of the rubber latex are a combination of the dielectric properties of the constituents in rubber latex. For bulk water, the procedure to determine the relaxation time is achieved by modelling the measured complex permittivity with the Debye equation (Haynes & Locke, 1995) as follows:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau}, \quad (1)$$

where $i = \sqrt{-1}$, ϵ_∞ is the dielectric permittivity extrapolated to high frequency, ϵ_0 is the static dielectric permittivity, ω is the angular frequency of the applied electric field and τ is the Debye relaxation time. Consequently, the ϵ' and ϵ'' of bulk water can be obtained as follows:

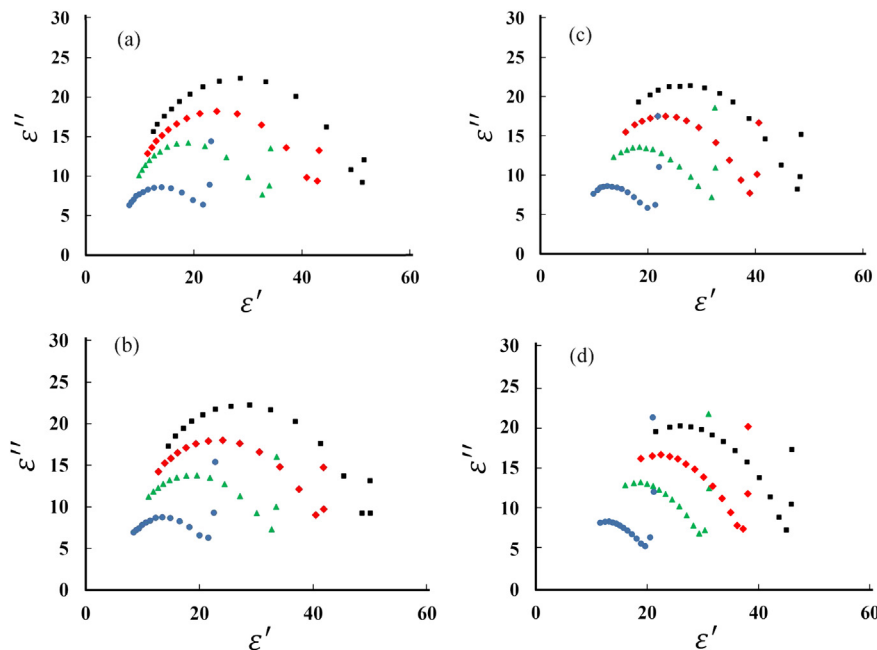


Fig. 2 – Cole–Cole plots of rubber latex samples from 0.5 to 33 GHz for DRC 60.80% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆) and 23.25% (■) at (a) 10 °C, (b) 15 °C, (c) 27 °C, and (d) 40 °C.

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (2a)$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} (\omega \tau). \quad (2b)$$

Since the rubber latex has conductivity at low frequency, as shown in Fig. 2, the ionic conductivity term ($\sigma/\epsilon_0\omega$) in rubber latex needs to be included in Equation (2b) as follows:

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} (\omega \tau) + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}. \quad (2c)$$

where σ is the conductivity of the rubber latex, which can be simply obtained by applying a regression technique. From Equations (2a) and (2c), the relationship between ϵ' and ϵ'' can therefore be expressed in terms of either ϵ_{∞} or ϵ_0 (Connors, 1990) as follows:

$$\epsilon' = (-\tau) \left(\omega \epsilon'' - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right) + \epsilon_0. \quad (3)$$

In Equation (3), ϵ' can be characterised as a linear function of ϵ'' . The relaxation time is related to the slope, where ϵ_0 is the intersection on the ϵ' axis of the Cole–Cole plot. Hence, the Debye relaxation time (τ) can be determined using a graphical method.

Figure 3 shows the graphical analysis for the complex permittivity of rubber latex samples and bulk water at 10 °C, 15 °C, 27 °C and 40 °C. The plotted data from left to right represents the complex permittivity from 0.5 to 33 GHz. The bulk water data can be completely characterised with a single slope function, illustrating that only one relaxation process is

present in the bulk water over the measured frequency range. The straight lines shown in Fig. 3 separate two regions, indicating that two relaxation processes exist. Each region is characterised by the slope of the straight line fit. Each slope was determined by applying linear regression analysis with Equation (3). The obtained correlation coefficients R^2 were in the range of 0.96–0.99.

The relaxation time obtained from the graphical analysis using Equation (3) is plotted with error bars for standard deviation in Fig. 4. Each relaxation time is computed from the graph slope as shown in Fig. 3. The two relaxation times (τ_1'' and τ_2'') imply the existence of two mixing constituents in the rubber latex. In Fig. 4(a), the τ_1'' relaxation times increase with DRC, showing that the bound water molecules in rubber latex take a longer time than bulk water molecules to align with the field. On the other hand, τ_2'' shown in Fig. 4(b) decreases with DRC which is opposite to the previous case.

The activation energy parameter is applied in this paper to investigate the molecular mechanisms in rubber latex. Theoretically, the relaxation time is related to the activation energy (E_a) by using the Arrhenius equation (Hasted, 1973) as follows:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}. \quad (4a)$$

Using the logarithmic form, one can write Equation (4a) as

$$\ln(\tau^{-1}) = \frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{T} \right] + \ln(\tau_0^{-1}). \quad (4b)$$

where τ_0 is pre-exponential factor, R is Boltzmann's constant (8.314 J mol^{-1}), and T is the temperature in K. In this case, the

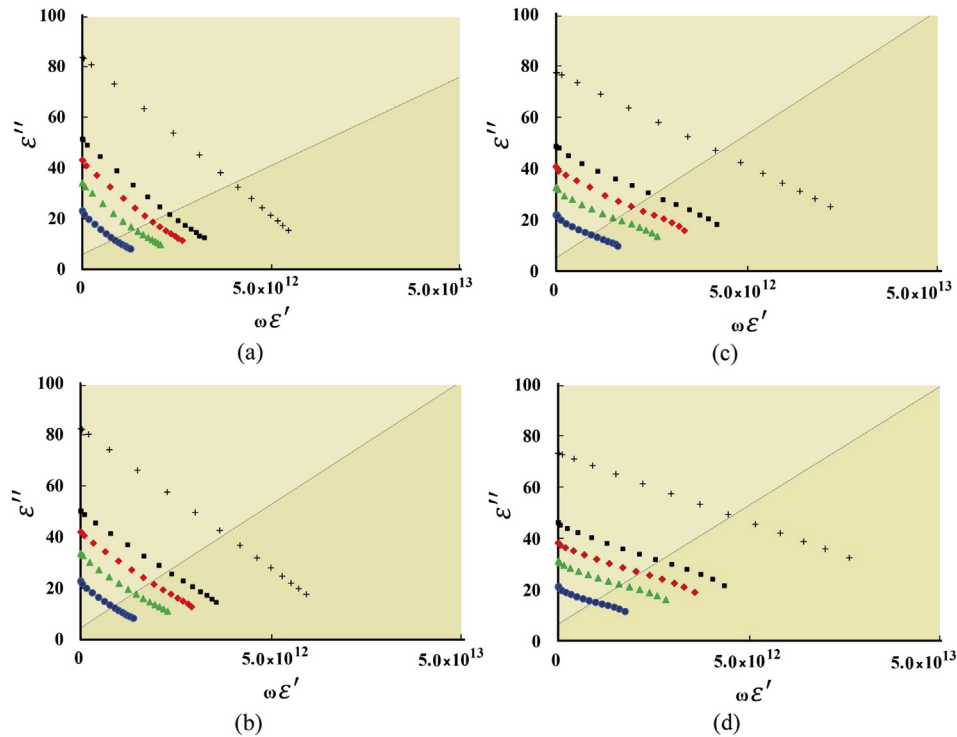


Fig. 3 – Analysis of complex permittivities of rubber latex samples for DRC 60.80% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆), 23.25% (■), and water (+) using Equation (3) at (a) 10 °C, (b) 15 °C, (c) 27 °C, and (d) 40 °C.

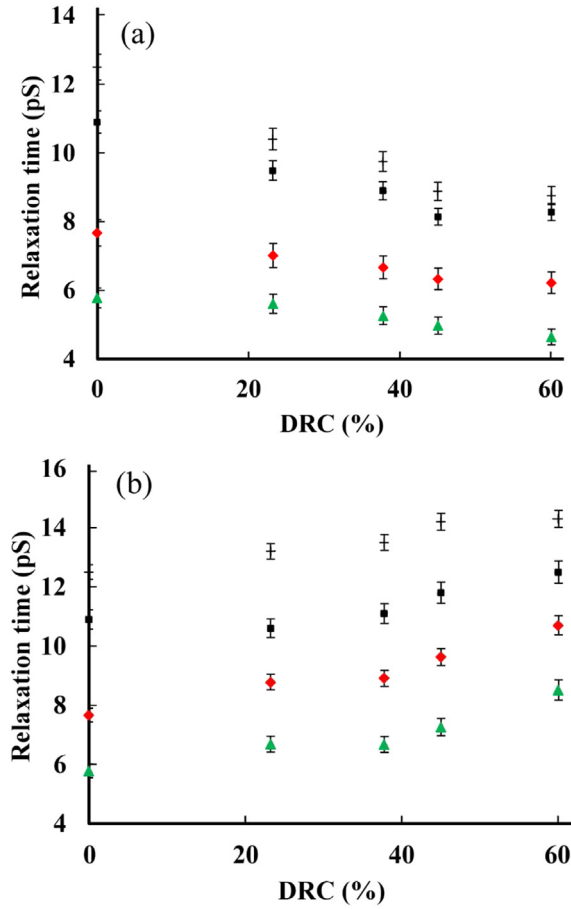


Fig. 4 – The relaxation time of rubber latex samples obtained at 40.0 °C (▲), 27.0 °C (◆), 15.0 °C (■), and 10.0 °C (+), (a) τ_1'' and (b) τ_2'' .

$-E_a/R$ term can be determined from the slope of the plot of $\ln(\tau^{-1})$ versus $1/T$ of relaxation time in Fig. 4.

From Fig. 5, the E_a of rubber latex at various DRCs can be determined, and the results are listed in Table 1. The calculated E_a of water from Equation (4) is 18.96 kJ mol⁻¹, which closely agrees with that reported by Chaplin (2007). The value of E_a of 18.96 kJ mol⁻¹ is related to the energy of hydrogen bonding of O–H···O in the bulk water. In the relaxation process represented by τ_1'' , the E_a of rubber latex (from 14.91 to 9.36 kJ mol⁻¹) decreases with percentage of DRC (from 23.25 to 60.80%). This can be attributed to the characteristic of hydrogen bonding of N–H···O, due to the presence of ammonium hydroxide in the rubber latex. For the relaxation process represented by τ_2'' , E_a (from 17.18 to 21.09 kJ mol⁻¹) increases with DRC (from 23.25 to 60.80%) and is slightly higher than bulk water. We believe that this is related to the bound water molecules in rubber latex that have higher bond strength than bulk water molecules.

5. Dielectric model for rubber latex

The characteristics of the relaxation time in rubber latex as shown in Fig. 4 can be related to different polarisation types

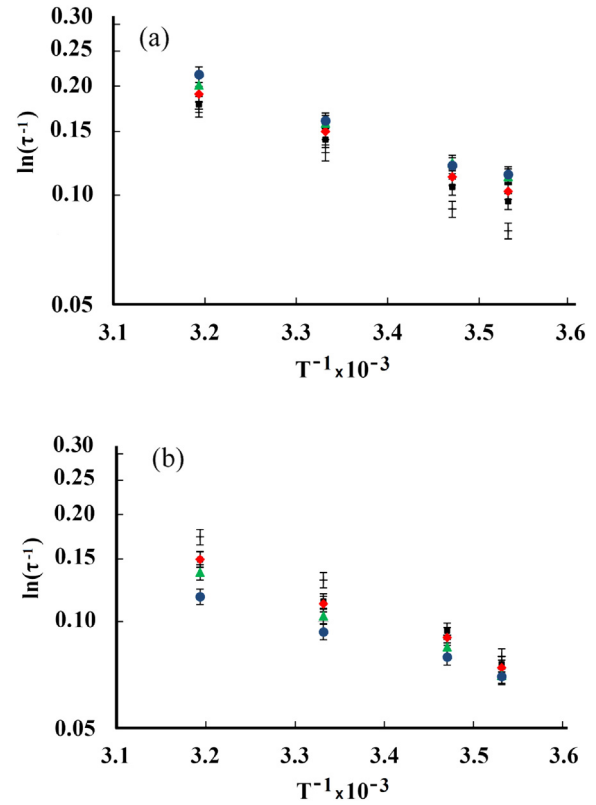


Fig. 5 – Activation energy of rubber latex samples obtained from Equation (4) at DRC 60.08% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆), and 23.25% (■), for (a) τ_1'' and (b) τ_2'' .

and mixing constituents. This can then confirm that multiple relaxation processes exist in rubber latex. To demonstrate this, the extended Debye equations for the double relaxation processes obtained in Fig. 5 can be modelled as follows:

$$\epsilon^*(\omega, T, \text{DRC}) = \epsilon_{\infty,d} + \frac{\Delta\epsilon_1}{1 + i\omega\tau_1''(T, \text{DRC})} + \frac{\Delta\epsilon_2}{1 + i\omega\tau_2''(T, \text{DRC})} - i \frac{\sigma_d}{\omega\epsilon_{0,d}} \quad (5)$$

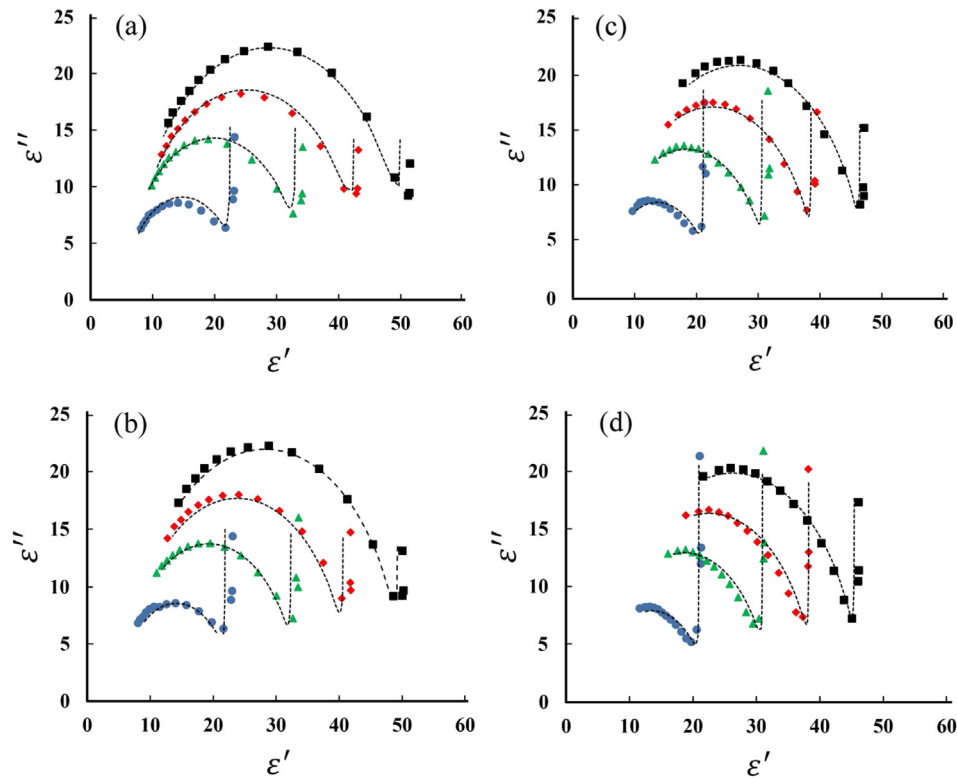
where $\Delta\epsilon_1$ and $\Delta\epsilon_2$ are relaxation amplitude of the relaxation time region (Buchner, Baar, Fernandez, Schrodle, & Kunz, 2005; Stuerge, 2006), σ_d is electrical conductivity, $\epsilon_{0,d}$ is static permittivity and $\epsilon_{\infty,d}$ is the dielectric permittivity at high frequency. Next, nonlinear regression analysis was applied with Equation (5) to predict σ_d , $\epsilon_{0,d}$, $\epsilon_{\infty,d}$, $\Delta\epsilon_1$ and $\Delta\epsilon_2$. The initial value of σ_d was chosen to be small (0.5×10^{12}). The initial value of $\epsilon_{\infty,d}$ is equal to 5, which is the dielectric permittivity of water at very high frequency. The initial value of $\epsilon_{0,d}$ was set to be twice that of $\epsilon_{\infty,d}$. The initial values of $\Delta\epsilon_1$ and $\Delta\epsilon_2$ were 5 and 10, respectively. For each T and DRC, the values $\tau_1''(T, \text{DRC})$, $\tau_2''(T, \text{DRC})$ obtained in Fig. 4 and the measured ϵ^* were substituted into Equation (5). Nonlinear regression analysis was performed by setting the parameter ranges which are $\sigma_d \in [0, 2]$, $\epsilon_{\infty,d} \in [4, 8]$, $\epsilon_{0,d} \in [8, 16]$, and $\Delta\epsilon_1, \Delta\epsilon_2 \in [8, 16]$. The goal was to obtain the highest value of R^2 . Table 2 shows the model parameters and the R^2 value. It is shown that σ_d changes only with temperature. $\epsilon_{0,d}$, $\epsilon_{\infty,d}$ and $\Delta\epsilon_1$ change with DRC, and $\Delta\epsilon_2$ changes with DRC and temperature. The modelling results,

Table 1 – Activation energy E_a of different DRC rubber latex samples.

Relaxation process	Activation Energy E_a (kJ mol ⁻¹)			
	DRC@23.25%	DRC@37.79%	DRC@45.05%	DRC@60.80%
τ_1''	14.91 ± 0.50	14.91 ± 0.50	13.24 ± 0.50	9.36 ± 0.50
τ_2''	17.18 ± 0.50	18.21 ± 0.50	18.26 ± 0.50	21.09 ± 0.50

Table 2 – Model parameters in Equation (5).

Temp. (°C)	DRC (%)	Double relaxation model							R^2
		σ_d (10 ¹² S m ⁻¹)	$\epsilon_{\infty,d}$	$\epsilon_{0,d}$	$\Delta\epsilon_1$	$\Delta\epsilon_2$	τ_1'' (ps)	τ_2'' (ps)	
10	60.80	0.45	5.50	10.00	4.50	12.30	14.30	8.76	0.96
	45.05	0.45	5.60	10.50	4.90	22.50	12.40	8.88	0.92
	37.79	0.50	6.20	11.00	4.80	31.00	13.50	9.75	0.94
	23.25	0.45	6.40	12.00	5.60	38.50	13.20	10.40	0.97
15	60.80	0.50	5.50	10.00	4.50	12.00	12.50	8.28	0.96
	45.05	0.50	5.60	10.50	4.90	22.00	11.80	8.14	0.93
	37.79	0.50	6.20	11.00	4.80	29.80	11.10	8.90	0.98
	23.25	0.50	6.40	12.00	5.60	37.50	10.60	9.49	0.99
27	60.80	0.63	5.50	10.00	4.50	11.80	10.70	6.22	0.99
	45.05	0.62	4.90	10.50	4.90	21.10	9.63	6.33	0.98
	37.79	0.60	6.20	11.00	4.80	28.80	8.91	6.67	0.98
	23.25	0.60	6.80	12.00	5.20	36.00	8.78	7.01	0.99
40	60.80	0.70	5.50	10.00	4.50	11.00	8.51	4.64	0.99
	45.05	0.70	5.60	10.50	4.90	20.50	7.26	4.97	0.98
	37.79	0.70	6.20	11.00	4.80	27.30	6.68	5.26	0.97
	23.25	0.70	6.40	12.00	5.60	33.50	6.69	5.61	0.99

**Fig. 6 – Fitting data with Equation (5) (dashed line) comparing the complex permittivity of rubber latex samples at DRC 60.08% (●), 45.05% (▲), 37.79% (◆), and 23.25% (■) at (a) 10 °C, (b) 15 °C, (c) 27 °C, and (d) 40 °C.**

describing the complex permittivity of the rubber latex using the relaxation time obtained from Equation (3), are shown in Fig. 6. From the R^2 results, it is shown that the double relaxation model given in Equation (5) can accurately describe the dielectric properties of rubber latex.

6. Conclusions

The complex permittivity of rubber latex samples with various DRCs has been extensively characterised over the frequency range 0.5–33 GHz for an ambient temperature range of 10–40 °C. It is found that the ϵ' of rubber latex increases with water content and exhibits both frequency and temperature dependency, like bulk water. Below 2.5 GHz, the value of ϵ' is dominated by ionic conductivity, which is related to the non-rubber constituents. The results show that the ϵ' of rubber latex is mainly governed by the water content. Consequently, determining the DRC value for a given rubber latex sample can be accomplished by measuring only ϵ' . On the other hand, the imaginary part, ϵ'' , can indicate non-rubber content in the sample. By measuring complex permittivity for a range of frequencies and temperatures, it is found that the complex permittivity at low frequency is more frequency-dispersive than in the high frequency region. The relaxation process is analysed by using a graphical method that is based on the Debye equation. The results confirm that bound water is present, with behaviour different to bulk water, and that multiple relaxation times are observed due to the presence of non-rubber constituents and ammonium hydroxide. An extended Debye equation has been used to model the dielectric properties of rubber latex and shows a good fit to measured data. In conclusion, the extensive complex permittivity measurements and modelling results presented in this paper give a better understanding of the properties of rubber latex at microwave frequencies, and this is important for the future development of microwave sensors for use in agriculture and industrial processing.

Acknowledgement

This research is financially supported by Thai Research Fund (TRF) and Prince of Songkla University under the grant contract numbers RSA5680056 and ENG550076S respectively. The authors would like to thank the anonymous reviewers and Editor for their valuable comments and suggestions.

REFERENCES

- Agilent Technologies. (2008). *Agilent 85070E dielectric probe kit 200 MHz to 50 GHz*. Agilent Technologies.
- Buchner, B., Baar, C., Fernandez, P., Schrodle, S., & Kunz, W. (2005). Dielectric spectroscopy of micelle hydration and dynamics in aqueous ionic surfactant solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 118, 179–187.
- Chaplin, M. F. (2007). Water's hydrogen bond strength. In R. M. Lynden-Bell, S. C. Morris, J. D. Barrow, J. L. Finney, &

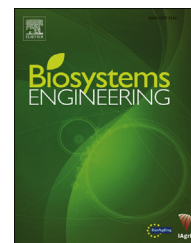
- C. L. Harper (Eds.), *Water of life: Counterfactual chemistry and fine-tuning in biochemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Connors, K. (1990). *Chemical kinetics*. VCH Publishers.
- Debye, P. (1929). *Polar molecule*. New York: Chemical Catalog Co., Inc.
- Eisenberg, C., & Kauzmann, W. (1969). *The structure and properties of water*. Oxford: Oxford University Press.
- Guo, W., Wu, X., Zhu, X., & Wang, S. (2011). Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4500 MHz. *Biosystems Engineering*, 110(3), 340–347.
- Hassan, J. (1999). *Dielectric properties of Hevea rubber latex*. Ph. D. University Putra Malaysia.
- Hasted, J. B. (1973). *Aqueous dielectrics*. London: Chapman and Hall.
- Haynes, L. C., & Locke, J. P. (1995). Microwave permittivity of cracker dough, starch and gluten. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 30(2), 124–131.
- Julrat, S., Chongcheawchamnan, M., Kaorapaphong, T., Pattapiboonchai, O., Krairiksh, M., & Robertson, I. D. (2012). Single frequency based dry rubber content determination technique for in-field measurement application. *IEEE Sensor Journal*, 12(10), 3019–3030.
- Kaatze, U. (2005). Moisture electromagnetic wave interactions with water and aqueous solution. In K. Kupfer (Ed.), *Electromagnetic aquametry* (pp. 15–137). Germany: Springer-Verlag.
- Khalid, K. (1991). Microwave dielectric properties of Hevea rubber latex. In *Proceedings of the Asia-Pacific microwave conference* (pp. 611–616).
- Khalid, K., Hassan, J., & Yusof, W. D. (1997). Dielectric phenomena in Hevea rubber latex and its applications. In *Proceedings of the 5th international conference on properties and applications of dielectric materials* (pp. 78–81).
- Nandi, N., & Bagchi, B. (1997). Dielectric relaxation of biological water. *The Journal of Physical Chemistry B*, 101, 10954–10961.
- Nelson, S. O. (1992). Dielectric properties of agricultural products measurements and applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26(5), 845–896.
- Nelson, S. O. (2005). Dielectric spectroscopy of fresh fruits and vegetables. In *Proceedings of the IEEE instrumentation and measurement technology conference* (pp. 360–364).
- Nelson, S. O., & Trabelsi, S. (2008). Dielectric spectroscopy measurements on fruit, meat, and grain. *Transactions of the ASABE*, 51(5), 1829–1834.
- Ragni, L., Gradari, P., Berardinelli, A., Giunchi, A., & Guarnieri, A. (2006). Predicting quality parameters of shell eggs using a simple technique based on the dielectric properties. *Biosystems Engineering*, 94(2), 255–262.
- Sacilik, K., Tarimci, C., & Colak, A. (2006). Dielectric properties of flaxseeds as affected by moisture content and bulk density in the radio frequency range. *Biosystems Engineering*, 93(2), 153–160.
- Sharp, K. A. (2001). *Water: Structure and properties*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Sosa-Morales, M. E., Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., Garcia, H. S., & Lopez-Malo, A. (2009). Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part I: Relation between dielectric properties and ripening. *Biosystems Engineering*, 103(3), 297–303.
- Stuerga, D. (2006). Microwave–material interactions and dielectric properties, key ingredients for mastery of chemical microwave processes. In A. Loupy (Ed.), *Microwaves in organic synthesis* (pp. 1–57). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Trabelsi, S., & Nelson, S. O. (2006). Temperature-dependent behavior of dielectric properties of bound water in grain at microwave frequencies. *Measurement Science and Technology*, 17, 2289–2293.

Trabelsi, S., Krazsewski, A. W., & Nelson, S. O. (1998). New density-independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(3), 613–622.

Trabelsi, S., Nelson, S. O., & Lewis, M. A. (2009). Microwave nondestructive sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 3, 114–121.

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/issn/15375110

Research Paper

Oil content determination scheme of postharvest oil palm for mobile devices



Burawich Pamornnak^a, Somchai Limsiroratana^a,
Mitchai Chongcheawchamnan^{b,*}

^a Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112, Thailand

^b Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 January 2014

Received in revised form

24 November 2014

Accepted 16 March 2015

Published online 3 April 2015

Keywords:

Colour correction

Classification

Image processing

Oil extraction rate

Ripeness degree

RGB

In this paper, a simple scheme based on an image processing technique for determining oil content in postharvest oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.), implemented for a mobile device, is proposed. The scheme has three main algorithms for colour correction, classification and oil extraction rate (OER) determination. The colour correction algorithm can correct image colour from the device-dependence effect in the standard RGB (sRGB) colour model based on the determined device profile function. The classification process was developed on a two-layer feedforward neural network by using features from the hue value of oil palm fruits. The OER determination function was modelled by using a polynomial regression model based on the hue and saturation values. The results demonstrated that the proposed scheme can classify and determine the OER with a simple calculation. The scheme was implemented on a mobile device/phone and tested with 64 oil palm fruit samples. Compared with the standard Soxhlet extraction measurement, the scheme achieves a mean error of OER 2.20 with a postharvest OER range of 30–73%.

© 2015 IAGRE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is an important global economic plant because it produces higher oil content than other oil producing crops. Palm oil is used as a crucial substance to produce several consumer products including soap and diesel engine fuel. Generally, the palm fruit var. *Tenera* is most likely to be chosen to farm due to the highest oil producing palm

fruit. Farmers can gain much revenue by trading palm fruit for its oil product. The degree of oil palm fruit ripeness and its oil content, defined in terms of oil extraction rate (OER), are the key indicators for determining product quality and pricing. Thus, a grading process for palm fruit is required for palm trading markets. Currently, this grading process is performed by human experts who can classify palm fruit quality from colour, shape, texture and some other profiles of oil palm. However, human errors can occur due to work overload. For

* Corresponding author. Tel.: +66 (0) 74558831, +66 (0) 864982343 (mobile); fax: +66 (0) 74459395.

E-mail address: mitchai.c@psu.ac.th (M. Chongcheawchamnan).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.03.010>

1537-5110/© 2015 IAGRE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Nomenclature

$a_{x,i}$	regression coefficient
c	offset of the linear function
e_i	regression error
E_T	total Euclidian distance in the standard RGB space
$\Delta E_{ab,T}^*$	total colour difference in the CIELab space
h	number of hidden nodes of the neural network
H_{ave}	average value of the bottom hue
k	number of subsections of the lateral hue
$[\Delta L_j^*, \Delta a_j^*, \Delta b_j^*]$	difference values of lightness, a^* and b^* in the CIELab colour space
m	Slope of the linear function
n	number of the colour patches
S_{ave}	average value of the bottom saturation.
$[sR, sG, sB]$	captured standard RGB data set
$[sR, sG, sB]$	reference standard RGB data set
$\bar{x}_i$	reference image colour
x_i	captured image colour
y	classifier output
a^1, a^2	output vectors of the hidden and output layers
b^1, b^2	bias vectors of the hidden and output layers
f^1, f^2	sigmoid function vectors of the neural network
p	input feature vector of the neural network
W^1, W^2	weighting coefficient matrixes of the hidden and output layers
$\bar{x}$	vector of the reference image colour
X	Vandermonde matrix of the captured standard RGB space
α	vector of the regression coefficients

this reason, numerous non-destructive techniques have been proposed for classifying palm fruit. A transmission-mode ultrasonic technique has been proposed to predict oil content in oil palm fruit (Suwannarat, Khaorapapong, & Chongcheawchamnan, 2012). Using a neural network model, they reported that the technique achieved a mean absolute error of 2.2 within the OER range of 20–60%. However, a measurement setup for this ultrasonic technique must be installed which is difficult for in-field applications. A microwave technique was proposed to measure the moisture content of oil palm. The moisture content was computed from the complex permittivity of the palm fruit (Abbas et al., 2005; Yee, Abbas, Jusoh, Yeow, & Meng, 2011; Yeow, Abbas, & Khalid, 2010). Based on dielectric constant permittivity, the OER determination function was related to the average spatial dielectric constant of oil palm fruit (Pamornnak, Limsirorattana, & Chongcheawchamnan, 2013). However, this technique is both complicated and a destructive method.

Since qualities of agricultural products are related to their peel colour information, various research works on image based non-destructive testing have been reported. An image classification/recognition algorithm has most typically been used as the core algorithm where RGB (Red, Green and Blue) and hue colour were usually adopted to characterise colour information. For example, post-harvest quality of mangosteen was determined from the relationship between the pericarp

hue colour and the anthocyanin composition (Palapol et al., 2009), a rapid flesh colour determination for clingstone peaches was proposed by forming a relationship between peel and flesh hue degrees (Slaughter, Crisosto, & Tiwari, 2013), and a quality grading system for tomatoes was proposed by forming the colour of interest in RGB to a one-dimensional index colour space (Lee, Archibald, & Xiong, 2011). The RGB colours of an apple were transformed to monochrome prior to applying a feature extraction algorithm for grading apple quality (Rennick, Attikiouzel, & Zaknich, 1999). An automatic technique for predicting the ripening index of olives based on the RGB colour model and artificial neural network has also been reported (Furferi, Governi, & Volpe, 2010). The technique was applied for predicting the harvest time for olives. For image processing applied to oil palm, a machine vision system was applied to classify and predict oil content in palm fruit as well as in palm bunches. Several systems were proposed for automated industry production by using colour feature models such as RGB, HSI, or relative reflectance (Abdullah, Guan, Mohamed, & Noor, 2002; Abdullah, Guan, & Mohd Azemi, 2001; Alfatni, Shariff, Shafri, Saeed, & Eshanta, 2008; Balasundram, Robert, & Mulla, 2006; Junkwon et al., 2009; Razali, Wan Ismail, Ramli, Sulaiman, & Harun, 2009, 2011; Tan, Low, Lee, & Low, 2010).

High performance processors and digital CMOS sensors are commonly embedded in smart mobile devices (mobile tablets, phones, embedded computers, etc.). Image processing techniques have been implemented in these mobile devices for various applications. However, it is well known that image colour obtained from a digital camera unavoidably depends on three important factors. These factors include the camera device, the illumination condition (Barnard, Martin, Coath, & Funt, 2002; Granzier, Brenner, & Smeets, 2009; Wang & Zhang, 2010), and the snapshot scene. Factors affecting the colour image in a camera device include the image sensor, lens, as well as the preprocess algorithm embedded in the camera. Consequently, a preprocess algorithm is needed to correct image colour information (Gijzenij, Gevers, & Weijer, 2011; Park, Lee, Kim, & Ha, 2005). Colour information, if uncorrected, can be distorted and subsequently deteriorate performances of the core image processing algorithm. Thus, from a practical viewpoint, colour correction algorithm has to be implemented. Automatic white balance algorithms (Chiu & Fuh, 2010; Hsu, Mertens, Paris, Avidan, & Durand, 2008; Huo, Chang, Wang, & Wei, 2006; Lam, 2005; Liu, Chan, & Chen, 1995) have been implemented and embedded in camera devices to correct colour information suffering from different illuminants. Several algorithms have been proposed such as Gray World, a calibration based technique, and white object purification, etc. Unfortunately, such methods fail to correct colour information suffering from the different camera device effect (device-dependence effect). As far as the authors are aware, there has yet to be any such algorithm that can correct the image colour from device and illumination dependence problems simultaneously, using a simple calculation.

In this paper we propose a simple scheme which can be implemented on a mobile device to predict the OER of oil palm fruit using features extracted from the HSV colour space. The standard RGB (sRGB) was adopted because of its widespread use. The algorithms implemented in our scheme consist of

three algorithms for colour correction, palm fruit classification and OER prediction.

This paper is organised by addressing the preprocessing process which includes the colour correction algorithm and their performances in Section 2. The methodology, which includes the classification algorithm, the prediction function and their performances will be illustrated in Section 3. The proposed system design and mobile device implementation are demonstrated in Section 4.

2. Preprocessing process and performance

This section describes the preprocessing technique proposed in this paper and its performance.

2.1. Device-Dependence Colour Correction (DDC)

Here we present an algorithm which corrects colour information affected by several factors in a camera device. The algorithm, called DDC (Device-Dependence Colour Correction), consists of two main steps. The first step, as shown in Fig. 1(a), is to estimate the *device profile function* for the individual colour channels, whereas the second step, shown in Fig. 1(b), is to correct image colour with the estimated profile function set.

To estimate a device profile function for a digital camera, the reference colour information data set (*reference sRGB*) was based on the measured sRGB of the GretagMacbeth standard colour checker (24 patches) as shown in Fig. 2. A HunterLab ColourFlex colorimeter (Hunter Associates Laboratory, Reston, VA) was used to measure the *reference sRGB*.

First, the colour checker was captured by a digital camera required for colour correction. The captured image data was modelled in sRGB colour space. By averaging colour information of all pixels in each colour patch area, the captured image information in the sRGB model called the *captured sRGB* data set was obtained. The device profile function was calculated by mapping the *reference sRGB* and the *captured sRGB* data sets for the three colour channels as shown in Eq. (1),

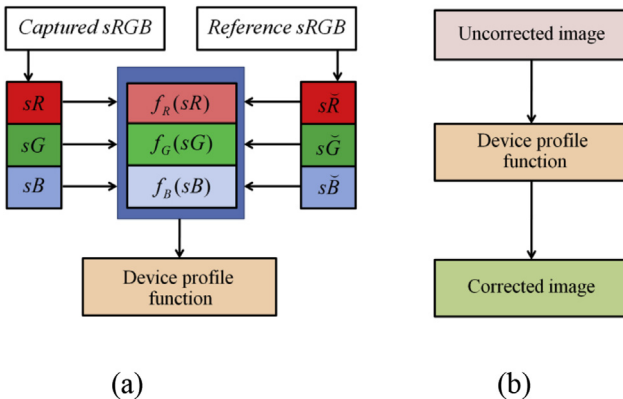


Fig. 1 – Diagrams of (a) device profile estimation step and (b) colour correction step.



Fig. 2 – Standard GretagMacbeth colour checker with 24 patches (BabelColor, 2012).

$$\begin{aligned} \tilde{sR} &= f_R(sR) \\ \tilde{sG} &= f_G(sG), \\ \tilde{sB} &= f_B(sB) \end{aligned} \quad (1)$$

where $f_R(\cdot)$, $f_G(\cdot)$ and $f_B(\cdot)$ are mapping functions for the three colour channels, $[sR, sG, sB]$ is the *captured sRGB* data set, and $[\tilde{sR}, \tilde{sG}, \tilde{sB}]$ is the *reference sRGB* data set.

In this paper, since colour channels in a digital camera are assumed to be physically independent as shown in Fig. 1(a), a second order polynomial device profile function was proposed for correcting colour channels as shown in Eq. (2),

$$\begin{aligned} \tilde{sR} &= \alpha_{R,2}sR^2 + \alpha_{R,1}sR + \alpha_{R,0} \\ \tilde{sG} &= \alpha_{G,2}sG^2 + \alpha_{G,1}sG + \alpha_{G,0}, \\ \tilde{sB} &= \alpha_{B,2}sB^2 + \alpha_{B,1}sB + \alpha_{B,0} \end{aligned} \quad (2)$$

where $\alpha_{R,i}$, $\alpha_{G,i}$ and $\alpha_{B,i}$ are the coefficients for the colour channels of the camera device to be corrected. These coefficients were enumerated by applying the multiple regression technique as shown in Eq. (3),

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \\ \vdots \\ \tilde{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{x,0} \\ \alpha_{x,1} \\ \alpha_{x,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where $\tilde{x}_i$, x_i , $\alpha_{x,i}$, and e_i are the *reference image colour*, *captured image colour*, *regression coefficients*, and *regression error*, respectively. For the second-order polynomial functions, n is the number of colour patches ($n=24$). The regression coefficients estimated by using the ordinary least square method are as shown in Eq. (4),

$$\alpha = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \tilde{\mathbf{x}}, \quad (4)$$

where α is the vector of the regression coefficients, $\mathbf{X}$ is the Vandermonde matrix of the *captured image colour* and $\tilde{\mathbf{x}}$ is the vector of the *reference image colour*, respectively. Applying the regression coefficients obtained from Eq. (4) to Eq. (2), the device profile functions for the three colour channels were obtained. The colour correction process is shown in Fig. 1(b).

2.2. DDC experiment and performances

To demonstrate the performance of the DDC algorithm, image information from the standard GretagMacbeth colour checker shown in Fig. 2 was used as the *reference sRGB* data set. Digital

cameras equipped on three different mobile devices were used including Samsung GT-P1000 (T), Samsung Galaxy Note (N) and Sony Xperia Z (X). To alleviate different illuminant effects, all experiments were performed using auto-exposure and in-built fluorescent white-balance functions. The experimental setup used to evaluate the performance of DDC algorithm is depicted in Fig. 3. Two arrays of white light-emitting diodes (LED 5630 SMD, 14 W, 6500 K temperature, 430–680 nm response, CRI 82) were installed at the top of the light-controlled box. A standard colour checker was posted against the inside wall.

The snapshots of the standard colour checker from these three cameras are shown in Fig. 4(a). Noise in each of the captured images was reduced using a median filter. Evidently, the original colour information obtained from these three cameras should be different due to the device-dependence effect. Figure 4(b) and (c) shows the corrected image after applying the Poly-3 (Wang & Zhang, 2010) and the DDC algorithms, respectively. The colour sRGB data after applying the correction algorithms is called *corrected sRGB*.

In this paper, the correction algorithm performance was evaluated by computing the total distance between the *compared* and *reference* data sets of all 24 patches. This was defined by the Total sRGB Euclidian distance (E_T) as shown in Eq. (5) and the Total colour difference ($\Delta E_{ab,T}^*$) as shown in Eq. (6).

$$E_T = \sum_{j=1}^n \sqrt{(sR'_j - s\tilde{R}_j)^2 + (sG'_j - s\tilde{G}_j)^2 + (sB'_j - s\tilde{B}_j)^2}, \quad (5)$$

$$\Delta E_{ab,T}^* = \sum_{j=1}^n \sqrt{(\Delta L_j^*)^2 + (\Delta a_j^*)^2 + (\Delta b_j^*)^2}, \quad (6a)$$

where $[s\tilde{R}_j, s\tilde{G}_j, s\tilde{B}_j]$ and $[sR'_j, sG'_j, sB'_j]$ are the *reference* and the *compared* data sets of colour patch j , and $[\Delta L_j^*, \Delta a_j^*, \Delta b_j^*]$ are the difference values between the *reference* and the *compared* data in CIELab colour space (Westland, Ripamonti, & Cheung, 2012). The $[sR'_j, sG'_j, sB'_j]$ are the mean values of the sRGB colour data in the colour patch j .

To compare the performances of the DDC with the Poly-3 algorithm for all 24 colour patches, the reduction rates in E_T and $\Delta E_{ab,T}^*$ after applying the correction algorithm were evaluated. The values of E_T and $\Delta E_{ab,T}^*$ and the performance comparison between the two algorithms are summarised in Table 1. It is shown that the DDC algorithm corrects colour better than the Poly-3 algorithm for all devices.

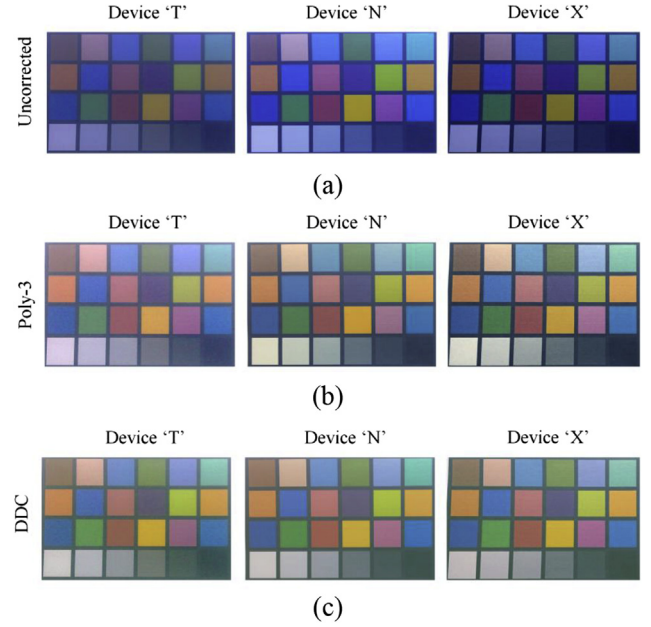


Fig. 4 – Image snapshots of the standard colour checker taken from three different cameras, (a) uncorrected, (b) corrected with Poly-3, and (c) corrected with DDC.

To demonstrate the similarity of the corrected colour with the reference colour, the relation between the *corrected sRGB* and the *reference sRGB* image information should be determined. A linear function was used as follows,

$$x' = m\bar{x} + c, \quad (6b)$$

where $\bar{x}$ and x' are the *reference sRGB* and *compared sRGB* data sets, respectively, while m and c represent the slope and offset of the linear function, respectively. If an algorithm can correct colour efficiently, then x' should be related to $\bar{x}$, with m and c being 1 and 0, respectively.

Table 2 shows the linear regression results. As shown in Table 2, correlation parameters of uncorrected, the Poly-3 algorithm, and the DDC algorithm are detailed. The slope and offset of the DDC algorithm were very near to 1 and 0, implying that the corrected colour tones were very close to the

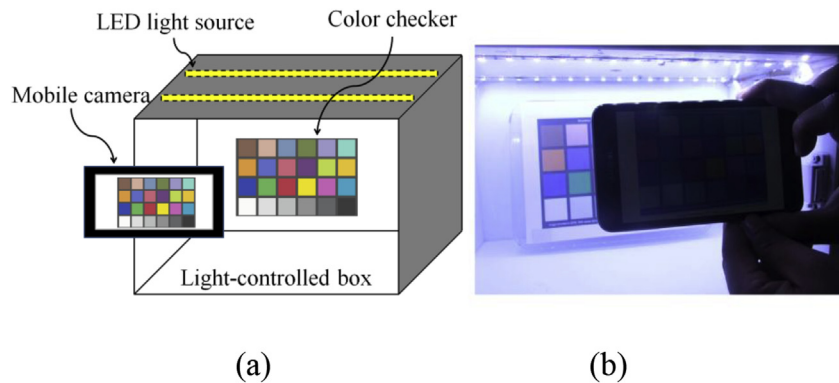


Fig. 3 – Setups for the (a) light-controlled box and (b) experiment.

Table 1 – Performance comparison of the correction algorithms for different camera devices.

Device	Total Euclidian distance								Reduction rate (%)	
	Uncorrected		Poly-3				DDC		Poly-3	DDC
	E_T	$\Delta E_{ab,T}^*$	E_T	$\Delta E_{ab,T}^*$	E_T	$\Delta E_{ab,T}^*$	E_T	$\Delta E_{ab,T}^*$	E_T	$\Delta E_{ab,T}^*$
T	1755	35.64	543	7.18	522	6.79	69	80	70	81
N	1593	37.36	630	10.04	520	7.20	60	73		81
X	2267	42.00	694	9.90	529	6.80	69	76		84
Mean	1872	38.33	622	9.04	524	6.93	66	76	77	82
									71	

reference ones. On the other hand, slope and offset values of the Poly-3 algorithm were not close to 1 or 0. The average values of slope and offset obtained from the Poly-3 algorithm were 0.92 and 13.40, whereas those obtained from the DDC algorithm were 1 and 0.14. The residuals from the DDC algorithm was smaller than the Poly-3 algorithm and uncorrected image. This showed that the DDC algorithm corrected colour information better than the Poly-3 algorithm. Moreover, the DDC algorithm is very suitable for a mobile device since it is simple enough to implement using a Look Up Table (LUT) technique from the device profile function.

3. Methodology and performances

In this section, two proposed algorithms in an OER determination scheme are described. The first algorithm aims to classify palm fruit into three groups of different ripeness degrees. The second algorithm was devised to predict the OER. In this paper, only the palm fruit *var. Negrescens Tenera* is of interest due to its high oil production and because it is the most cropped palm in the main palm oil producing countries, which include Malaysia, Thailand, and Indonesia.

3.1. Colour characteristics of oil palm

In this subsection, we describe the colour characteristics of oil palm fruit, which is related to the fruit ripening mechanism. The issue of the natural pigment of palm fruit will be discussed first, followed by the colour information of the HSV

colour model of oil palm fruit, which represents colour in a visible spectrum (Forsyth & Ponce, 2002; Gonzalez, Woods, & Eddins, 2003).

One of the basic roles of organisms is to provide attractive colours for leaves, flowers, fruits, vegetables, and skin (on animals) by natural pigments (Delgado-Vargas, Jiménez, & Paredes-López, 2000). The principal pigments that produce colour in oil palm are chlorophyll, carotenoids and anthocyanins (Edem, 2002; Mortensen, 2006; Tan et al., 2010). Principally, Chlorophyll is a green pigment used in the photosynthesis process. It absorbs light in the range of approximately 430 and 670 nm (Mortensen, 2006; Tan et al., 2010). Carotenoids, a yellow-orange-red pigment, can extract to become hydrocarbon compound carotenes such as α - and β -carotenes (Mortensen, 2006). Anthocyanins have mainly blue-purple-red pigments depending on the pH value of the oil palm (Wrolstad, Durst, & Lee, 2005). In oil palm fruit, anthocyanin is mixed with flavonoids and produces yellowish-orange pigments (Delgado-Vargas et al., 2000; Hazir, Shariff, & Amiruddin, 2012) absorbing visible light in the spectrum of 530 nm (Tan et al., 2010).

From the unripe to fully-ripe stage as shown in Fig. 5(a)–(c), carbohydrates gradually decrease, while glyceride acid increases (Luengarpapong, 1980). By observation, unripe fruit which contain chlorophyll and anthocyanins absorb visible lights in the spectrum of 430, 530 and 670 nm so the colourant of unripe palm fruit looks dark (Tan et al., 2010). For the under ripe to fully-ripe stage, the quantity of chlorophyll decreases along with the anthocyanins and flavonoids, so the palm fruit reflects a yellow to reddish-orange colour as the result of the

Table 2 – Colour correlations between reference and uncorrected-corrected colours.

Device		Uncorrected			Poly-3 algorithm			DDC algorithm		
		Slope	Offset	Residual	Slope	Offset	Residual	Slope	Offset	Residual
T	sR	1.56	−2.47	77.86	0.96	5.96	75.22	1.00	0.18	77.24
	sG	1.28	18.67	58.18	0.95	7.92	56.62	1.00	0.46	57.74
	sB	1.2	−30.74	78.28	1.09	−14.24	80.09	1.00	0.08	76.88
N	sR	1.05	39.22	73.88	0.92	14.38	81.51	1.00	0.11	68.76
	sG	0.79	54.22	61.62	0.76	37.15	65.6	1.00	−0.03	60.95
	sB	0.8	5.78	81.1	1.05	−8.58	75.64	1.00	0.11	75.43
X	sR	1.27	48.38	72.38	0.86	23.86	94.32	1.00	−0.21	71.37
	sG	0.91	68.37	62.24	0.69	49.02	69.5	1.00	0.63	66.53
	sB	0.9	18	82.75	0.96	5.12	79.96	1.00	−0.08	81.92
Mean		1.08	24.38	72.03	0.92	13.40	75.38	1.00	0.14	70.76

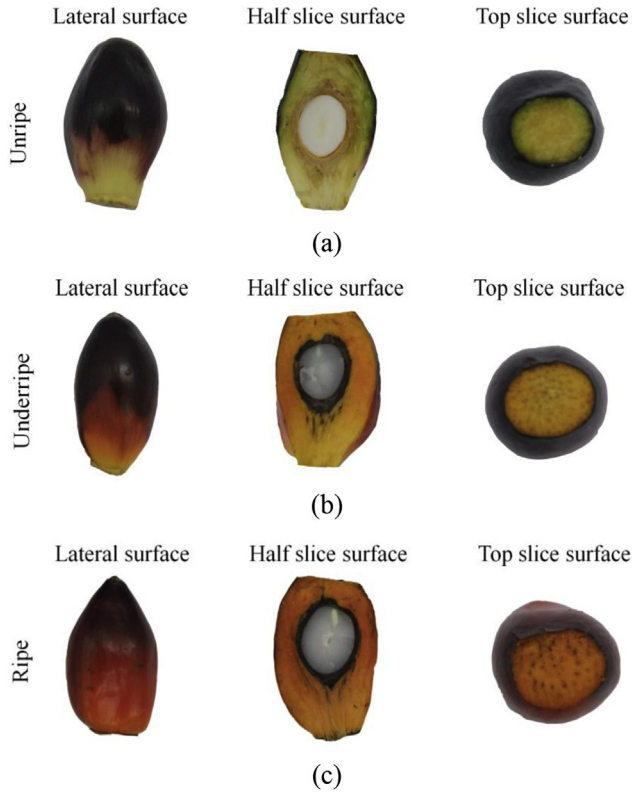


Fig. 5 – Colour of oil palm related to pigments (a) unripe, (b) under ripe, and (c) ripe.

carotenoid quantity (Hazir et al., 2012). The carotenoids cause the colour of the palm fruit to change from yellow to reddish-orange which related to the hue value range of around -10 to 70° (Tan et al., 2010). At the fully-ripe stage, the hue value of palm fruit is very close to zero, which represents a reddish colour.

As mentioned above, hue information is the key colour variable that can indicate the palm quality. This hue information can be extracted from various colour spaces such as HSV, CIELab or CIELuv spaces. The HSV space was chosen due to its general usage. To make the implementation simple as well as accurate, we proposed to use hue for the classification step while both hue and saturation features were proposed in the OER determination step.

Table 3 – Classification Grades, low, medium and high, for OER.

Grade	L-Grade	M-Grade	H-Grade
OER	30–40	40–50	>50.00

3.2. Ripeness degree classifier (RDC) and performances

In this subsection, a ripeness degree classifier (RDC) for oil palm is presented. The selected features from images of each fruit shown in Fig. 6 will be discussed, followed by the classification process.

As shown in Fig. 6, a lateral surface of the palm fruit, which was captured under a light-controlled box, was divided into 20 subsections ($k = 20$) and the mean hue value for all subsections, called a lateral hue, was calculated from the digital image. The lateral hue of 45 postharvest fruit samples (*var. Negrescens Tenera*, *Suratthani-2*) of different ripeness conditions (15 samples for each class) were applied to classify the samples into three fruit grades. These three grades were related to the OERs obtained from the Soxhlet extraction (ISO9001:2008) as shown in Table 3. The RDC algorithm based on a two-layer feedforward neural network (Hagan & Menhaj, 1994) (a hidden and an output layer), shown in Fig. 7, was chosen for the classification algorithm.

The hidden layer of the RDC was formed with h neuron nodes as shown in Fig. 7. There are three output nodes in the output layer. These three outputs were applied to the output layer to classify the ripeness degree of the fruit, which includes low OER (L-Grade), medium OER (M-Grade), and high OER (H-Grade). The classifier output, y , was chosen based on the “winner-take-all” technique. The variables a^1, a^2 and y are defined as shown below,

$$a^1 = f^1(W^1p + b^1), \quad (7)$$

$$a^2 = f^2(W^2a^1 + b^2), \quad (8)$$

$$y = \text{index}(\max\{a^2\}), \quad (9)$$

where f^1 and f^2 are the sigmoid function vectors, p is the input feature vector, W^1 and W^2 are the weighting coefficient matrixes of the hidden and output layers, b^1 and b^2 are the bias vectors of the hidden and output layers, and a^1 and a^2 are the output vectors of the hidden and output layers. Weighting

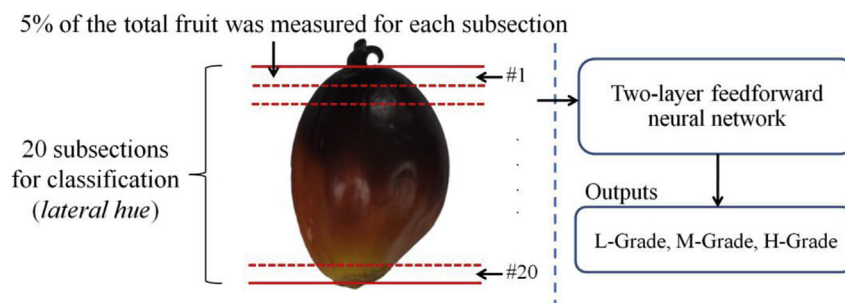


Fig. 6 – Image subsections (conceptual) of oil palm for classification.

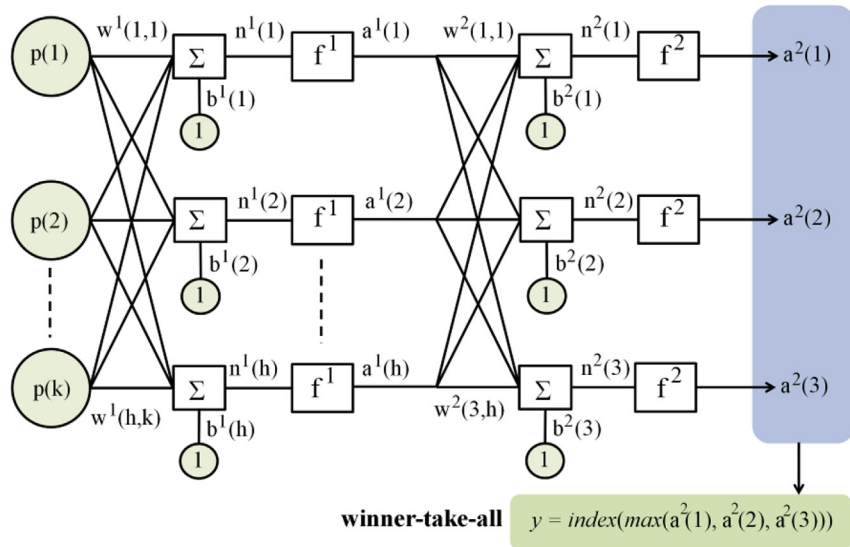


Fig. 7 – Neural network structure for oil palm classification.

coefficient matrixes (W^1 and W^2) and bias coefficient vectors (b^1 and b^2) in the hidden and output layers were calculated from the scaled conjugate gradient (SCG) backpropagation training process by using the neural network pattern recognition tool (nprtool) in MATLAB® R2013a (MathWorks, Natick, MA). The output of the RDC indicating the ripeness degree of the fruit was obtained from the index of the maximum value from the three output nodes in the output layer. The value of y was subsequently applied to the OER determination algorithm.

The optimum network for this application was obtained by investigating the network performance with several h nodes starting from 15 nodes and incrementing in steps of 5 until reaching 40 nodes. According to the suggestion by Furferi et al. (2010), the mean square error (MSE) was used for monitoring the network performance during the training process based on the SCG algorithm. The optimum network was obtained with $h=30$ nodes for its lowest complexity and lowest MSE.

To test the performance of our classification algorithm, 64 untrained samples were chosen, that is all 64 samples had not been included in the sample used to train the algorithm. The classification algorithm provided classification results without error.

3.3. OER determination algorithm and performances

To make the computation simple, an OER determination algorithm for oil palm was proposed using a regression function. Again the lateral hue values of 45 palm fruit samples previously applied in the classification process were used to develop the feature for a determination algorithm. The spatial mean of the lateral hue and saturation values of each fruit section was computed. In this OER determination algorithm, the hue and saturation of each whole fruit which was captured from light-controlled box was computed by averaging the spatial mean of 20 lateral sections. Figure 8 shows the plots for the whole-fruit hue and saturation values of 45 palm fruits and their OERs, which were 30–73%. Large variations of hue and saturation values ranging from -54 to 89° and 0.32 – 0.81 were obtained, respectively. This large variation caused some difficulties to model an OER hue-saturation function for a determination algorithm. Consequently, using the hue and saturation values from the whole fruit was not suitable to model an OER function.

Rather than using hue and saturation values from the whole fruit, some specific areas of the palm fruit were investigated to obtain smaller hue and saturation variation to relate

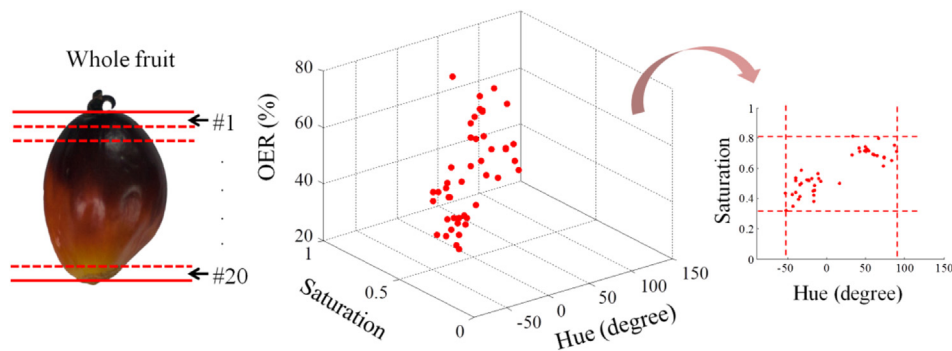


Fig. 8 – OER versus the hue-saturation values (whole fruit) of 45 samples.

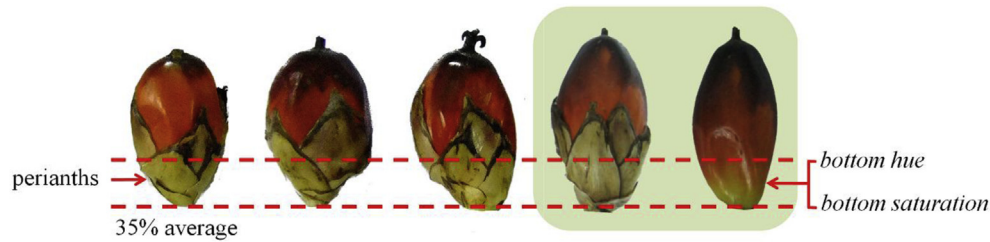


Fig. 9 – Oil palm with and without perianths.

with the OER. The first investigation was obtained by averaging spatial means of lateral hue and saturation values over a) section #1–#13 (called *top hue and saturation*) and b) section #14–#20 (called *bottom hue and saturation*). The *bottom hue and saturation* are the hue-saturation information of the fruit area under the perianths, which normally covers around 35% of the whole fruit. These perianths protect the fruit from various hazardous environments such as light and rain as shown in Fig. 9. The second investigation used the spatial mean of the *bottom hue and saturation* only.

The spatial means of the *top hue and saturation* and *bottom hue and saturation* of 45 fruit samples were plotted against

OERs in Fig. 10(a) and (b), respectively. The *bottom hue and saturation* provides smaller variation than the *top hue and saturation*. This is expected because the perianths protect the bottom area of the palm fruits from the external environment. Since smaller hue and saturation variation offers a simpler mathematical model, we decided to select the feature obtained from the *bottom hue and saturation* to formulate a mathematical function for an OER determination algorithm.

The *bottom hue and saturation* shown in Fig. 10(b) was applied to model the OER function regarding three fruit grades as described in Table 3. We found that each grade was well

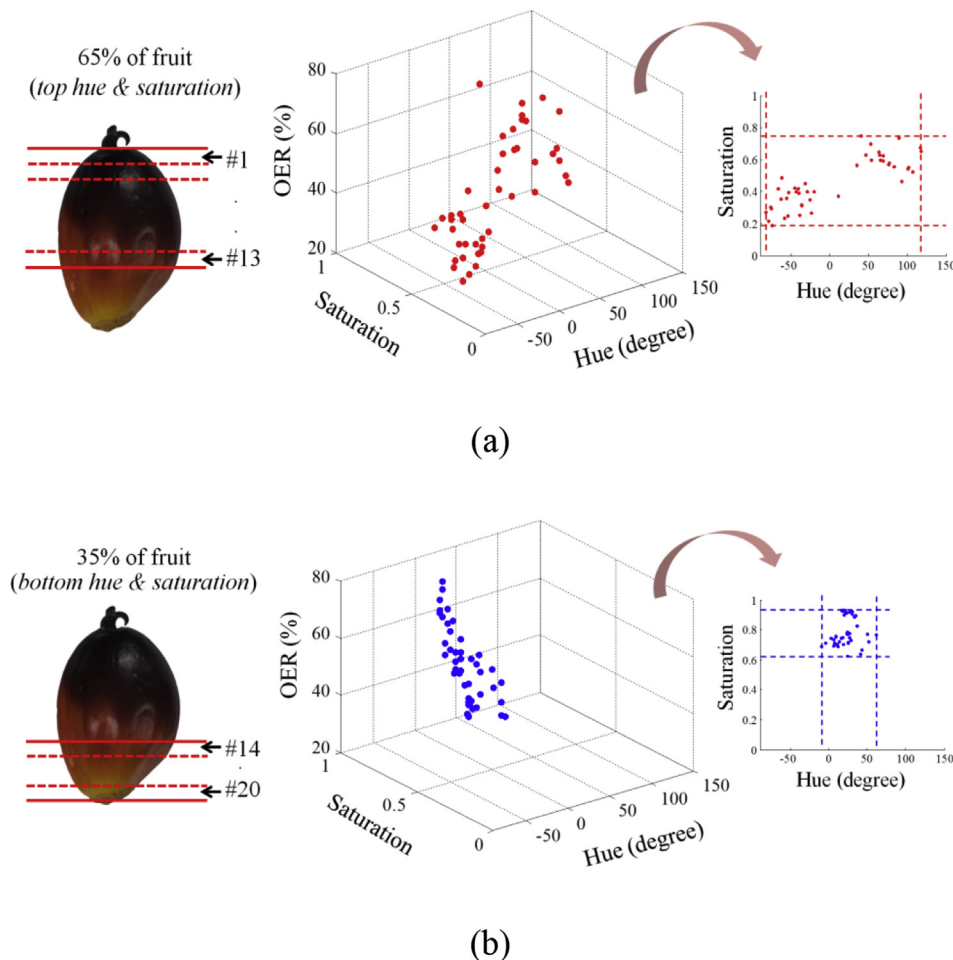


Fig. 10 – OER and spatial mean of the hue and saturation for 45 samples (a) *top hue and saturation*, (b) *bottom hue and saturation*.

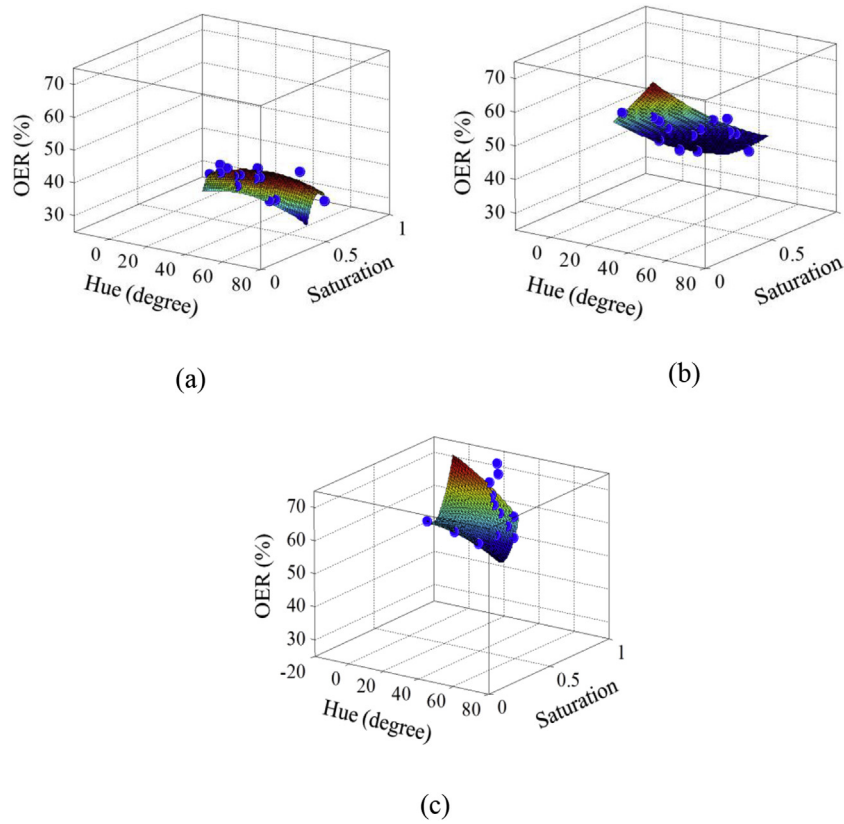


Fig. 11 – OER and means of bottom hue and saturation for each class (a) L-Grade, (b) M-Grade and (c) H-Grade.

characterised with a cubic function as shown in Fig. 11. The mathematical model for determining the OER is defined in Eq. (10).

$$OER = p_{00} + p_{10}H_{ave} + p_{01}S_{ave} + p_{20}H_{ave}^2 + p_{11}H_{ave}S_{ave} + p_{02}S_{ave}^2, \quad (10)$$

where H_{ave} is the average hue value of the bottom hue, and S_{ave} is the average saturation value of the bottom saturation. As shown in Fig. 12, our proposed prediction algorithm has three OER prediction functions (prediction vectors) for three different ripeness degrees. The ripeness degree obtained from the RDC indicates which OER prediction function should be applied. From the average value of the

bottom hue and bottom saturation of an unknown OER palm fruit, its OER value can be predicted. The prediction vector coefficients of three functions are shown in Table 4.

To evaluate the performance of the determination algorithm, another 64 fruit samples were applied to the OER prediction algorithm. The fitting functions of the bottom hue and saturation data were related to the OER with the polynomial function given in Eq. (10). The performance of the algorithm proposed to determine the OER is summarised in Table 5. The prediction algorithm achieved an average error of an OER of 2.20. In summary, we strongly believe that the performance of the proposed prediction algorithm and its simplicity can be readily implemented on a mobile device.

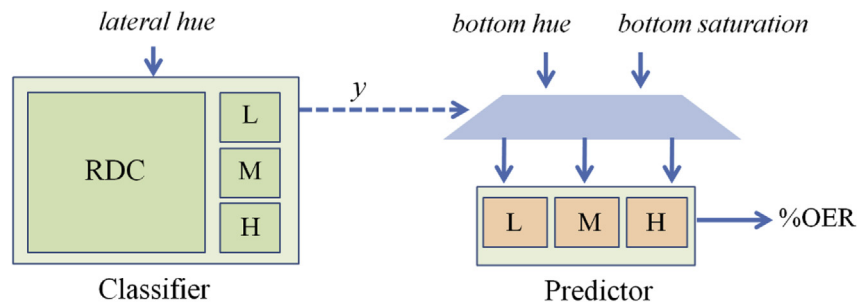


Fig. 12 – Proposed OER prediction algorithm.

Table 4 – Prediction vector coefficients.

Grade	Coefficients					
	p_{00}	$p_{10} \times 10^{-2}$	p_{01}	$p_{20} \times 10^{-4}$	$p_{11} \times 10^{-2}$	p_{02}
L	−433.40	−34.83	1322.00	−45.12	90.35	−937.70
M	47.81	6.68	−17.49	27.30	−35.41	23.22
H	408.10	80.54	−923.80	−35.70	−117.70	602.60

Table 5 – Oil Content Prediction Results of 64 fruit samples.

Average error (OER)			
L Grade	M Grade	H Grade	All Grades
1.38	1.30	2.81	2.20

4. Mobile device implementation

In this section, we present the implementation of the OER scheme on a mobile device. All proposed algorithms in the scheme were implemented based on open source platforms which include OpenCV, a Java Matrix Package (JAMA) and Android. This allowed our scheme to be applicable on several mobile devices.

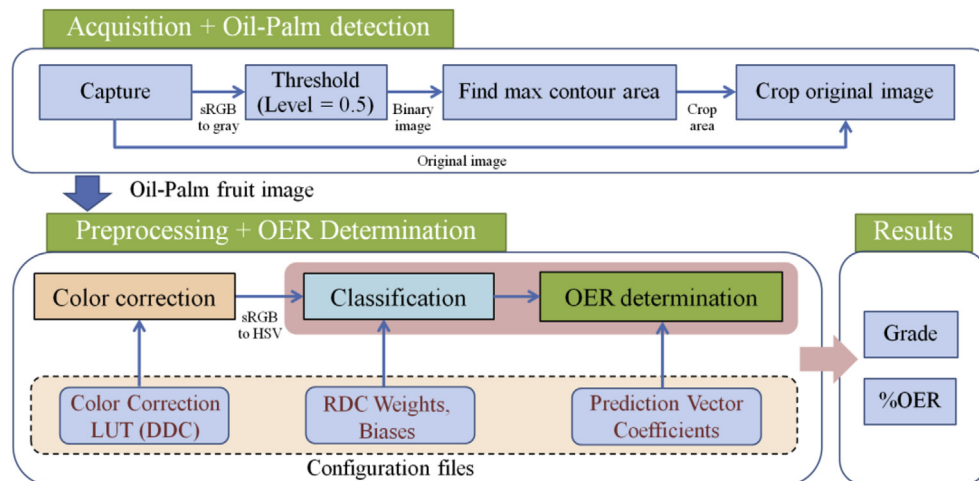
For the proposed mobile based OER determination algorithm, the image processing algorithm was run on an OpenCV core, while the JAMA core supported mathematical processing. A graphical user interface via a touch screen LCD was developed on an Android platform. For our implementation as shown in Fig. 13, the acquisition, oil palm detection, pre-processing, and OER determination processes were programmed using OpenCV. For image acquisition and detection processes, an image was automatically captured on a white background in a light-controlled box as explained in Section 2.2. The contour of the palm fruit was determined with a threshold level at 0.5. The image of the palm fruit was subsequently cropped to only the biggest contour area of the image scene.

The JAMA core was used to compute the device profile function and operate the least square technique for regression analysis. Two speed optimisers were employed in the system. Single Instruction, Multiple Data (SIMD) was applied to reduce computation time (Pulli, Baksheev, Korniyakov, & Eruhimov, 2012). The matrix computation can perform faster on SIMD processor types such as ARM11 architecture. The second speed optimiser was implemented for a device profile function in the form of an LUT for the colour correction process. The mapping function results were stored in arrays for correcting colours of fruit images to considerably simplify the computation task.

For implementing classification algorithms for palm fruit, neural network weights, biases and prediction vector coefficients were stored in a configuration file. The user interface of a mobile device which installed the software is shown in Fig. 14(a). Figure 14(b)–(d) shows the functions of image acquisition, colour correction and OER determination.

To evaluate the performance of the OER determination system on a mobile device, our proposed experiment was conducted on a Samsung Galaxy Note (ARM Cortex A9 Dual Core 1.4 GHz, 1 GB of RAM). The image resolution was 2048×1536 pixels in ARGB-8888 format. The speed performances of the system implemented on a mobile device based on a conventional iteration approach and using two speed optimisers proposed in this paper are shown in Table 6.

In our implementation, the overall process based on SIMD and LUTs took only 395 ms, which is sufficient for real-time application. It is 91.12 times faster than a calculation based on iteration. However, this does not include other operation time such as file operation or image acquisition time. The overall computation time can be changed depending on other

**Fig. 13 – Block diagram of mobile OER determination system.**

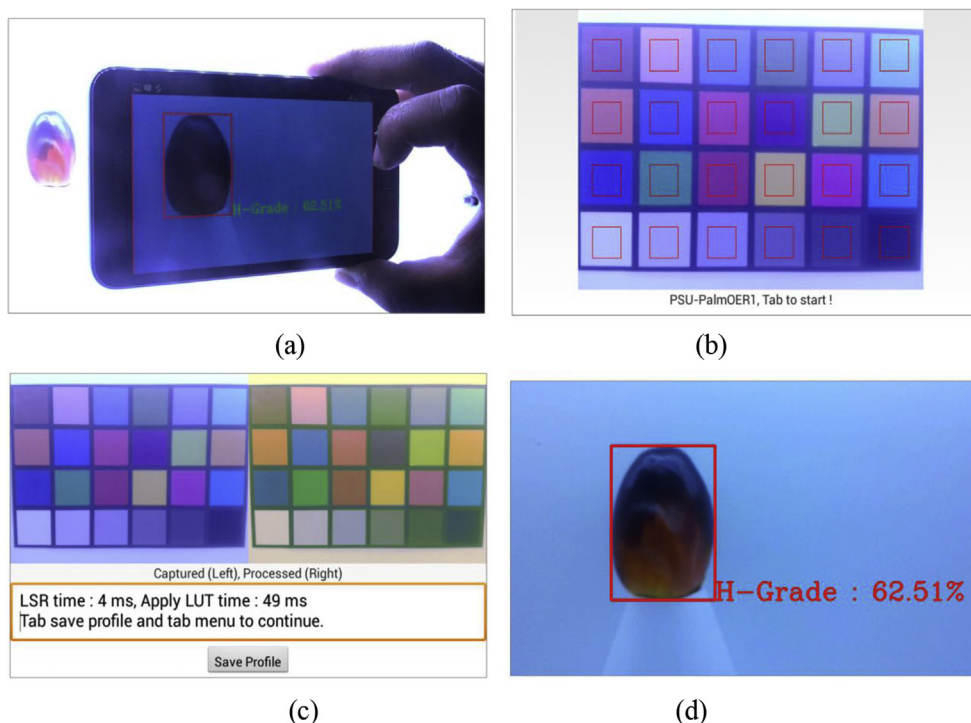


Fig. 14 – Functions of the mobile OER determination system: (a) graphical user interface, (b) image acquisition, (c) colour correction, (d) OER determination.

factors. We strongly believe that our method is very appropriate for several practical applications. In addition, our method can also be applied to portable computing devices in practice. In the future, we are going to improve our application for using the colour correction algorithm outdoors with automatic intensity correction for daylight.

5. Conclusion

A simple non-destructive method for classifying and predicting oil content of oil palm from hue and saturation features has been presented. The determination scheme has three main algorithms for colour correction, classification and OER prediction processes. The colour correction algorithm proposes to correct image colour from the effects of device-dependence in an sRGB colour model with a 71% and 82% sRGB Euclidian distance and colour difference reduction rate, respectively. The classification process based on a two layer feed-forward neural network was developed by using features from the hue values on an oil-palm surface, while the OER determination process

was developed by using a polynomial regression model based on the hue and saturation features of the fruit bottom. The measurement system was applied and tested under indoor conditions (in a light-controlled box) with several oil palm fruit samples. Our experiment was also compared with the Soxhlet extraction measurement. The results demonstrated that the proposed method was able to classify correctly and determine the OER with 1.38 OER for L-Grade (30–40%), 1.30 OER for M-Grade (40–50%), 2.81 OER for H-Grade (more than 50%), and 2.20 OER error for all grades. Finally, the oil content determination scheme implemented on a mobile system was conducted with an average speed of 395 ms.

Acknowledgement

This research is financially supported by the Thai Research Fund and Prince of Songkla University under the Royal Golden Jubilee Ph. D. Program No. PHD/0046/2552, TRF research career development grant number RSA5680056, and Prince of Songkla University grant number ENG540598S. We would like to acknowledge all valuable suggestions and comments from the anonymous reviewers and editor to improve this work.

REFERENCES

Abbas, Z., Yeow, Y. K., Shaari, A. H., Khalid, K., Hassan, J., & Saion, E. (2005). Complex permittivity and moisture

Table 6 – Performances of the mobile OER determination system.

Calculation method	Process time (ms)		Total
	Preprocessing	RDC&OER determination	
Iteration	35,800	194	35,994
SIMD + LUTs	215	180	395

- measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor. *IEEE Sensors Journal*, 5(6), 1281–1287.
- Abdullah, M. Z., Guan, L. C., Mohamed, A. M. D., & Noor, M. A. M. (2002). Color vision system for ripeness inspection of oil palm *elaeis guineensis*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 26(3), 213–235.
- Abdullah, M. Z., Guan, L. C., & Mohd Azemi, B. M. N. (2001). Stepwise discriminant analysis for colour grading of oil palm using machine vision system. *Food and Bioproducts Processing*, 79(4), 223–231.
- Alfatni, M. S. M., Shariff, A. R. M., Shafri, H. Z. M., Saaed, O. M. B., & Eshanta, O. M. (2008). Oil palm fruit bunch grading system using red, green and blue digital number. *Journal of Applied Sciences*, 8(8), 1444–1452.
- BabelColor. (2012). *The BabelColor Company*. Quebec: Canada. ColorChecker URL http://www.babelcolor.com/main_level/ColorChecker.htm. Last accessed on 10.11.14.
- Balasundram, S. K., Robert, P. C., & Mulla, D. J. (2006). Relationship between oil content and fruit surface color in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Plant Sciences*, 5(3), 217–227.
- Barnard, K., Martin, L., Coath, A., & Funt, B. (2002). A comparison of computational color constancy algorithms. II. experiments with image data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 11(9), 985–996.
- Chiu, L. C., & Fuh, C. S. (2010). Calibration-based auto white balance method for digital still camera. *Journal of Information Science and Engineering*, 26(2), 713–723.
- Delgado-Vargas, F., Jiménez, A. R., & Paredes-López, O. (2000). Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains — characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(3), 173–289.
- Edem, D. O. (2002). Palm oil: biochemical, physiological, nutritional, hematological and toxicological aspects: a review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 57(3), 319–341.
- Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2002). *Computer vision: A modern approach* (1st ed.). Prentice Hall.
- Furferi, R., Governi, L., & Volpe, Y. (2010). ANN-based method for olive ripening index automatic prediction. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 318–328.
- Gijzen, A., Gevers, T., & Weijer, J. (2011). Computational color constancy: survey and experiments. *IEEE Transactions on Image Processing*, 20(9), 2475–2489.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. (2003). *Digital image processing using MATLAB*. Pearson Prentice Hall.
- Granzier, J. J. M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2009). Can illumination estimates provide the basis for color constancy? *Journal of Vision*, 9(3), 1–11.
- Hagan, M. T., & Menhaj, M. B. (1994). Training feedforward networks with the marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), 989–993.
- Hazir, M. H. M., Shariff, A. R. M., & Amiruddin, M. D. (2012). Determination of oil palm fresh fruit bunch ripeness—based on flavonoids and anthocyanin content. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 466–475.
- Hsu, E., Mertens, T., Paris, S., Avidan, S., & Durand, F. (2008). Light mixture estimation for spatially varying white balance. *ACM Transaction on Graphics*, 27(3), 70:1–70:7.
- Huo, J., Chang, Y., Wang, J., & Wei, X. (2006). Robust automatic white balance algorithm using gray color points in images. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 52(2), 541–546.
- Junkwon, P., Takigawa, T., Okamoto, H., Hasegawa, H., Koike, M., Sakai, K., et al. (2009). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of internal qualities for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq. var. *tenera*). *Agricultural Information Research*, 18(3), 130–141.
- Lam, E. Y. (2005). Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography. In *Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics* (pp. 134–139). IEEE.
- Lee, D. J., Archibald, J. K., & Xiong, G. (2011). Rapid color grading for fruit quality evaluation using direct color mapping. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(2), 292–302.
- Liu, Y. C., Chan, W. H., & Chen, Y. Q. (1995). Automatic white balance for digital still camera. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 41(3), 460–466.
- Luengarpapong, P. (1980). *Oil Palm* (1st ed.). Department of Plant Science, Prince of Songkla University.
- Mortensen, A. (2006). Carotenoids and other pigments as natural colorants. *Pure and Applied Chemistry*, 78(8), 1477–1491.
- Palapol, Y., Ketsa, S., Stevenson, D., Cooney, J. M., Allan, A. C., & Ferguson, I. B. (2009). Colour development and quality of mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) fruit during ripening and after harvest. *Postharvest Biology and Technology*, 51(3), 349–353.
- Pamornnak, B., Limsirorattana, S., & Chongcheawchamnan, M. (2013). Oil extraction rate determination technique based on dielectric constant of palm fruit. *Applied Mechanics and Materials*, 498–501.
- Park, T. Y., Lee, M. Y., Kim, J. M., & Ha, Y. H. (2005). Design and implementation of digital photo kiosk system with auto color-correction module. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 51(4), 1067–1073.
- Pulli, K., Baksheev, A., Korniyakov, K., & Eruhimov, V. (2012). Real-time computer vision with OpenCV. *Communication of the ACM*, 55(6), 61–69.
- Razali, M. H., Wan Ismail, W. I., Ramli, A. R., Sulaiman, M. N., & Harun, M. H. (2009). Development of image based modeling for determination of oil content and days estimation for harvesting of fresh fruit bunches. *International Journal of Food Engineering*, 5(2).
- Razali, M. H., Wan Ismail, W. I., Ramli, A. R., Sulaiman, M. N., & Harun, M. H. (2011). Prediction model for estimating optimum harvesting time of oil palm fresh fruit bunches. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9, 570–575.
- Rennick, G., Attikiouzel, Y., & Zaknich, A. (1999). Machine grading and blemish detection in apples. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications* (Vol. 2, pp. 567–570). IEEE.
- Slaughter, D. C., Crisosto, C. H., & Tiwari, G. (2013). Nondestructive determination of flesh color in clingstone peaches. *Journal of Food Engineering*, 116(4), 920–925.
- Suwannarat, S., Khaorapapong, T., & Chongcheawchamnan, M. (2012). Prediction of oil content in fresh palm fruit based on an ultrasonic technique. *Kasetsart Journal Natural Sciences*, 46(2), 318–324.
- Tan, Y. A., Low, K. W., Lee, C. K., & Low, K. S. (2010). Imaging technique for quantification of oil palm fruit ripeness and oil content. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(8), 838–843.
- Wang, X., & Zhang, D. (2010). An optimized tongue image color correction scheme. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(6), 1355–1364.
- Westland, S., Ripamonti, C., & Cheung, V. (2012). *Computational colour science using MATLAB*. Wiley.
- Wrolstad, R. E., Durst, R. W., & Lee, J. (2005). Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science & Technology*, 16(9), 423–428.
- Yee, L. K., Abbas, Z., Jusoh, M. A., Yeow, Y. K., & Meng, C. E. (2011). Determination of moisture content in oil palm fruits using a five-port reflectometer. *Sensors*, 11(4), 4073–4085.
- Yeow, Y. K., Abbas, Z., & Khalid, K. (2010). Application of microwave moisture sensor for determination of oil palm fruit ripeness. *Measurement Science Review*, 10(1), 7–14.

Complex Permittivity of Fully Ripe Palm Fruit and Its Application for Microwave Heating

K. Pongsuwan, B. Pamornnak and M. Chongcheawchamnan

Prince of Songkla University
Department of Computer Engineering
Songkhla, 90112, Thailand

and C. Tongurai

Prince of Songkla University
Department of Chemical Engineering
Songkhla, 90112, Thailand

ABSTRACT

This paper presents the frequency and temperature-dependence complex permittivity ($\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$) of three layers (the mesocarp, shell and kernel) in palm fruit *var. Tenera*. The complex permittivity was measured and reported at frequencies between 0.5–6 GHz from 10–70°C. Dominated by the frequency characteristic of free water in these three layers, the ϵ' and ϵ'' decreased significantly with the increase in temperature at the measured frequencies. The temperature characteristic of ϵ at 2.45 GHz was investigated. It was found that ϵ' , ϵ'' and the loss tangent for the mesocarp layer were higher than those of the kernel and shell layer. This was especially so for the loss tangent case; this means that the mesocarp layer can absorb microwave energy and convert it to heat more readily than the other two layers. The penetration depth, D_p , for each layer at 2.45 GHz between 10–70°C was computed and confirms volumetric heating does occur in all three layers. Temperature-dependence models for ϵ of all three layers at 2.45 GHz were formulated by applying regression analysis to the measured ϵ with a 95% confidence interval. The three models were applied to form a multilayer concentric model for palm fruit and can be applied for microwave heating. The temperature distribution profiles in the palm fruit predicted from the model and the experimental results showed good agreement.

Index Terms —Complex permittivity, dielectric constant, loss tangent, penetration depth, microwave, electric field, heating, energy.

1 INTRODUCTION

A heating process for palm fruit is dispensable for oil production[1] since it was reported that if palm fruit is heated to 70 °C, the lipase enzyme action mechanism in the palm fruit will be inhibited and the extracted oil will be of high quality (low free fatty acid) [2]. Generally a hot-air technique has been applied for heating palm fruit, however, its energy efficiency is low. In past decades, a microwave heating technique was proposed to replace this energy-inefficient hot-air technique [3, 4]. The microwave heating technique provides more energy-efficiency and heats more rapidly. Unlike the hot-air technique, a heating mechanism using the microwave technique is

characterized as dielectric heating. The complex permittivity of palm fruit (ϵ) is very important for determining microwave power absorption, penetration depth and the temperature distribution profile in palm fruit. Therefore, if ϵ of all fruit layers are known, a dielectric model for palm fruit can be developed. The dielectric model is very important for designing energy-efficient microwave heating system [5–8].

Many research works reported the ϵ of palm fruit at different frequencies. In [9], ϵ and the penetration depth of palm-fruit layers of biological substances at 915 and 2450 MHz were reported. The ϵ of the abscission layer of a palm bunch and the mesocarp layer of palm fruit at frequency range of 0.2 to 20 GHz was investigated and applied to study the stripness efficiency in the microwave heating process [4]. It was shown that only frequency characteristics of the ϵ were investigated. There has not

been any investigation reported on the temperature characteristics of the ϵ of palm fruit, which is one of the most important keys to accurate predicting the temperature profile in palm fruit.

There is a need to know the temperature- as well as the frequency-dependent characteristics of ϵ of palm fruit to design a highly efficient microwave heating system. The ϵ of palm layer (*var. Tenera*) as a function with temperature and frequency is of interest. In this paper, we present-

- the frequency and temperature characteristics of ϵ for each layer from 0.5-6 GHz from 10 to 70 °C,
- a development on a temperature-dependence multilayer concentric model based on the measured ϵ at 2.45 GHz and its application for microwave heating.

2 MEASUREMENT SETUP AND COMPLEX PERMITTIVITY

2.1 MEASUREMENT SETUP

All palm fruit samples in this paper were obtained from various local areas in Songkhla province, Thailand. The palm fruit *var. Tenera* was adopted for this study since it produces the most oil in comparison to other varieties of palm fruit. Eight year old palm fruit [10] were cut from several palm trees for experiment use within 24 hours. According to AOAC (1995) standards [11], moisture content of 102 ripe palm fruits were measured using a digital balance (0.1 g uncertainty). The values of moisture content in percentage (wet basis) of these fruits ranged from 27.8 to 33.1, while the statistical mean and the standard deviation are 30.8 and 2.3, respectively.

Samples of three layers from the palm fruit (kernel, shell, and mesocarp) were prepared by chopping them in to very small pieces. The exocarp layer was not of interest in this paper because only a very small interaction to the applied electromagnetic field exists for the negligible thickness of this layer. In preparing a semi-solid sample as shown in Figure 1, each sample layer of 30 ml was contained in a 50 ml beaker. Each sample was compressed firmly to reduce air pores between sample particles before complex permittivity measurement was performed.

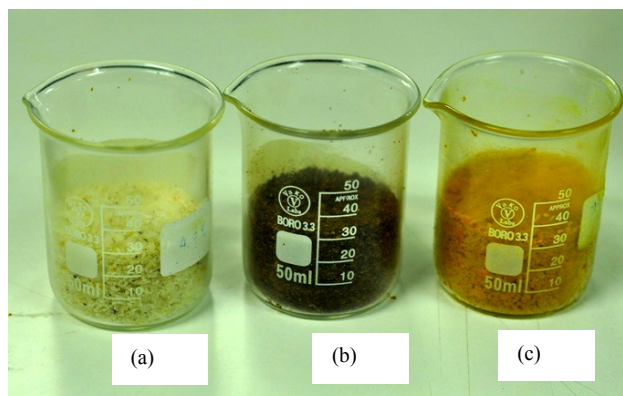


Figure 1. Prepared samples of (a) kernel, (b) shell and (c) mesocarp layers.

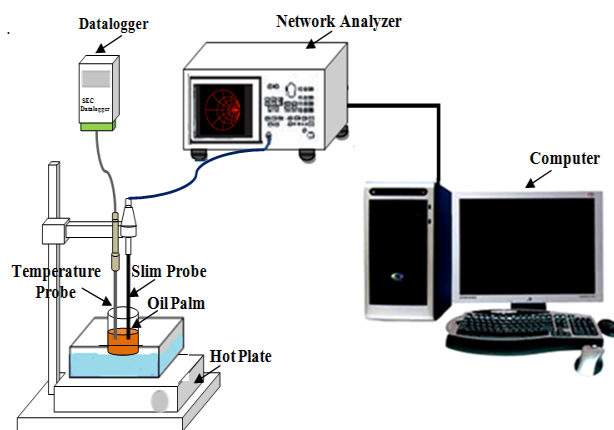


Figure 2. Schematic diagram of measurement setup.

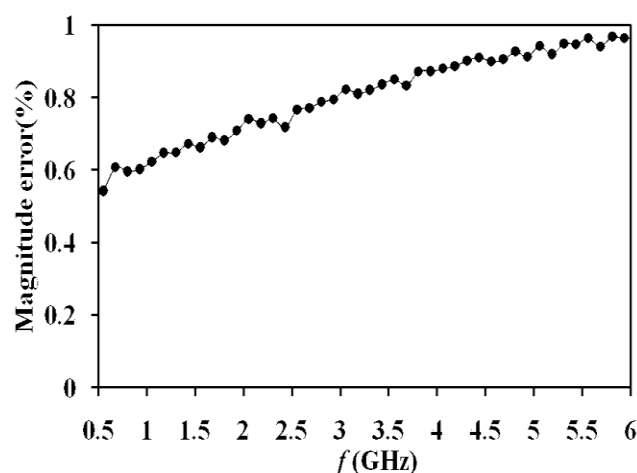


Figure 3. Magnitude error of distilled water measured at 27 °C compared with the theoretical data.

In this study, the values of ϵ for the three layer samples from 0.5 to 6 GHz were investigated since this frequency range is applicable for a low-cost heating application. In the experiment, the temperature range of 10 to 70°C was chosen to cover 55°C, the most suitable temperature to dissolve Lipase enzyme in palm fruit [2].

Figure 2 shows a schematic diagram of the measurement setup. The complex permittivity measurement of each layer sample was performed with a slim form probe (Agilent 85070E) [12] connected to an automatic network analyzer (HP8510C, Santa Clara, USA) via a coaxial cable (HUBER+SUHNER® SUCOFLEX_102) [13]. The operating temperature of the coaxial cable ranges from -55 to 165 °C. The slim form probe can be applied to measure from 0.5 to 50 GHz, while its operating temperature is 0 to 125 °C. Before making the measurement, the network analyzer was warmed up for at least 30 minutes. After the analyzers were properly calibrated from the recommendation prescribed in the datasheet [13], the

dielectric probe kit was connected and calibrated using a standard short circuit (series 85070-60004), air, and distilled water from 0.5 to 6 GHz. For measuring the temperature of the sample for each layer, a type-K thermocouple temperature sensor was positioned next to the slim probe and dipped in the sample. The distance between the thermocouple and the probe was 20 mm, in accordance with the recommendation datasheet of the slim probe [13]. To control the sample temperature, the beaker containing the sample was immersed in water at room temperature of 27 °C. Increasing or decreasing the sample temperature was achieved by contact with the hot plate and adding cool water, respectively. The sample temperature was raised from 10 to 70 °C in increments of 10 °C for each of step. At each measuring, a reflection coefficient of the tested layer sample was collected via a GPIB (General Purpose Interface Bus) port to compute ϵ using Agilent dielectric measurement software.

To validate the measurement setup, the measured ϵ of air and distilled water was compared with the theoretical results [14]. The measured ϵ of air at 27 °C is very close to the theoretical data which is around 1. The complex permittivity of distilled water at 27°C was also compared with the theoretical data [15, 16]. Figure 3 shows the percentage magnitude error calculated from these two datasets from 0.5 to 6 GHz. The magnitude errors at all frequencies were less than 0.97%, thus confirming the validity of the measurement setup.

2.2 COMPLEX PERMITTIVITY

Figures 4 and 5 show the frequency characteristics of the dielectric constant, ϵ' , and the dielectric loss factor, ϵ'' , of the three layer samples from 10-70 °C. The complex permittivity data of the kernel, shell and mesocarp layers are plotted in subfigure (a), (b) and (c), respectively. The temperature was stabilized for 5 minutes before recording each complex permittivity data. For each layer sample, 200 permittivity data bins from 0.5-6 GHz were collected at each temperature.

Theoretically, the ϵ data of each layer (kernel, shell and mesocarp layers) depends on the compositions of water, ash, carbohydrates, proteins, and oil. Generally, water is found to exist in the three fruit layers, either in free form or in a loosely defined state called a bound state. Free water is found in capillaries, whereas bound water is physically absorbed to the surface of dry samples. Free water molecules that have a permanent electric moment formed by hydrogen and oxygen atoms can simply polarize to an incident electric field. This moment is usually termed a dipole moment. For free water, each molecule is forced to align with the applied field at the rate determined by the electric field frequency. On the other hand, bound water does not align to the applied field as freely as free water.

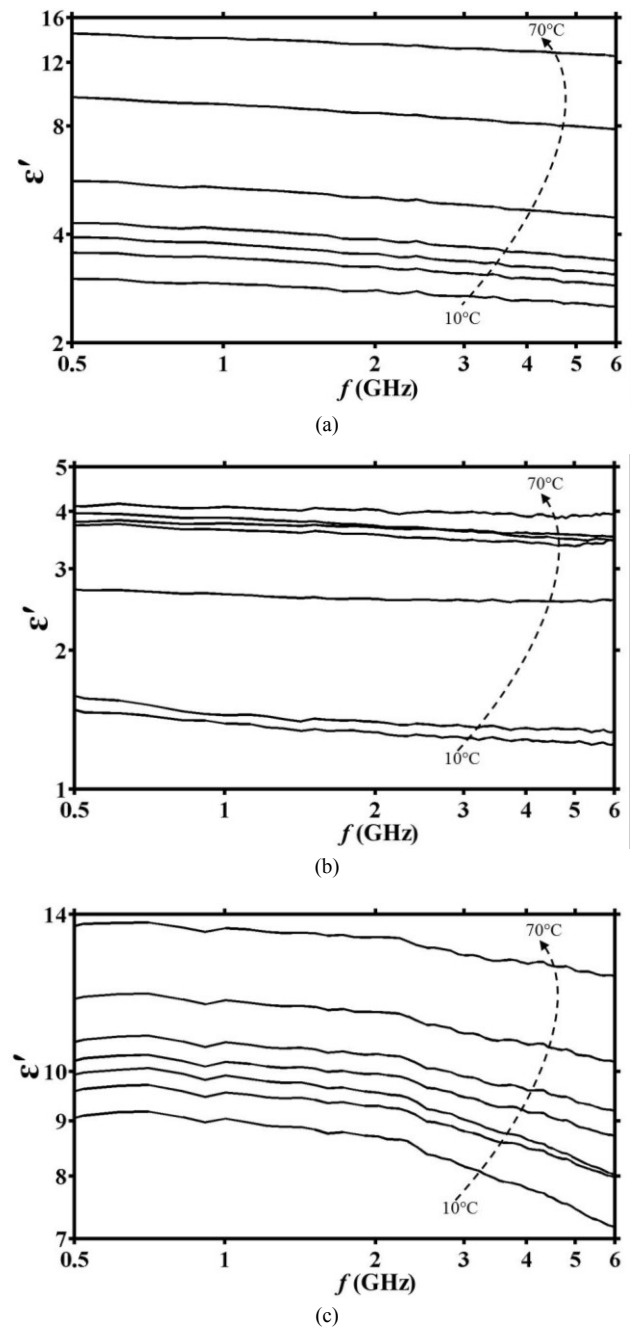


Figure 4. Measured ϵ' of the (a) kernel, (b) shell and (c) mesocarp layer in 10 °C step.

This is because bound water is physically bonded to other strong energy bonding molecules such as protein, carbohydrates, etc. The aligning capability of molecules to an applied electric field can be described with ϵ' . The data of ϵ' for each layer shown in Figure 4 was taken from its components. The characteristic of ϵ' is dominated by free water molecules. Also the amount of heat generated in each layer is related to its ϵ'' . This heat is generated from material loss during free and bound water molecule orientations. Since the relaxation process of bound water occurs below the microwave frequencies, its contribution is minimal for microwave heating application.

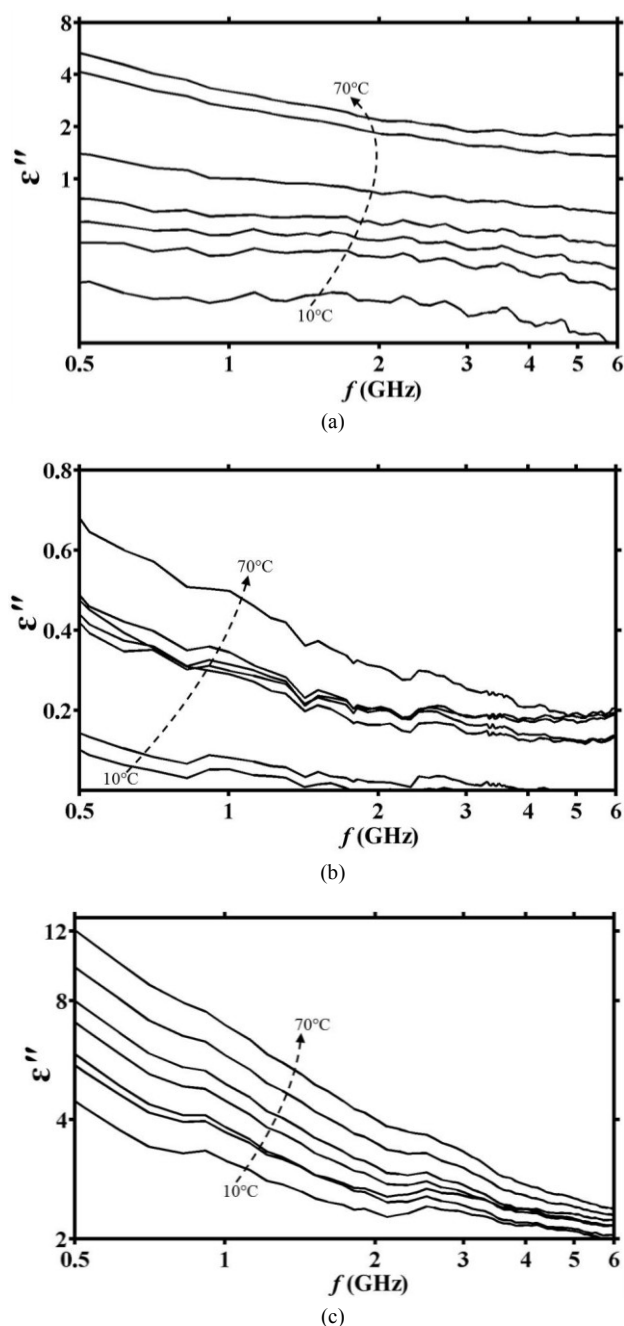


Figure 5. Measured ϵ'' of the (a) kernel, (b) shell and (c) mesocarp layer in 10 °C step.

Figures 4 and 5 show that the measured ϵ' and ϵ'' of the three layer samples are frequency and temperature dependence parameters. We can observe in Figure 4 that the characteristics of ϵ' for all layer samples are inversely proportional to frequency as well as temperature because the polarization process in this frequency region is dominated by the dipolar orientation process of water. As free water molecules play a dominant role in orientation polarization, the frequency dispersion of ϵ' is therefore governed by the frequency characteristic of water in the three layer samples. When the temperature increases, then ϵ' , which relates to the ability of water molecules to align with the applied electric field, decreases.

Figure 5 shows that the slope of ϵ'' at high temperature decreased more rapidly than those at low temperature. These findings are in accordance with a previous study reported in [4]. In theory, electric conduction and polarization mechanisms (dipole, electronic, atomic and ionic) contribute to ϵ'' [17]. The characteristics of ϵ'' for the three layer samples within the measured frequency range are mainly influenced by two loss mechanisms; ionic and dipole losses. The latter loss results from polarized molecules and is the dominant loss mechanism for microwave frequency [17]. The frequency dispersion characteristic of ϵ'' shown in Figure 5 for different temperatures can be divided into two regions; below 3 GHz and from 3 to 6 GHz. The ϵ'' within the frequency region of 3 to 6 GHz is dominated by the dipole rotation [4, 18]. Below 3 GHz, ϵ'' is influenced by ionic conductivity [19–22]. For any given substance, other factors (composition, shape, stage, etc.) [19, 21–24] also influence the complex permittivity.

3 MEASUREMENT SETUP AND COMPLEX PERMITTIVITY

3.1 COMPLEX PERMITTIVITY AT 2.45 GHz

Figures 6a and 6b show the temperature characteristics of ϵ' and ϵ'' for each layer at 2.45 GHz, respectively. Strong nonlinear characteristics with temperature are evidently shown.

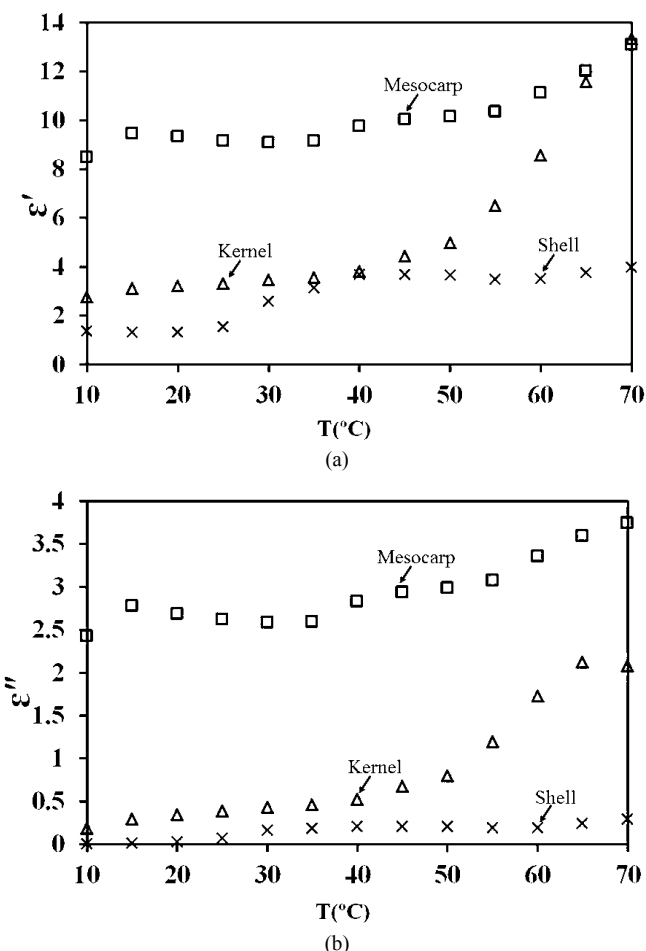


Figure 6. Temperature characteristics of (a) ϵ' and (b) ϵ'' of each layer at 2.45 GHz.

It can be seen from Figure 6a that ε' for each layer increases with temperature because of the dipolar process. The ε' of the mesocarp layer is higher than those of the other two layers, meaning that the capability of electromagnetic energy storage in the mesocarp layer is better than the shell and kernel layers. This confirms the feasibility of applying microwave energy to inhibit the enzyme lipase in the mesocarp layer.

Figure 6b shows that the ε'' of the mesocarp and kernel layer increases with temperature, while for the shell layer it is almost independent. The positive slope of ε'' with increased temperature $\frac{d\varepsilon''}{dT}$ can lead to a phenomenon called thermal runaway, which is a critical concern for microwave heating application. Since we know that incident microwave energy absorbed by any material will convert to heat, witnessed by an increase in temperature, such material which has a positive ε'' slope with increased temperature will face indefinite continuous increase in temperature. This finally results in damage to the material which can appear in several forms including cracks and burns [25]. Avoiding such thermal runaway effects can be achieved by controlling the input microwave power levels appropriately. Small changes in ε'' with increased temperature in the shell layer could be attributed to the balance between the dipole rotation and ionic conduction.

The regression analysis was applied to model the temperature-dependence complex permittivity functions of the three layers. The ε' and ε'' at 10-70 °C (in 5 °C steps) computed from the models were tested with the measured data as shown in Figure 6. From the statistical analysis, the complex permittivity results obtained from the model are consistent with the measured results with a 95% chance of probability.

3.2 LOSS TANGENT

The ratio of ε' and ε'' represents the loss tangent, $\tan \delta$, which is defined as [26],

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1),$$

where δ is the loss angle of the complex permittivity. The loss tangent of any material describes conversion capability of the material to convert microwave energy to heat. When microwave energy incidents on a given material, the temperature of a high loss tangent material will increase more rapidly than a low loss tangent one.

In the illustration in Figure 7, loss tangents as a function of temperature from 10 to 70 °C of the three layers are computed at 2.45 GHz. It is shown that the loss tangent of the mesocarp layer is higher than the other two layers. This means that the mesocarp layer can absorb microwave energy and convert it to heat more readily than the other two layers. In addition, the capability of the mesocarp layer to convert energy to heat is independent of temperature.

3.3 PENETRATION DEPTH

Penetration depth, D_p , a specific parameter for characterizing a material under wave incident, is the depth at which microwave power is decreased to e^{-1} of its value at the surface of the material. D_p can be calculated from the measured ε as shown [27, 28],

$$D_p = \frac{\lambda}{2\pi \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \sqrt{1 + \tan^2 \delta}} \quad (2),$$

where λ is the wavelength in free space. It is shown in (2) that the penetration depth depends on $\tan \delta$, λ and ε' . One can conclude that D_p is not governed only by the material properties but also by the wave parameter λ .

D_p is the optimum size of the material to be heated. If the material has a thickness less than D_p (which is relevant to our case), a resonance is formed due to a combination of forward and reflected waves at the interface between materials with different complex permittivity. In this case, heat will be generated in the material, this is called volumetric heating, and as a result, a highly efficient microwave heating design can be obtained. However, if the material size is several times thicker than D_p , the temperature gradient will be similar to traditional heating. The temperature characteristic of traditional heating contrasts with volumetric heating. For the traditional heating technique, the temperature at the material surface is higher than the internal temperature. In summary, D_p is very important for a microwave heating process design. For example, if the material to be heated with a microwave is very thick, a low-frequency heating system is recommended.

Table 1 shows D_p with temperature for each layer at 2.45 GHz from 10-70 °C. Based on a previous report [29], the thickness values of the three layers are 0.94, 0.34, and 0.2 cm for the mesocarp, kernel and shell layers, respectively. Greater penetration depths at this frequency for other products were reported [22, 23]. When microwave heating at 2.45 GHz is applied to the three layers, as shown in Table 1, the D_p for 10-70°C is considerably greater than the thickness in all three layers. This confirms that volumetric heating at 2.45 GHz can occur in the three layers of palm fruit.

Table 1. Penetration Depth of Each Palm Layer at 2.45 GHz.

T (°C)	Penetration depth (cm).		
	Mesocarp	Kernel	Shell
10	2.36	17.57	1987.08
20	2.23	10.18	85.01
30	2.29	8.45	18.96
40	2.17	7.26	18.32
50	2.10	5.46	18.33
60	1.96	3.32	18.69
70	1.90	3.43	13.14

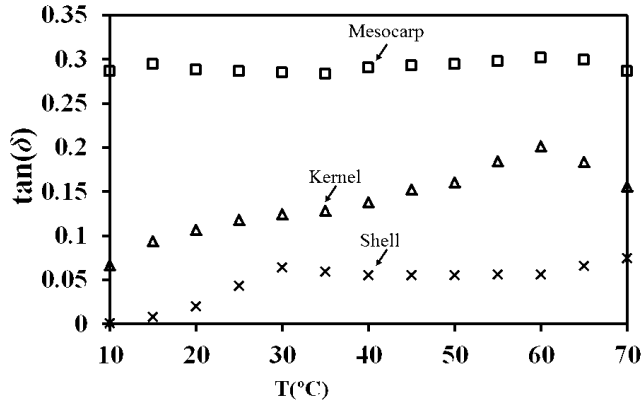


Figure 7. Temperature characteristics of loss tangent for each layer sample at 2.45 GHz.

4 MICROWAVE HEATING APPLICATIONS

In this section, the temperature-dependence complex permittivity equations for the three layers developed in Section 3 are applied to form a multilayer concentric model for the palm fruit *var. Tenera*. The multilayer model is intended to be applied for a microwave heating technique to predict the temperature distribution profile in palm fruit.

4.1 MECHANISMS OF MICROWAVE HEATING

The palm fruit, which is assumed to be spherical, is placed in a microwave rectangular cavity. The electromagnetic field generated from a magnetron with a rectangular waveguide is distributed in the cavity and the palm fruit. Let $\psi(r, \theta, \phi)$ be a wave function defined in the spherical coordinate (r, θ, ϕ) , $E_{cavity}(r, \theta, \phi)$ be the electric field within the cavity, γ be the wave propagation constant where $\gamma = \gamma_r + \gamma_\theta + \gamma_\phi$, and thus the electromagnetic field distribution in the palm fruit can be described from Maxwell's equations by [30, 31],

$$\nabla^2 \times E(r, \theta, \phi) + \gamma^2 E(r, \theta, \phi) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi(r, \theta, \phi)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi(r, \theta, \phi)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi(r, \theta, \phi)}{\partial \phi^2} + r^2 \psi(r, \theta, \phi) = E_{cavity}(r, \theta, \phi) \quad (3).$$

The boundary condition for a Perfect Electrical Conductor (PEC) is applied at the cavity and walls of the waveguide. No electric field in the normal direction of each PEC wall exists. This can be written as shown,

$$n \times E = 0 \quad (4),$$

The electric and magnetic field intensities at the interface between the two different mediums (air and the fruit surface) are continuous, hence the boundary conditions are shown as,

$$n \times (H_1 - H_2) = n \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (5),$$

where n represents the unit normal vector to the interface. Finally, we assume that no electric field exists at the initial time t_0 , thus

$$E_r(t_0), E_\theta(t_0), E_\phi(t_0) = 0 \quad (6).$$

Electromagnetic energy is transmitted in space by mutually supportive alternating electric and magnetic fields in the form of electromagnetic waves characterized by λ , frequency (f), magnetic field strength (H), and the electric field strength (E). When palm fruit is exposed to such a wave, part of the electromagnetic energy is absorbed and converted to heat [30, 31]. The microwave absorbed power in a unit volume of a material, $P(r, \theta, \phi, t)$, depends on its ϵ and can be calculated from f and E as follows [31,32]:

$$P(r, \theta, \phi, t) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon' E^2 \tan \delta \quad (7),$$

Since the magnetic permeabilities of all layers in palm fruit are equal to that of free space, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, there is no magnetic field interaction with the palm fruit. The power equation shown in equation (7) illustrates that the microwave power absorbed in palm fruit is linearly proportional to f , ϵ' , $\tan \delta$, and the square magnitude of the electric field. This can be described by the following Fourier heat transfer equation,

$$\frac{k}{\rho C_p} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T(r, \theta, \phi; t)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T(r, \theta, \phi; t)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial T(r, \theta, \phi; t)}{\partial \phi^2} + \frac{P(r, \theta, \phi; t)}{2\rho C_p} = \frac{\partial T(r, \theta, \phi; t)}{\partial t} \quad (8),$$

where $T(r, \theta, \phi; t)$ is temperature at the coordinates (r, θ, ϕ) at time t (min), T_a is the ambient temperature in Kelvin units, and k is the thermal conductivity of the palm fruit defined in $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

The heat transfer analysis is considered only in the palm fruit domain, which does not include the surrounding space. To simplify the analysis process considerably, the boundaries of the fruit surface are considered as an insulated boundary (no heat between the system and surroundings). This can be defined by,

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (9),$$

where the initial temperature in the palm fruit at t_0 is,

$$T(t_0) = T_0 \quad (10).$$

4.2 EXPERIMENT SETUP AND COMPUTATION METHOD

The proposed model was applied to a three-dimensional finite element model implemented by COMSOLTM Multiphysics software. The experiment results performed with a microwave oven (LG MS2349HK) were compared with the computed results from COMSOLTM. The microwave oven dimensions of 485 mm $\times$ 385 mm $\times$ 280 mm was used to simulate the electromagnetic field

distribution. A magnetron tube with four different output powers (160, 320, 480, and 800 W) radiates the field in the interior of the microwave oven at 2.45 GHz. A palm fruit was tied to the center of the oven and weighed using a digital balance with good accuracy of ± 0.1 g. The experiment setup is shown in Figure 8.

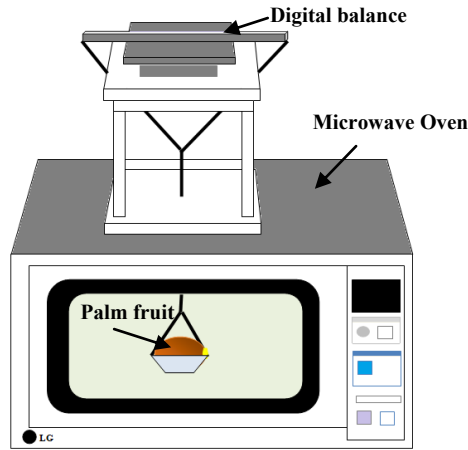


Figure 8. Microwave heating system.

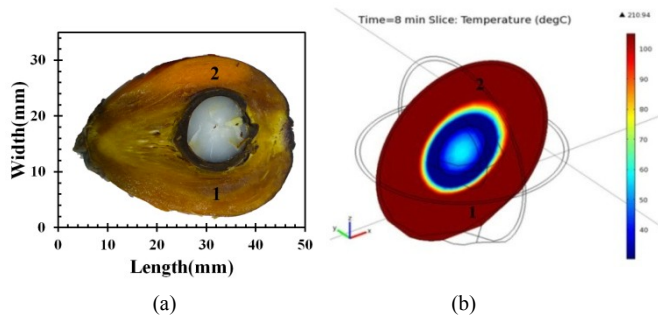
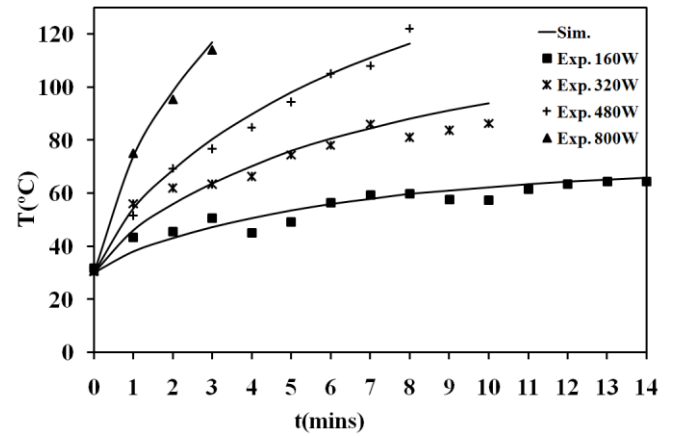
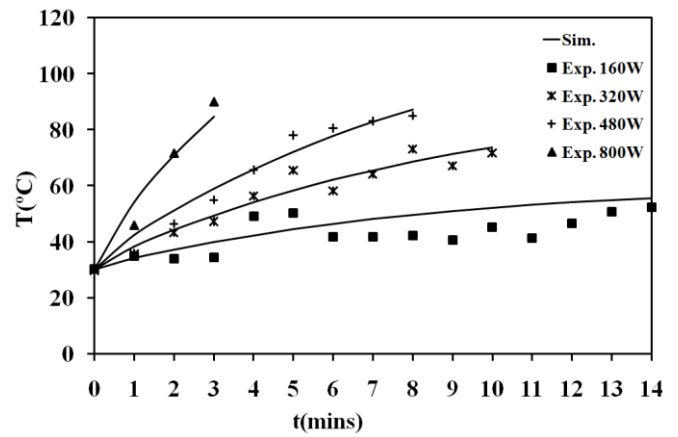


Figure 9. Temperature distribution profile in palm fruit, (a) measurement and (b) computation from COMSOLTM.

Since oil is mainly extracted from the mesocarp layer, only the temperature distribution profile in this layer is of our interest. The comparison of temperature distribution obtained by computation and measurement were made at two positions in the mesocarp layer. These two positions lie in the middle of the mesocarp layer between the shell and the exocarp layer as shown in Figure 9a. In $c_{\pm}$ experiment, the temperature profile was recorded every minute with an infrared thermometer with accuracy of 0.5% (Fluke 62 mini infrared (IR) thermometer). For 160 W microwave power, temperatures in the palm fruit were recorded for 14 minutes. When the microwave power level was at 320, 480 and 800 W, the temperature record duration times were 10, 8 and 3 minutes, respectively. It should be noted that a short record duration time for very high microwave power is required to protect the palm fruit from burning. To provide reliable results, all experiments were repeated three times.



(a)



(b)

Figure 10. Comparison between computed and measured temperatures at position (a) 1 and (b) 2.

Comparison of the temperature distribution in the palm fruit obtained from the system by experiment and by computation from the model is shown in Figure 10. The results indicate that the temperature in the mesocarp layer rapidly increases at high microwave power more than at low microwave power. This shows absorbed microwave power appeared in the form of generated heat, which is in accordance with equation (7), which describes that the amount of absorbed power remains proportional to E . The comparison between the computation and measurement of the temperature distribution inside the palm fruit resulted in good agreement for both positions. The correlation analysis was applied to demonstrate the accuracy of the model. For 320, 480 and 800 W, we obtained correlation coefficients in the range of 0.96-0.99. A small difference between these two data sets was expected from the non-homogeneity in the palm pulp. Only in the case of 160 W measured at the second position shows a correlation coefficient of 0.75. We believe that this resulted from uncertainty that could have occurred in the measurement. However, the overall results show that the fruit model developed from the temperature-dependence complex permittivity functions reported in this study can quite accurately predict the temperature distribution profile in palm fruit.

5 CONCLUSION

The complex permittivity for each layer of palm fruit *var. Tenera* was measured at frequencies between 0.5-6 GHz from 10-70 °C. Both ϵ' and ϵ'' decreased significantly with temperature increases at measured frequencies. The temperature-dependence complex permittivity functions for the three layer samples were formulated by using the regression technique. The loss tangents of the three layers in the palm fruit were analyzed as a function of temperature from 10-70 °C at 2.45 GHz. It was found that the loss tangent in the mesocarp layer was much higher than those for the kernel and shell layers. This means that more heat-electromagnetic energy conversion occurred in the mesocarp layer than in the other two layers. By considering the computed penetration depth, it confirmed that volumetric heating at 2.45 GHz did occur in the three layers. The temperature-dependence complex permittivity functions of the three layers at 2.45 GHz were applied to formulate the multilayer concentric model for the palm fruit. This model was applied to a microwave heating application to predict a temperature distribution profile in palm fruit. Analysis results were compared with the experimental results for the microwave heating technique at four different power levels (160, 320, 480, and 800 W). The multilayer concentric model for palm fruit developed from the temperature-dependence complex permittivity functions could predict the temperature distribution profile in the palm fruit quite accurately. This model proves the validity and applicability of the complex permittivity function presented in this paper and the feasibility of applying microwave technology for palm fruit.

ACKNOWLEDGMENT

This research was financially supported by the Thai Research Fund (Grant no. RSA5680056) and a Prince of Songkla Graduate Studies Grant. The authors would like to thank the editor and the anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions to improve the quality of this paper.

REFERENCES

- [1] M. Maskan, "Microwave/air and microwave finish drying of banana", *J. Food Eng.*, Vol. 44, No. 2, pp. 71–78, 2000.
- [2] S. Khumhom, W. Ajharn and C. Tongsopa, "Study of application of belt type microwave oven in oil palm sterilization process", *Thai Soc. Agri. Eng.*, Vol. 10, pp. 36–41, 2009.
- [3] M. H. I. Shah, M.A.A. Kamal and N. M. Azian, "A systems approach to mathematical modelling of sterilisation process in palm oil mill", *Eur. J. Sci. Res.*, Vol. 35, No. 4, pp. 583–592, 2009.
- [4] N. Sukaribin and K. Khalid, "Effectiveness of sterilisation of oil palm bunch using microwave technology", *Ind. Crop. Prod.*, Vol. 30, No. 2, pp. 179–183, 2009.
- [5] J. M. Osepchuk, "A history of microwave heating applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 32, No. 9, pp. 1200–1224, 1984.
- [6] V. Rakesh, A. K. Datta, J. H. Walton, K. L. McCarthy and M. J. McCarthy, "Microwave combination heating: coupled electromagnetics-multiphase porous media modeling and MRI experimentation", *Amer. Inst. Chem. Eng. J.*, Vol. 58, No. 4, pp. 1262–1278, 2012.
- [7] S. S. R. Geedipalli, V. Rakesh and A. K. Datta, "Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens", *J. Food Eng.*, Vol. 82, No. 3, pp. 359–368, 2007.
- [8] L. E. Feher, *Energy Efficient Microwave Systems: Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications*, Springer, 2009.
- [9] M. C. Chow and A. N. Ma, "Processing of fresh palm fruits using microwaves", *J. Microwave Power Electromagnetic Energy*, Vol. 40, No. 3, pp. 165–173, 2007.
- [10] S. Prasertsan and P. Prasertsan, "Biomass residues from palm oil mills in Thailand: an overview on quantity and potential usage", *Biomass Bioenerg.*, Vol. 11, No. 5, pp. 387–395, 1996.
- [11] W. Horwitz and G. W. Latimer Jr., *Official methods of analysis of AOAC International*, Association of Analytical Communities, Washington, USA, 1995.
- [12] "85070E dielectric probe kit, 200 MHz to 50 GHz-Technical overview", Agilent Technology, Datasheet 5989-0222EN, 2012.
- [13] Huber+Suhner Sucoflex 102 data sheet [online] [cited 20 July 2007]. Available: DOC-0000177900 AB.
- [14] P. J. W. Debye, *Polar Molecules*, Chemical Catalog Company, Inc., New York, USA, 1929.
- [15] 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 Sensor J.*, Vol. 12, No. 10, pp. 3019–3030, 2012.
- [16] U. Kaatz, "Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature", *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 34, No. 4, pp. 371–374, 1989.
- [17] A. C. Metaxas and R. J. Meredith, *Industrial Microwave Heating*, 2nd ed., Peter Pergrinus Ltd: London, 1993.
- [18] H. Feng, J. Tang and R. P. Cavalieri, "Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature", *Trans. Amer. Soc. Agricultural Eng.*, Vol. 45, No. 1, pp. 129–136, 2002.
- [19] Y. Wang, T. D. Wig, J. Tang and L. M. Hallberg, "Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization", *J. Food Eng.*, Vol. 57, No. 3, pp. 257–268, 2003.
- [20] D. G. Uan, M. Cheng, Y. Wang and J. Tang, "Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes", *J. Food Sci.*, Vol. 691, pp. 30–37, 2004.
- [21] S. O. Nelson and P. G. Bartley Jr, "Measuring frequency-and temperature-dependent permittivities of food materials", *IEEE Trans. Instrum. Measur.*, Vol. 51, No. 4, pp. 589–592, 2002.
- [22] Y. Wang, J. Tang, B. Rasco, F. Kong and S. Wang, "Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition", *J. Food Eng.*, Vol. 87, No. 2, pp. 236–246, 2008.
- [23] W. Guo, S. Wang, G. Tiwari, J. A. Johnson and J. Tang, "Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating", *LWT-Food Sci. Technol.*, Vol. 43, No. 2, pp. 193–201, 2010.
- [24] C. D. Everard, C. C. Fagan, C. P. O'Donnell, D. J. O'Callaghan and J. G. Lyng, "Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3 GHz", *J. Food Eng.*, Vol. 75, No. 3, pp. 415–422, 2006.
- [25] H. F. Huang, "Temperature control in a microwave resonant cavity system for rapid heating of Nylon Monofilament", *J. Microwave Power Electromagnetic Energy*, Vol. 11, No. 4, pp. 305–313, 1976.
- [26] A. R. Von Hippel, *Dielectric Properties and Waves*, John Wiley: New York, USA, 1954.
- [27] C. R. Buffler, *Microwave Cooking and Processing*, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [28] A. V. Vorst, A. Rosen and Y. Kotsuka, *RF/Microwave Interaction with Biological Tissues*, John Wiley & Sons, Inc.: New Jersey, USA, 2006.

- [29] K. Pongsuwan, M. Chongcheawchamnan and C. Tongurai, "Oil palm multilayer dielectric model for microwave drying technique", Proc. Kasetsart U. Ann. Conf., 2012, pp. 68–75.
- [30] S. S. R. Geedipalli, V. Rakesh and A. K. Datta, "Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens", J. Food Eng., Vol. 82, No. 3, pp. 359–368, 2007.
- [31] J. Tang, H. Feng and M. Lau, "Microwave heating in food processing", in *Advances in Bioprocessing Engineering*, Vol. 1 X. H. Yang and J. Tang, Ed, World Scientific Publishing: Singapore, 2002, pp. 1.
- [32] P. Ratanadecho, K. Aoki and M. Akahori, "Influence of irradiation time, particle sizes, and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials", J. Heat Transfer, Vol. 124, No. 1, pp. 151–161, 2002.



Kritsada Pongsuwan obtained the Bachelors degree in electronics engineering technology from King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB) in 2010. He received the Master degree in computer engineering in 2012 from Prince of Songkla University (PSU). He is currently a Ph.D. student in Computer Engineering department, PSU. His research interests are microwave heating and complex permittivity measurement for agricultural product.



Burawich Pamornnak obtained the Bachelors degree in computer engineering from Prince of Songkla University (PSU) in 2010. He is currently a Ph.D. student in Computer Engineering department, PSU. His research interests are microwave measurement and image processing for agricultural product.

Chakrit Tongurai Photograph and technical biography are not available at the time of publication.



Mitchai Chongcheawchamnan (SM'07) was born in Bangkok, Thailand. He received the B.Eng. degree in telecommunication from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, in 1992, the M.Sc. degree in communication and signal processing from Imperial College, London, U.K., in 1995, and the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Surrey, Guildford, U.K., in 2001. He joined the Mahanakorn University of Technology, Bangkok, in 1992, as a Lecturer. In 2008, he joined the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, as an Associate Professor. His current research interests include microwave circuit design and microwave techniques for agricultural applications. Dr. Chongcheawchamnan is a member of the IEEE Microwave Society.

Differential six-port reflectometer for determining dry rubber content of latex

ISSN 1751-8725

Received on 12th April 2014

Accepted on 12th December 2014

doi: 10.1049/iet-map.2014.0247

www.ietdl.org

Sakol Julrat¹, Mitchai Chongcheawchamnan² ✉, Ian D. Robertson³

¹Segate Technology (Thailand), Teparak, Smutprakarn, Thailand

²Electrical Engineering Department, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand

³Institute of Microwaves and Photonics, University of Leeds, Leeds, UK

✉ E-mail: mitchai.c@psu.ac.th

Abstract: This study presents the application of a differential six-port reflectometer to the design of a portable system for measurement of the dry rubber content (DRC) of latex. The proposed DRC measurement system consists of a 1 GHz reflectometer used with an open-ended coaxial-probe sensor, a temperature sensor, a display and a microcontroller. The complex permittivity and temperature of the rubber latex are measured, and a temperature-dependent model for DRC determination based on a dielectric mixture theory is used. The reflectometer performance is verified by comparing the measured complex permittivity with the results obtained from a commercial dielectric measurement system. Finally, the accuracy of the DRC measurement system is assessed by comparing the measured DRCs from different latex samples over the range of 10–40°C with the standard oven-drying method.

1 Introduction

The dry rubber content (DRC) of rubber latex has to be determined for the pricing of rubber latex in the trading market. Traditionally, the DRC is analysed based on the proven dry-oven method (ISO 126:1972). Since the dry-oven method is time consuming and needs a sophisticated measurement set-up, alternate solutions are needed – particularly in the field, for use by farmers. Several methods have been proposed and applied for pricing rubber latex. A faster standard method can be achieved by using a commercial microwave oven to dry the latex sample, but this method depends on special expertise. The Metrolac [1] method, which is based on the specific gravity measurement principle, has been used in several local trading markets. However, the Metrolac method takes about 20 min to obtain the result, while its accuracy is arguable because a measurement error can be created from misinterpretation of the results. The ideal DRC measurement system for pricing rubber latex in a trading market should be portable, user-friendly, accurate, reliable, automatic and fast.

Several attempts to improve the performance of the previously mentioned DRC measurement techniques have been made [2–10]. These research works were developed based on electrical measurement for obtaining a quick and automatic measurement. A low-cost high-performance portable DRC measurement system would be of particular importance for farmers. Several methods have been proposed to determine the DRC of rubber latex from the high-frequency wave parameters, which are measured from either transmission or reflection mode. From this research, the reflection mode microwave measurement method is particularly promising.

Recently, a microwave multiport reflectometer technique was proposed for determining the qualities of agriculture products owing to its low complexity system [9, 11]. A low-cost DRC system based on a six-port microwave reflectometer was reported in [9]. Since rubber latex has water as the main component, which is fundamentally sensitive to the ambient temperature, measuring the dielectric permittivity of rubber latex fundamentally requires multiple parameters to determine accurate DRC results. The system utilises a temperature sensor to measure the ambient temperature. This temperature parameter will assist for evaluating the DRC of rubber latex. A six-port reflectometer (SPR)-based DRC measurement system can be made portable because of low hardware complexity of a SPR. A dielectric probe sensor can be fabricated

simply using an open-ended coaxial line. The open-ended coaxial probe sensor is equipped to the SPR and applied for measuring the reflection coefficient of rubber latex. The measured reflection coefficient is converted to complex permittivity of the rubber latex using a mathematical model of the open-ended coaxial sensor. A microcontroller was proposed for computing the reflection coefficient and subsequently DRC. The measured complex permittivity is applied to the model to compute the DRC in rubber latex. One of the key requirements for a high accuracy DRC measurement system is a mathematical model that rigorously relates the electrical properties of the latex under test and the ambient temperature to the DRC of the rubber latex sample.

Since an SPR system operates in mixed-signal mode, an advanced integrated technology, for example system on a package (SoP), should be applied to meet the low-cost goal. The high-frequency circuit part of the SPR, which consists of a six-port network, power detectors and signal source, can be integrated onto a single chip whereas the digital part can be integrated using either advanced specific integrated circuit (ASIC) or field-programmable gate array (FPGA) technology on a cheap silicon substrate. Unfortunately, silicon is a lossy material and also analogue circuits are fundamentally sensitive to common-mode noise and electromagnetic interference. Therefore the accuracy of a measurement system designed will be considerably degraded by this common-mode noise and interference. To counteract this, a measurement system with high common-mode rejection ratio (CMRR) by design is required. It is well known that the common-mode rejection performance can be considerably enhanced by using a differential measurement technique.

In this paper, we first apply a differential SPR (DSPR) for DRC measurement system to demonstrate the feasibility for implementing DRC measurement with differential measurement technique. The DSPR was recently proposed in [12] to counteract the common-mode noise effect for six-port measurements. Applying the previously proposed DSPR topology that employs a differential sampled-line six-port network operated at 1 GHz, a DRC measurement system equipped with a temperature sensor is realised. The DRC determination algorithm based on the dielectric mixture theory is developed as a model for DRC determination. The performance of the proposed system will be validated by measuring several rubber latex samples for different DRCs over the range 10–40°C. The DSPR concept is described in Section 2. In Section 3, the proposed differential SPR measurement system

is described. The calibration performance of the system is demonstrated in Section 4 and the DRC determination algorithm is presented in Section 5. The system performance, the measured dielectric permittivity of rubber latex and the DRC determination results are described in Section 6. Finally, the paper will be concluded in Section 7.

2 Differential SPR (DSPR)

A DSPR is an alternative reflectometer for determining the reflection coefficient (Γ) of a device under test (DUT) while combating common-mode noise and interference. The system diagram is illustrated in Fig. 1. As compared with the regular single-ended SPR (SSPR), the DSPR system needs six baluns and a differential six-port network to operate. The baluns are needed to serve as a transition network and feed differential signals to the differential network. The differential six-port network acts as a core network which samples the reflected signal (a_2) from the DUT to four differential signals (b_3, b_4, b_5, b_6) for suppressing common-mode noise as well as electromagnetic interference.

In Fig. 1, the incident and reflected waves at the signal source and measurement ports are denoted by a_i and b_i . The single-ended output signals from four baluns are connected to power detectors and the direct current (DC) outputs are used to compute the reflection coefficient of the DUT by solving the following equations simultaneously

$$P_{d3} = |Aa_2 + Bb_2|^2 = |A\Gamma + B|^2|b_2|^2 \quad (1)$$

$$P_{d4} = |Ca_2 + Db_2|^2 = |C\Gamma + D|^2|b_2|^2 \quad (2)$$

$$P_{d5} = |Ea_2 + Fb_2|^2 = |E\Gamma + F|^2|b_2|^2 \quad (3)$$

$$P_{d6} = |Ga_2 + Hb_2|^2 = |G\Gamma + H|^2|b_2|^2 \quad (4)$$

where $\Gamma = a_2/b_2$, a_2 is the reflected wave from DUT and b_2 is the incident wave to the DUT. P_{d3}, P_{d4}, P_{d5} and P_{d6} are the differential DC power readings at ports 3, 4, 5 and 6, respectively. The parameters A, B, C, D, E, F, G and H of the DSPR are obtained from the six-port calibration procedure [12]. The CMRR of the DSPR can be evaluated as the ratio between the differential and common-mode signal transmissions [12]. It is noted that the core differential six-port network can be implemented with several topologies of six-port network, and is not only limited to the sampled-line structure which is used in this paper.

3 Differential measurement system for DRC determination

In this section, a differential measurement system for DRC determination system is proposed and illustrated in Fig. 2. The concept of the measurement system is similar to an in-field DRC measurement system [9] that uses a SSPR. A DSPR based on a sampled-line six-port network topology is chosen because of its low complexity. The system utilises an open-ended coaxial probe sensor to measure the reflection coefficient from the latex

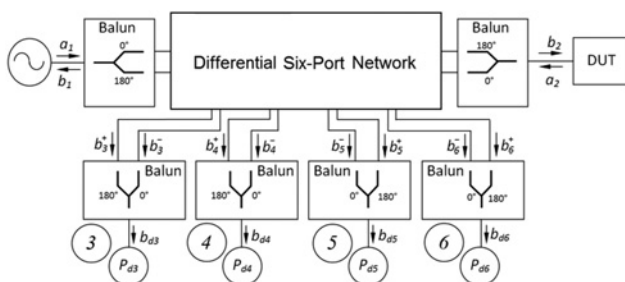


Fig. 1 DSPR topology [10]

sample under test while the ambient temperature will be measured with a temperature sensor. A liquid crystal display is used to show the measured DRC and temperature. In Fig. 2, four DC output signals from four logarithmic detectors and one DC signal from the temperature sensor are sampled and digitised using an analogue-to-digital converter (ADC). Noise signals in these five digitised channels are further reduced with five infinite impulse response (IIR) low-pass filters. After filtering noise, the Γ of the latex sample will be computed using the algorithms programmed in the system. The three main algorithms embedded in the 32-bit floating-point microcontroller are (i) a mathematical model for DRC determination under several in-field ambient temperatures, (ii) a six-port calibration program and (iii) a reflection coefficient computation algorithm.

Fig. 3 shows a photograph of the proposed DRC measurement system based on a DSPR designed to operate at 1 GHz. This frequency is chosen with the following rationale:

- The complex permittivity function of rubber latex can accurately characterise the DRC of rubber latex in the temperature range of interest [9, 11].
- Simple implementation and low-cost hardware design.

As shown in Fig. 3, a differential sampled-line six-port network designed on low-cost FR4 substrate (1.57 mm thickness) was chosen for the six-port network. The chip balun, LDB21942M20C-001, from Murata is selected for single-ended to differential signal conversion. The chip balun provides at least 20 dB CMRR at 1 GHz [12].

As in our previous work, we choose an SMA open-ended coaxial connector as a low-cost dielectric probe sensor for measuring the reflection coefficient owing to its ready availability, small size and low cost. The LT[®]5534 power detector [13] was chosen for its wide dynamic range, from 0 to -60 dBm over 0.5–3 GHz, which is sufficient for our design. Without any signal conditioning circuitry, the detector provides an output voltage range of 0.2–2.2 V. A 32-bit ET-STM32F103 microcontroller [14] with embedded 12-bit ADC was selected as a low-cost processor for implementing the algorithms with floating-point arithmetic. The quantisation resolution obtained from the selected microcontroller is 8.06×10^{-4} V/quantisation level. A 16×2 liquid crystal display was selected for showing the DRC results while a LM355 [15] sensor was chosen to measure the ambient temperature. A low-pass five-tap IIR filter with elliptic response was adopted to reduce the noise. The elliptic function is employed since it provides a sharp cutoff while the phase linearity in the passband is not taken into account.

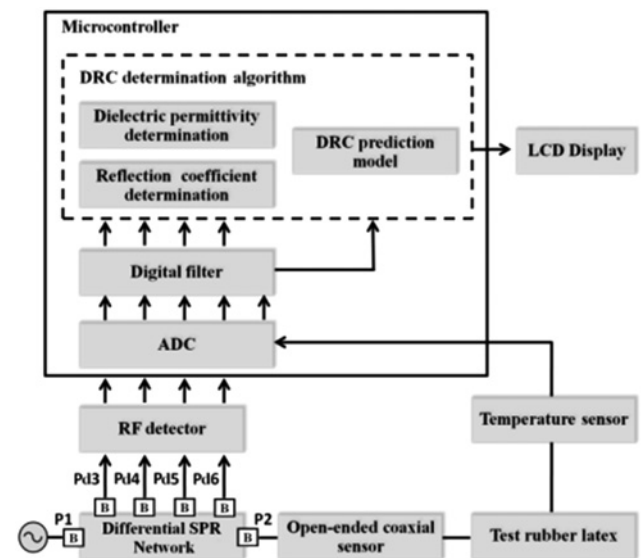


Fig. 2 Block diagram of the DRC measurement system

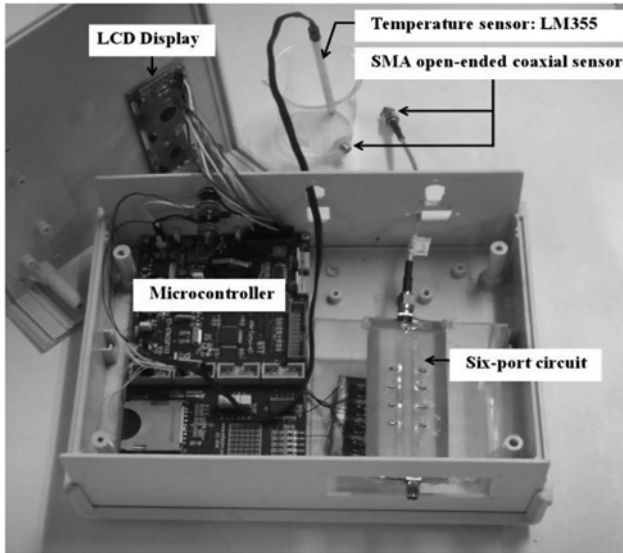


Fig. 3 DSPR measurement system for DRC determination

4 System calibration

The calibration procedure is presented in this section. This process is to eliminate all systematic errors that can be introduced by the various subsystems, for example, the differential six-port network, power detector, ADC and so on. The properties of three main components are needed in order to calibrate the system prior to measurement. These are the DSPR, the coaxial probe sensor and the LM355 temperature sensor.

4.1 DSPR calibration

The characteristic parameters of the DSPR must be determined using a calibration procedure prior to measuring the Γ of the DUT. Here, we choose the calibration algorithm based on a statistical method. The method uses a weighted squared error technique [16] to calibrate the designed DSPR as follows

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^4 (F_i + jG_i)P_{d2+i}}{\sum_{i=1}^4 (H_i)P_{d2+i}} \quad (5)$$

where F_i , G_i and H_i are the characteristic parameters of the DSPR, P_{d2+i} are power reading from the baluns and $i=1-4$. Ten known electrical loads were chosen in the calibration procedure. It should be noted that the calibrated loads are chosen such that their reflection coefficients are distributed in the four quadrants of the Smith chart, as suggested in [12].

After calibration was performed, the Γ 's of ten calibrated loads were measured. Fig. 4 compares the measured Γ 's obtained from the DSPR with those obtained from a standard automatic network analyser (HP8510B). It is shown that the DSPR provides sufficiently accurate results. Comparing with the results from the network analyser, the DSPR provides the magnitude mean absolute error of 0.033.

4.2 Open-ended coaxial probe sensor calibration

Here, the complex permittivity of rubber latex can be obtained from the measured Γ through the mathematical model of the open-ended coaxial probe sensor [17] as follows

$$\epsilon_r = \frac{1 - \Gamma}{j\omega Z_0 C_0 (1 + \Gamma)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (6)$$

where ϵ_r is the complex permittivity of rubber latex, ω is the applied signal's angular frequency, Z_0 is the characteristic impedance, which

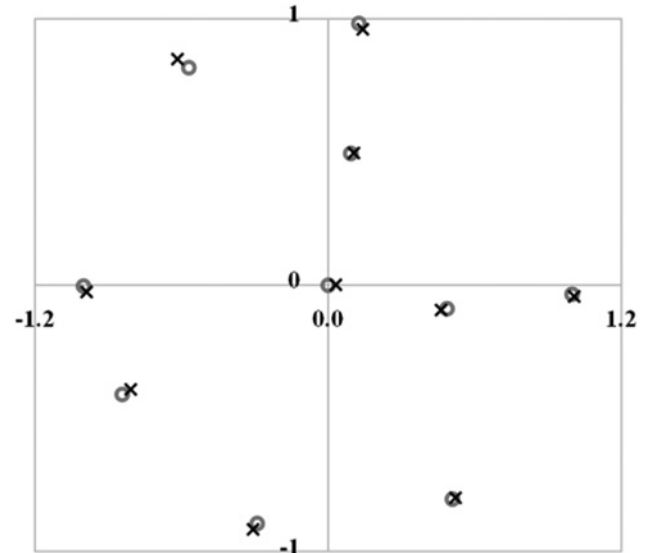


Fig. 4 Measured Γ 's of the DSPR (x) compared with automatic network analyser (o)

is normally set to be 50Ω , $j = \sqrt{-1}$, C_0 and C_f are the open-ended coaxial sensor capacitance parameters needed as the calibration parameters. These parameters describe the characteristics of the SMA open-ended coaxial probe sensor, which is based on the capacitance model of the capacitor filled with air and dielectric material.

To determine these capacitance parameters, distilled water was used as the standard sample. The dielectric permittivity of distilled water was obtained from a Debye-type relaxation spectral function [18] over the temperature range $10-40^\circ\text{C}$. The initial values of C_0 and C_f were 0.040 and 0.009 pF, respectively. These values were obtained by calculation based on the physical dimensions and materials for the coaxial probe sensor. After calibration was performed, we obtained C_0 and C_f of 34 and 9 fF, respectively.

4.3 LM355 temperature sensor calibration

Using distilled water as a calibrated sample, the LM355 temperature sensor was calibrated with the Fluke[®] 62 mini infrared thermometer sensor [19] which was selected as a reference temperature sensor. The distilled water is measured from both sensors concurrently. The results of the LM355 sensor were interpreted from the output voltage signals. The voltage characteristic for the LM355 against the temperature obtained from the standard thermometer sensor was analysed with the regression technique and the R-square regression obtained was 0.999 .

5 Algorithm for DRC determination

In this section, the dielectric mixture model theory is chosen to form a mathematical model for determining DRC. The advantage of using the dielectric mixture theory is its foundation in the physical background of the material. The technique was already demonstrated for DRC determination in [9], showing very accurate results for DRC determination. Hence, we apply the same model for determining DRC as follows [20]

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_w}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_w + \nu(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_w)} = f \frac{\epsilon_s - \epsilon_w}{\epsilon_s + 2\epsilon_w + \nu(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_w)} \quad (7)$$

where ϵ_{eff} is the measured complex permittivity of the rubber latex, obtained from the DSPR measurement system; ϵ_w is the complex permittivity of water that can be obtained from Debye-type

relaxation spectral function [18] as a function of temperature and frequency by supplying the measured frequency and temperature of the rubber latex; ϵ_s is the complex permittivity of dry rubber that is assumed to be temperature and frequency independent and equal to $2.2-0.05i$ [4]; ν is a dimensionless parameter describing the polarisation effect between neighbouring dry rubber particles and water molecules, and f is the dry rubber volume fraction, which is the solution of (8). Finally, the percentage of DRC can be computed as follows

$$\text{DRC} = \frac{D_s f}{D_s f + D_w(1-f)} \times 100 \quad (8)$$

where D_s is the density of solid rubber that is equal to 0.90 g/cm^3 and D_w is the temperature-dependent density of water that is well known.

6 Experimental results and discussion

In this section, the performance of the proposed DSPR measurement system is evaluated with two experiments; measuring complex permittivity and determining DRC of several rubber latex samples for different ambient temperature conditions.

6.1 Complex permittivity measurement

Numerous diluted concentrated rubber latex samples were prepared at various temperatures. This was done by immersing the rubber latex samples in the temperature controlled water bath. Each diluted concentrated rubber sample was contained in a 40 ml beaker. To measure the complex permittivity of the rubber latex samples, the LM355 temperature sensor and SMA open-ended coaxial sensor are dipped in the rubber latex samples.

Figs. 5a and b show the measured dielectric constant and dielectric loss factor of the rubber latex samples as a function of ambient temperature, respectively. It can be seen that the dielectric constant of rubber latex decreases with increased temperature. This can be

explained by the fact that the polarisation in rubber latex is mainly governed by the dipolar orientation process. Since the strength of the hydrogen bond of the water molecule in latex is weakened as the ambient temperature increases, the dipole moment of the latex sample is reduced. This, in turn, decreases the ability of the water molecule to align with the applied electric field. On the other hand, the dielectric loss factor increases with the ambient temperature which is mainly governed by the conductivity characteristic of rubber latex. The bond energy in rubber latex reduces as temperature increases, leading to more free ions that can orient with the applied electric field.

Furthermore, Figs. 6a and b show the measured dielectric constant and dielectric loss factor of rubber latex at various temperatures as a function of DRC, respectively. It is shown in Fig. 6a that the dielectric constant relates to the ambient temperature and, if compared with the dielectric loss factor shown in Fig. 6b, can be modelled more simply than the dielectric loss factor. We believe that the characteristic of dielectric constant at 1 GHz reflects to the dipolar process of water molecules, which is inversely proportional to DRC. Hence, a mathematical model for DRC determination can be developed based on the dielectric constant only.

Meanwhile, the non-rubber components in the rubber latex, such as sodium salts, proteins and lipids, play a dominant role in the low-frequency dielectric constant. Since we employ microwave frequency, a mathematical model for DRC determination will be considerably simplified by using only the dielectric constant and neglect the dielectric loss factor information, but still providing a satisfactory degree of accuracy.

6.2 DRC prediction

As described in the previous subsection, only the dielectric constants are substituted in the DRC determination model. Fig. 7 shows the results of DRC determination using the DRC measurement system based on a DSPR. The value of the parameter ν was adjusted to be 1.65, to attain the minimum standard deviation of absolute error of DRC over the experimental temperature range. This parameter was carefully chosen as the same approach suggested in [9].

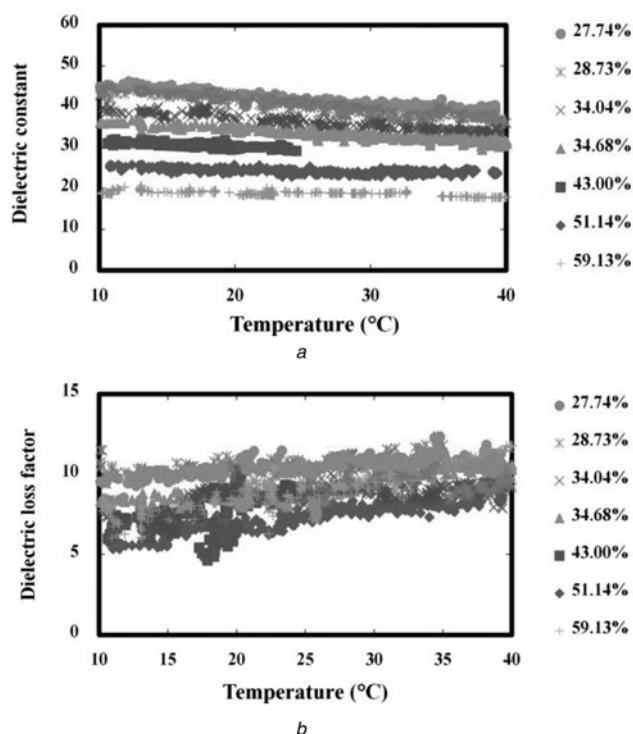


Fig. 5 Measured complex permittivity of rubber latex at 1 GHz as a function of temperature by using the proposed DSPR measurement system

a Dielectric constant
b Dielectric loss factor

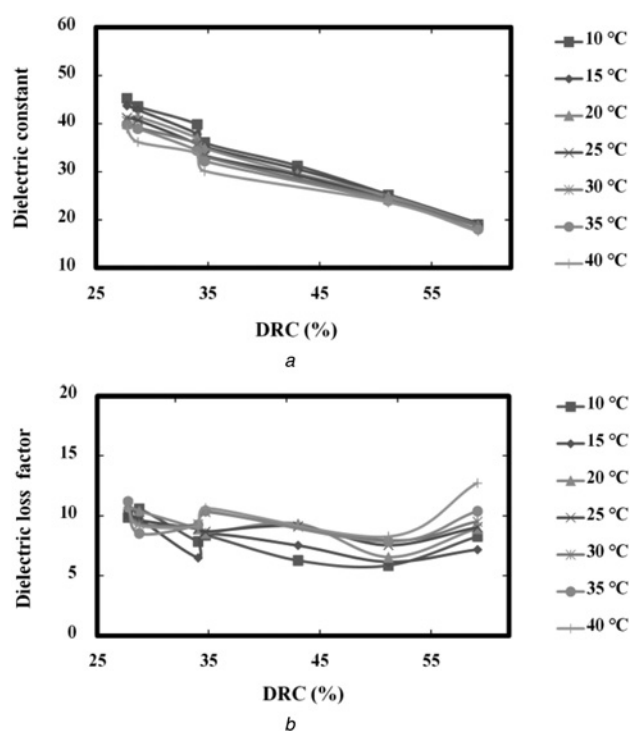


Fig. 6 Measured complex permittivity of rubber latex at 1 GHz at various temperatures as a function of DRC

a Dielectric constant
b Dielectric loss factor

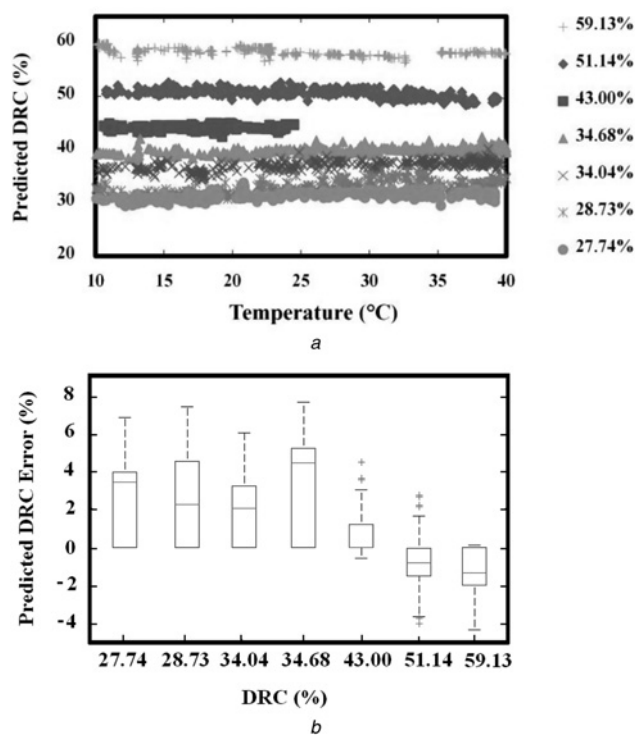


Fig. 7 DRC determination results at various temperatures from dielectric constant measurement at 1 GHz

a Predicted results
b Predicted error

Figs. 7a and b show the DRC predicted results and the prediction errors of DRC at 1 GHz, respectively. It can be seen that the predicted DRC results are in agreement with those obtained from the standard method ISO 126:1972 (DRC) with 2.77% of mean absolute error and 1.82% of standard deviation error. However, the errors of the proposed DRC measurement system are higher than the results obtained from the SSPR which was designed based on a five-port ring structure [9]. We believed that this error is mainly caused owing to poorer performance of sampled-line six-port network used in the DSPR. From our previous study [21], a sampled-line six-port network requires more signal-to-noise ratio than a five-port ring six-port network topology. Various techniques such as increasing bit resolution can be applied to improve the accuracy performance. Another solution is to apply a DSPR based on differential five-port ring or other six-port network topology which has better performance.

7 Conclusion

The DSPR system for DRC determination system based on a 32-bit microcontroller has been presented in this paper. The proposed differential DRC measurement system was developed to achieve an automatic, high accuracy and low-cost system. The system was designed using the differential sampled-line six-port network and the DRC determination algorithm that is based on dielectric mixture model theory as a temperature-dependent model was developed. The validation of the system has been demonstrated at 1 GHz with several measurements on different DRC diluted rubber latex samples were performed. The results were verified with the standard oven-drying method (ISO 126:1972, DRC) over a

temperature range of 10–40°C. The proposed technique provides an accurate performance, with the mean absolute error and standard deviation absolute error being 2.77 and 1.82%, respectively. The accuracy can be improved if some other differential six-port network topologies are applied. We believe that the differential measurement technique can be applied to implement a DRC measurement system in mixed-signal integrated circuit formed on a silicon substrate in the future.

8 Acknowledgments

This research was financially supported by Prince of Songkla University and Thai Research Fund (TRF) under the contract numbers ENG550076S and RSA5680056, respectively. The authors would like to acknowledge the valuable comments from anonymous reviewers.

9 References

- 1 Tillekeratne, L.M.K., Karunanayake, L., Sarath Kumara, P.H., Weeraman, S.: 'A rapid and accurate method for determining the dry rubber content and total solid content of NR latex', *Polym. Test.*, 1988, **8**, (5), pp. 353–358
- 2 Zhao, Z.-m., Jin, X.-d., Zhang, L., Yu, X.-l.: 'A novel measurement system for dry rubber content in concentrated natural latex based on annular photoelectric sensor', *Int. J. Phys. Sci.*, 2010, **5**, (3), pp. 251–260
- 3 Khalid, K.: 'Determination of dry rubber content of Hevea latex by microwave technique', *Pertanika J. Sci. Technol.*, 1982, **5**, (2), pp. 192–195
- 4 Khalid, K.B.: 'Microwave dielectric properties of Hevea rubber latex', *Asia-Pacific Microwave Conf.*, 1992, vol. 2, pp. 611–616
- 5 Somwong, T., Seewattanapon, S.: 'Application of microstrip ring resonator for correlation of dielectric and frequency in rubber latex'. The 31st Electrical Engineering Conf., Thailand, 2008, pp. 769–772
- 6 Gheretli, M.M.: 'Development of dual frequency microwave moisture sensor based on circular microstrip antenna'. PhD thesis, University Putra Malaysia, 2005
- 7 Gheretli, M., Khalid, K., Grozescu, I.V., Sahri, H., Abbas, Z.: 'Dual frequency microstrip antenna sensor for water content measurements independent of temperature variation', *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**, pp. 1054–1060
- 8 Gheretli, M.M., Khalid, K., Grozescu, I.V., Sahri, M.H., Abbas, Z.: 'Dual-frequency microwave moisture sensor based on circular microstrip antenna', *IEEE Sens. J.*, 2007, **7**, (12), pp. 1749–1756
- 9 Julrat, S., Chongcheawchamnan, M., Khaoraphapong, T., Robertson, I.D.: 'Single frequency based dry rubber content determination technique for in-field measurement application', *IEEE Sens. J.*, 2012, **12**, (10), pp. 3019–3030
- 10 Ansarudin, F., Abbas, Z., Hassan, J., Yahaya, N.Z., Ismail, M.A.: 'A simple insulated monopole sensor technique for determination of moisture content in Hevea rubber latex', *Meas. Sci. Rev.*, 2012, **12**, (6), pp. 249–254
- 11 Yee, L.K., Abbas, Z., Jusoh, M.A., Yeow, Y.K., Meng, C.E.: 'Determination of moisture content in oil palm fruits using a five-port reflectometer', *Sensors*, 2011, **11**, (4), pp. 4073–4085
- 12 Julrat, S., Chongcheawchamnan, M., Khaoraphapong, T., Robertson, I.D.: 'Analysis and design a differential sampled-line six-port reflectometer', *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2013, **61**, (1), pp. 244–255
- 13 'LT5534 50 MHz to 3 GHz RF power detector with 60 dB dynamic range'. Linear Technology Datasheet, 2004
- 14 'ET-STM32F103 microcontroller user manual', ETT
- 15 'LM135/LM235/355, LM135A/LM235A/LM355A Precision temperature sensor', National Semiconductor Corp. Datasheet, 17 December 2008
- 16 Jachim, S.P., Gutscher, W.D.: 'A statistical method for calibrating the six-port reflectometer using nonideal standards', *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1989, **37**, (11), pp. 1825–1828
- 17 Stuchly, M.A., Athey, T.W., Samaras, G.M., Taylor, G.E.: 'Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part II – experimental results', *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1982, **30**, (1), pp. 87–92
- 18 Kaatz, U.: 'Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature', *J. Chem. Eng. Data*, 1989, **34**, (4), pp. 371–374
- 19 'The fluke 62 mini infrared thermometer'. User manual, USA, 4/2005 2437622 D-US-N Rev A
- 20 Shivola, A.H.: 'Self-consistency aspects of dielectric mixing theories', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1989, **27**, (4), pp. 403–415
- 21 Somwong, S., Julrat, S., Chongcheawchamnan, M.: 'Effect of additive white Gaussian noise on accuracy of a six-port reflectometer'. ECTI 2012, Hua Hin, Thailand, 2012

Effects of Contaminations in Rubber Latex on Relative Permittivity at 0.5-2.0 GHz

Sahapong Somwong¹, Phirote Wunchum², Mitchai Chongcheawchamnan²
Department of Computer Engineering Department¹, Electrical Engineering²
Prince of Songkla University, Hat Yai Campus,
Hat Yai District, Songkhla, 90112, THAILAND
Email: *mitchai.c@psu.ac.th*

Abstract—This paper proposes an analysis on the effects of contaminants and studies the contamination detection in rubber latex with relative permittivity at 0.5-2.0 GHz. In order to develop a mathematical model for detecting contaminants in rubber latex, it can apply to the DRC measurement system which has been created earlier. The DRC measurement system is designed to be the mostly operate at 1.0 GHz. From this experiment, the percentage of dry rubber content (DRC) is increasing with the amount of contaminants. Thus, the contaminated latex is not detected by the Total Solid Content method (TSC). The contaminated latex can be detected by the relative permittivity. In this result, the dielectric loss factor can distinguish of contaminated latex better than dielectric constant. Finally, the DRC measurement systems can be measured DRC and detected contamination in rubber latex on a single device in the future.

Keywords—rubber latex; contaminated latex; relative permittivity; dielectric constant; dielectric loss factor

I. INTRODUCTION

In a rubber industry, the rubber processing is primarily to be processed and used as a raw material in the manufacturing of a product such as rubber tire, motorcycle tire, gloves, condoms, etc. Currently, focused on the production of rubber sheet and rubber latex for exports to other countries. The industry has been purchased fresh latex from farmers for using in the manufacture of rubber sheets and rubber latex. In trading fresh latex, a price of fresh latex depend on percentage of dry rubber content (DRC) which is a ratio of rubber content in rubber latex. The DRC affects to the quality of rubber latex. In trading a fresh, some farmers are an opportunity for profit to themselves. They add contaminants that look like a rubber latex in the rubber latex, such as cassava starch, gypsum, calcium carbonate, cement, for increasing the weight and the DRC. Moreover, Adding ammonia to the excessive amounts for the treatment of rubber latex[1] which is affected to the stability of the rubber latex. Therefore, the contamination in the rubber latex is harmful to the process and low quality of the product.

Commonly, In trading fresh latex has two method for determining the DRC. There are metrolac method[2] and microwave drying method[3]. The metrolac method use the density of rubber latex to determine DRC. The method is fast

processing but low accuracy. For the microwave drying method, the DRC is calculated from the ratio of the weight of rubber latex samples before and after drying. Thus, the microwave drying is a Total Solid Content method (TSC). It was found that, the TSC method is complicated and slow processed for DRC determination. However, the method is more accurate than metrolac method. Therefore, the farmers use TSC method to calculate the DRC for determine the quality and price of the rubber latex.

Previously, the research work proposed the microwave technology products and agricultural application [4-5]. In addition, the research work is proposed the prototype of DRC measurement systems base on six-port reflectrometer, which is the microwave technique for determining DRC [6]. It operates at 1GHz. The DRC measurement system is high accurate, fast and small. Moreover, It field tested with rubber latex from various cooperative of rubber latex. The result is comparable to the global standard (ISO 126: 1972 Dry rubber content, DRC). The error are only 0.36% and 0.95% in the case of measuring rubber latex and fresh latex, respectively. However, DRC measurement systems has not reported the detection of contaminants in the rubber latex which add by farmers.

Therefore, this paper proposes the effect of contamination with cassava starch and CaCO_3 in rubber latex. In order to study the method for detecting the contaminants in rubber latex. In this experiment, there are two methods. The first is the analysis of contamination in rubber latex with the TSC method. The second is the analysis of contaminations in rubber latex with relative permittivity. They are explained in section II. The results and discussion is described in section III. The conclusions of this paper is in last section.

II. MATERIALS AND METHOD

A. Materials

Although, the TSC method can determine the DRC of rubber latex. The researcher is interested the TSC method to test the contaminated detecting. This method compare the DRC of latex with non-contaminated latex and contaminated latex. The contaminants are used in experiment which are

cassava starch and CaCO_3 . Moreover, the DRC measurement system is the high-frequency technique for determining DRC. It uses the relative permittivity to predict the DRC. Therefore, this method analyzes the contamination of rubber latex by relative permittivity. Comparisons the relative permittivity of non-contaminated latex with contaminated latex at 0.5-2.0 GHz. They are measured by the 85070E Agilent dielectric probe kit and HP 8510B network analyzer. The experiments measure in the laboratory at room temperature (27 °c).

B. Methods

1). The analysis of contamination in rubber latex with the TSC method

In this method, it analyzes the effects of contaminants, which are cassava starch and CaCO_3 , are contaminated in rubber latex. Thus, this process compares the DRC from calculation method with TSC method of contaminated latex. For this method, the test rubber latex, which the DRC is about 20, is used for analyzing the effects of contamination in rubber latex. The contaminants 1 gram are added into 50 cm³ of test rubber latex. Then, it can calculate the DRC by eq. 1.

$$\%DRC_{total} = \frac{(M_d + M_c)}{(M_{cl})} \times 100, \quad (1)$$

Where, M_d is the weight of dry rubber in gram, M_c is weight of contaminants in gram. M_{cl} is the weight of contaminated latex in gram. The DRC of test rubber latex is about 20. It can calculate the weight of dry rubber of rubber(M_d) by eq. 2.

$$M_d = \frac{\%DRC}{100} \times M_r, \quad (2)$$

Where, M_r is weight of test rubber latex. It can calculate by the density of rubber latex equation is eq. 3.

$$D_s = \frac{M_r}{V}, \quad (3)$$

Where D_s is the density of dry rubber. It is about 0.90 g / cm³[7]. Then, M_{cl} is the sum of weight of test rubber latex(M_r) and weight of contaminants(M_c) which is contaminated in rubber latex. It can calculate by eq. 4.

$$M_{cl} = M_r + M_c. \quad (4)$$

Then, the contaminants are stirred to dissolve in test rubber latex. The contaminated latex is measured DRC by TSC method. After that, the contaminants 1 g is added into contaminated rubber latex. The contaminated latex is determined the DRC by calculation method and TSC method. Then, the method repeat this process until the contamination of 15 grams. It was observed that the DRC calculation is depends on the weight of the contaminants. Finally, this

method is a analysis the amount of contaminants in rubber latex are affected to DRC by TSC method. The rise of DRC is determined by TSC method. They are a contamination from 1-15g of cassava starch and CaCO_3 . Then, the DRC of contaminated latex by TSC method are compared with the calculation method.

2). The analysis of contaminations in rubber latex with relative permittivity

The relative permittivity ϵ_r is a complex number which is real and imaginary parts are denoted as eq. 5.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j\epsilon_r'' \quad (5)$$

Where ϵ_r' and ϵ_r'' are dielectric constant and dielectric loss factor of the material, respectively. This method is a study of relative permittivity of rubber latex. The non-contaminated latex and contaminated latex are measured the relative permittivity by 85070E Agilent dielectric probe kit. The rubber latex A, B and C represent the contaminated latex, which the DRC of rubber latex are 30, 25 and 28 respectively. The rubber latex D and E represent the contaminated latex, which are the rubber latex B was contaminated the cassava starch and CaCO_3 , respectively. In addition, the contaminants, they are cassava starch and CaCO_3 , are added into rubber latex B in order to increase DRC is almost equal the rubber latex A (DRC 30). Then, it is a relative permittivity comparison of contaminated latex and non-contaminated latex. After that, the relative permittivity of contaminated latex is used to calculate the DRC by mathematical model for predicting the DRC as the eq. 6.

$$DRC = \frac{D_s f}{D_s f + D_w (1 - f)}, \quad (6)$$

When D_s is the density of dry rubber which is about 0.90 g / cm³. D_w is the density of water. It depends on the temperature. DRC is obtained from the ratio of weight relative to the weight of dry rubber. f is dry solid rubber volume. It can be obtained from the eq. 6.

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_w}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_w + \nu(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)} = f \frac{\epsilon_s - \epsilon_w}{\epsilon_s + 2\epsilon_w + \nu(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)}. \quad (7)$$

When ϵ_w is relative permittivity of water. ϵ_s is relative permittivity of dry rubber. It is about 2.2-0.05i [8]. ϵ_{eff} is relative permittivity of rubber latex which was measured from the test rubber latex using a high frequency technique. ν is the variables that is used to explain the effects of polarization

mechanism of dry rubber and water. For this experiment, it use $\nu = 2$ because it is the most appropriate for predicting the percentage of dry rubber latex at 1 GHz.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The effect of contamination in rubber latex is analyzed by the contamination with cassava starch and CaCO_3 . This experiment uses DRC of rubber latex is about 20. The result of rubber latex contaminated with cassava starch and CaCO_3 are shown in Fig. 1. For the cassava starch is contaminated in rubber latex. They dissolve a homogeneous and no precipitated which made the DRC is higher. It found that the DRC from the TSC method is close to the DRC calculation. The average error between TSC method and DRC calculation are about ± 0.80 DRC. Thus, the rubber latex is contaminated with cassava starch cannot be verified by TSC method. For the rubber latex is contaminated with CaCO_3 . It observes that, after adding CaCO_3 into the rubber latex in the equal amount of cassava starch. It made DRC which is lower than cassava starch contamination. When the CaCO_3 is contaminated less than 2 grams can dissolve well in latex. The DRC from a TSC is almost equal to the DRC calculation. When the CaCO_3 is contaminated from 3 to 9 grams in rubber latex, they begin to precipitate. Therefore, it made the DRC from TSC method less than the DRC calculation. In addition, if the CaCO_3 more than 10 grams in rubber latex, the physical changes of the rubber latex is obviously. The DRC from TSC method of rubber latex is contaminated with CaCO_3 more than 10 grams is almost equal the DRC calculation. From Fig. 1. Observe that, the rubber latex is contaminated with less than 10 grams of CaCO_3 cannot be verified by TSC method. The comparison average error with DRC calculation is about -2.65 DRC

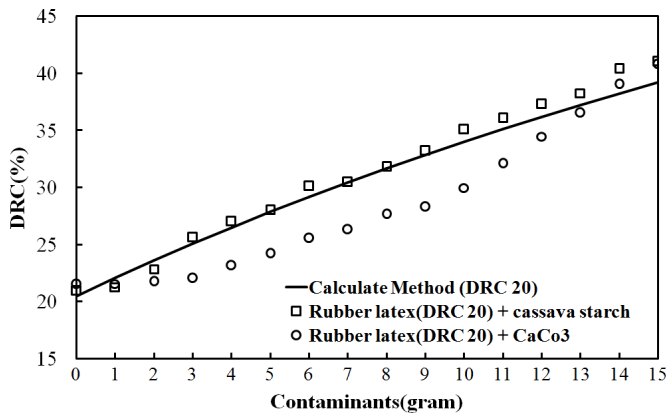


Fig. 1. Show the effects of the contamination in rubber latex

From the results, the amount of CaCO_3 is more than cassava starch which are added to get the same DRC. If the CaCO_3 is contaminate in rubber latex more than 10 grams. The physical changes of the rubber latex. However, when comparison is compared to rubber latex contaminate with

cassava, which is still in a state of rubber latex as shown in Fig. 2.

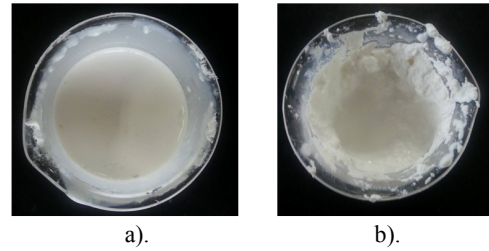


Fig. 2. The physical of contaminated rubber latex after contaminated 15grams

a). cassava starch b). CaCO_3

The next method is the study of relative permittivity analysis of the rubber latex contamination. The DRC of rubber latex A B and C are 30, 28 and 25, respectively. They are non-contaminated latex. The rubber latex D is the rubber latex C was contaminated with cassava starch. The rubber latex E is the rubber latex C was contaminated with CaCO_3 . The DRC of contaminated latex D and E are about 30. The relative permittivity of non contaminated latex and contaminated latex are measured by 85070E Agilent dielectric probe kit as shown in Fig. 3 and Fig. 4.

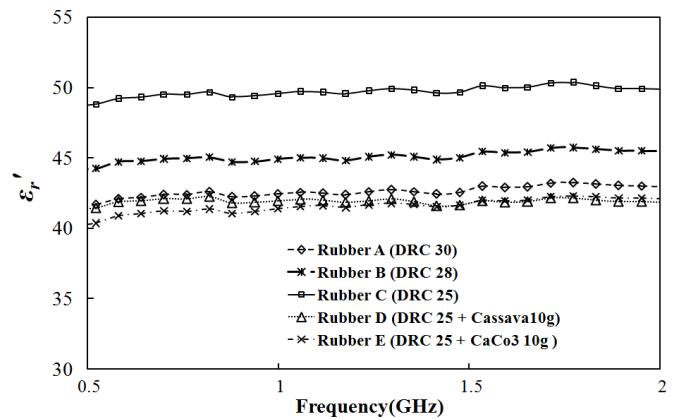


Fig. 3. The comparisons of dielectric constant of rubber latex

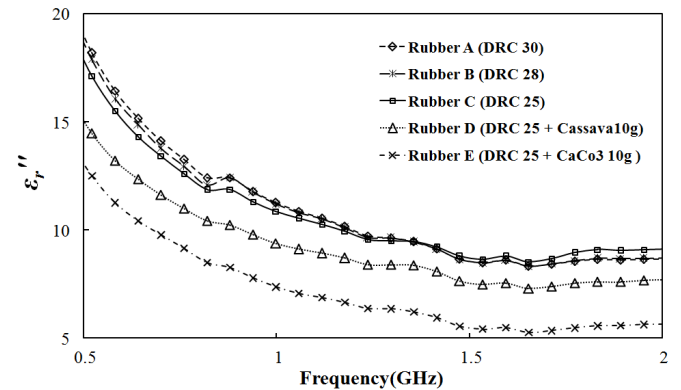


Fig. 4. The comparisons of dielectric loss factor of rubber latex

Fig. 3 shows the comparisons of dielectric constant of all rubber latex. It observe that the dielectric constant of rubber latex B is the highest of all rubber latex because the rubber latex B has DRC the least of all. Therefore, The DRC is inversely to the dielectric constant. The DRC of rubber latex A D and E are almost equal. So, the dielectric constant of their is the same trend. Thus, the dielectric constant is difficult to distinguish the rubber latex which are contaminated and non-contamination from each other.

Fig. 4 shows the dielectric loss factor of all rubber latex. The rubber latex A, B and C is almost equal and same trend. It found that, the dielectric loss factor of non-contaminated latex has almost equal. The dielectric loss factor of contaminated latex is different significantly. From the results, it used the dielectric loss factor for detecting the rubber latex contaminated. After that, the dielectric constant of rubber latex are used to calculate the DRC with mathematical model. This method verify the accuracy of the DRC measurement systems which predict the DRC. The comparisons of the DRC with mathematical model at 0.5-2.0 GHz as shown in Table I.

TABLE I. COMPARISONS OF DRC WITH MATHEMATICAL MODEL

Sample rubber latex	0.5 GHz		1.0 GHz		1.5 GHz		2.0 GHz	
	model	Δ	model	Δ	model	Δ	model	Δ
A (DRC 30)	30.0	0.0	29.3	0.7	28.9	1.1	28.9	1.1
B (DRC 25)	23.8	1.2	23.5	1.5	22.7	2.3	23.0	2.0
C (DRC 28)	27.8	0.2	27.2	0.8	26.7	1.3	26.7	1.3
D (DRC 25) + (Cassava 10g)	30.2	5.2	29.8	4.9	29.8	4.8	29.9	4.9
E (DRC25) + (CaCo3 10g)	31.2	6.2	30.3	5.3	29.8	4.8	29.7	4.7

From Table I., where Δ is the absolute error of DRC which are measured by DRC measurement system and calculated by mathematical model. Observed that, the DRC from mathematical model cannot distinguish the contaminated latex. Therefore, the dielectric constant is not suitable to used to detect contamination in rubber latex.

However, the study of the relative permittivity of the contaminated rubber latex can use dielectric loss factor for distinguishing the contamination in rubber latex. For this experiments, they can design the mathematical models for contaminated detection in rubber latex and applied the model to a DRC measurement system[6] . The finally, the measurement system can measure the DRC and detect contamination in one single device.

IV. CONCLUSIONS

The effect of cassava starch and calcium carbonate in rubber latex has been presented. The contaminants in rubber latex made the DRC is higher. However, the contaminated latex can measure the DRC by TSC method but cannot distinguish the contamination in rubber latex. Because the DRC is increased by the amount of contaminants. The dielectric constant cannot detect the contamination in rubber latex. The contaminations in rubber latex was detected by the dielectric loss factor. From the results, researcher can design a mathematical model for contaminating detection in rubber latex in the future work. In addition, the contaminated detection model can apply to the DRC measurement system base on six-port reflectrometer. Therefore, the DRC measurement system can be measuring DRC and detecting contamination in rubber latex on a only one device.

ACKNOWLEDGMENT

This research is financially supported by Thailand research fund under the grant number RSA5680056. The author would like to acknowledge funding from department of computer engineering, prince of songkla university for financial supporting his Ph. D study.

REFERENCES

- [1] S. Santipanusopon and S. Riyajan , "Effect of field natural rubber latex with different ammonia contents and storage period on physical properties of latex concentrate, stability of skim latex and dipped film," *Physics Procedia*, vol 2, Issue, pp.127-1341 , 2009.
- [2] P. H. S. Kumara, "Method of estimation of dry rubber content in natural rubber latex," *Bulletin of the Rubber research institute os dri lanka*, Srilanka , pp. 65-69, 2006.
- [3] T.Jayanthi, P. E. Sankaranarayanan, "Measuerment of dry rubber content in latex using microwave technique," *Measurement science review*, vol. 5, pp. 50-53, 2005.
- [4] G. F. Engen, "The six-port reflectometer: an alternative network analyzer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 25, no. 12, pp. 1075- 1080, Dec. 1977.
- [5] T. Jayanthi and P.E. Sankaranarayanan, "Measurement of dry rubber content in Latex using microwave technique," *Measurment Science Review*, vol. 5(3), pp. 50-54, 2005.
- [6] 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 Sens. J.*, vol. 12, no. 10, pp. 3019–3030, 2012.
- [7] K.B. Khalid and W. M. Daud, "Dielectric properties of natural rubber lates at frequencies from 200 MHz to 2500 MHz," *Journal of National Rubber Research*, vol. 7(4), pp. 281-289, 1992.
- [8] K. B. Khalid, "Microwave dielectric properties of hevea rubber latex," *Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 611-616, 1992.

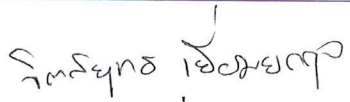
สำเนา

แบบสป/สผ/อสป/001-ก

หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า

 คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☒ การประดิษฐ์ ☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์ ☐ อนุสิทธิบัตร ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ.2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ.2542	สำหรับเจ้าหน้าที่	
	วันรับคำขอ ๒๑ มี.ย. 2557	เลขที่คำขอ
	วันยื่นคำขอ 29 มี.ย. 2557	140 1001813
	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
	ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา		เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร		เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่		
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ เครื่องวัดปริมาณน้ำมันในทะเลลายปาล์ม		
2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่ ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน		
3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัด สงขลา 90110 และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ เลขที่ 979/17-21 อ. พหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400		3.1 สัญชาติ ไทย 3.2 โทรศัพท์ 0-7428-9322 3.3 โทรสาร 0-7428-9339 3.4 อีเมล jittiyut.y@psu.ac.th
4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ☒ ผู้รับโอน ☐ ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น		
5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด ประเทศ รหัสไปรษณีย์) นายจิตติยุทธ เยี่ยมยกกุล ศูนย์ทรัพยากรเส้นทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110		5.1 ตัวแทนเลขที่ 2266 5.2 โทรศัพท์ 074-289322 5.3 โทรสาร 074-289339 5.4 อีเมล jittiyut.y@psu.ac.th
6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) 1. นายบุรวิษฐ์ ภมรนาถ 2. รศ.ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ 3. ดร.สมชัย หลิมศิริรัตน์ และ 4. นายสากล จุลรัตน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110		
7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ ☐ คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ☐ ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ☐ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ		

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่วางระบายนละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้ โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่
แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

8. การยื่นคำขออนุญาตนำเข้า				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการ ประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 ☐ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอนี้ในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย ☐ ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ ☐ ขอขึ้นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9. การแสดงการประดิษฐ์ หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง วันเปิดงานแสดง ผู้จัด				
10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ	10.2 วันที่ฝากเก็บ	10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ		
11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอขึ้นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ที่จัดทำ เป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอขึ้นเป็นภาษา ☐ อังกฤษ ☐ ฝรั่งเศส ☐ เยอรมัน ☐ ญี่ปุ่น ☐ อื่น ๆ				
12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ เดือน พ.ศ. ☐ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ในการประกาศโฆษณา				
13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย ก. แบบพิมพ์คำขอ 2 หน้า ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์ 7 หน้า ค. ข้อถ้อยสิทธิ 3 หน้า ง. รูปเขียน 4 รูป 2 หน้า จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์ ☐ รูปเขียน รูป หน้า ☐ ภาพถ่าย รูป หน้า ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์ 1 หน้า		14. เอกสารประกอบคำขอ ☒ เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบ ผลิตภัณฑ์ ☒ หนังสือมอบอำนาจ ☐ เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ ☐ เอกสารการขอรับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่น คำขอในประเทศไทย ☐ เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ ☒ เอกสารอื่น ๆ		
15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ☒ การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน ☐ การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมา จาก.....				
16. ลายมือชื่อ (☐ ผู้ขอรับสิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร; ☒ ตัวแทน)  (นายจิตติยุทธ์ เยี่ยมยกกุล) ตัวแทนผู้รับมอบอำนาจ				

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นคำขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงาน
เจ้าหน้าที่ เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ



Effective Moisture Diffusivity, Activation Energy and Dielectric Model for Palm Fruit Using a Microwave Heating

Kritsada Puangsuwan

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112 Thailand

Mitchai Chongcheawchamnan

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112 Thailand

Chakrit Tongurai

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112, Thailand

Received: February 17, 2015

Accepted: May 13, 2015

ABSTRACT

A microwave heating process for palm fruit can quickly remove the moisture content and destroy any free fatty acids (FFA) in palm fruit. In this paper, the key parameters for palm fruit to design an effective microwave heating system, effective moisture diffusivity, activation energy and dielectric model are reported. These parameters can predict the temperature distribution and moisture ratio in *var. Tenera* palm fruit when using a 2.45 GHz microwave, heating at four different power levels (160, 320, 480, 800 W). By assuming that each palm layer is homogeneous, a model composed of physical layers (mesocarp, shell and kernel) was developed. The effective moisture diffusivity of the palm fruit is determined by Fick's second law for mass transport mechanism. The calculated value of the effective moisture diffusivity of the palm fruit increases with the temperature since the water molecules in the palm fruit diffuses quickly at high temperature. In addition, the activation energy of palm fruit ranges from 31.06 to 48.91 kJ(mol)⁻¹ with the different microwave powers, which were obtained by applying the linear regression technique to the Arrhenius equation model. Finally, the comparisons between the computed and the actual experiment for the moisture ratio with the different microwave powers were computed from the effective moisture diffusivity in the palm fruit. The results obtained from both data sets highly correlate.

KEYWORDS: Microwave heating; three-layer dielectric model; palm fruit; dielectric properties.

INTRODUCTION

The palm plant, *Elaeis consensus Jacq.*, provides the highest yields per hectare of all oil producing crops [Prasertsan and Prasertsan, 1996; Sumathi *et al.*, 2008]. Crude oil is derived both from the mesocarp and kernel layers of the palm fruit. Currently, the process of

extracting crude oil can be classified into two types. The first type, which is the standard process, uses hot steam to sterilize a palm bunch for stripping and drying palm fruit. The second type, which is suitable for small-scale production, uses a frying method for heating palm fruit. This way is low in cost, but the oil product obtained is low in quality since it is a mixture from the mesocarp and kernel [Basiron, 2005; Poku, 2002]. To maintain the quality and prolong shelf life of the product [Maskan, 2000], both heating process types employ heat convection mechanisms to expel moisture in the palm fruit.

Differing from the conventional heating process, a microwave technique provides an alternative solution that promises a rapid heating mechanism, especially for agricultural and food products, which are porous media. It was reported that a microwave heating technique [Sukaribin and Khalid, 2009; Mohd Halim Shah et al., 2009] can dry palm fruit more rapidly and uniformly than the conventional techniques because heat is developed from the internal volume of the palm fruit. Moreover, the technique is a clean technology because no exhaustive fumes are produced in the process.

To produce a high quality oil product with low free fatty acid (FFA), heating palm bunches using a microwave technique was proposed to replace the conventional sterilization process [Sukaribin and Khalid, 2009]. High-efficient stripping of palm fruit from a palm bunch was obtained. A fast heating process was also achieved. This brought about much attention from both industrial and academic sectors for its application. Several investigations regarding applying microwave heating for palm fruit were performed. To design an effective heating process, several parameters regarding heat and mass transfer processes are needed, these include effective moisture diffusivity (D_{eff}), activation energy (E_a) and a dielectric model for palm fruit.

Theoretically, D_{eff} , E_a and temperature distribution of products under heating are essential for an effective microwave heating

system design. D_{eff} and E_a can be used to compute the temperature distribution in the palm fruit under microwave heating, using the dielectric properties of the palm fruit (ϵ) and the moisture ratio (MR) in the palm fruit [Aghbashlo et al., 2008; Minaer et al., 2011; Motevali et al., 2012;]. Our survey of the literature in this field revealed that there are no reported studies of the D_{eff} and E_a of the palm fruit under microwave heating, as presented in this paper, which makes this current research necessary.

THREE LAYER DIELECTRIC MODEL AND ANALYSIS EQUATIONS

Model

To describe the characteristics of microwave heating for palm fruit, a model needs to be developed which incorporates several key physical and electrical parameters. *Elaeis quineensis* Jacq. var. *Tenera* Palm was chosen because it is the most popular variety of palm fruit for cultivating. Since it has been reported that the palm is most productive at eight year old [Prasertsan and Prasertsan, 1996], the physical and electrical parameters were applied to palm fruit at this age to form the dielectric model. Based on the statistical data of the palm fruit dimensions [Owolarafe, 2007], a model with spherical shape was chosen for the palm fruit. Naturally, the palm fruit has four physical layers which include: the exocarp, mesocarp, shell, and kernel. The exocarp layer is very thin compared with the other three layers, hence it negligibly contributes to the heat and mass transport mechanisms in the palm fruit; thus, the exocarp layer was excluded from this study leaving this proposed dielectric model with three layers, where each layer was assumed to be homogeneous.

Physical content and dielectric properties

The three fruit layers (mesocarp, shell and kernel) and their physical contents by weight are shown in Figure 1. Palm is naturally contained in the mesocarp and the kernel. The shell layer, which is only 9.4% of the fruit,

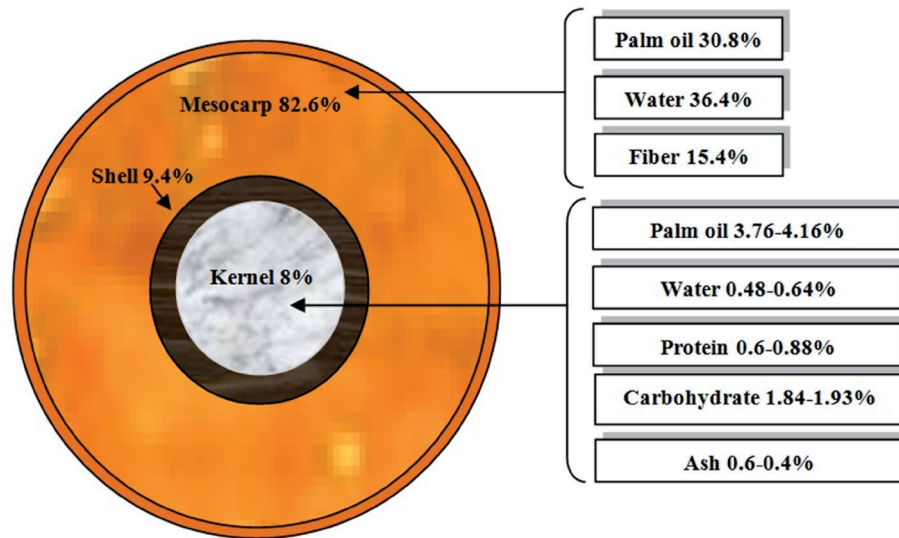


Figure 1. Physical content of *Elaeis quineensis* Jacq. var. *Tenera*.

protects the kernel and consists of only fiber. The kernel constitutes about 8% of the palm fruit and includes five components: oil, water, protein, carbohydrate, and ash [Choi and Okos, 1986; Narv et al., 2008]. The mesocarp is the largest layer of the fruit containing oil, water, and fiber. As shown in Figure 1, oil is contained mostly in the mesocarp layer [Choi and Okos, 1986].

To accurately calculate the temperature distribution in the palm fruit, the $\tilde{\epsilon}$ of each layer is required. The dielectric constant (ϵ'), the real part of $\tilde{\epsilon}$, relates to microwave energy stored in the fruit layer. The dielectric loss factor (ϵ''), the imaginary part of $\tilde{\epsilon}$, governs the energy conversion mechanism from electromagnetic waves to heat. A microwave frequency of 2.45 GHz was chosen for heating the palm fruit

because a high power microwave source at this frequency is easy to use and inexpensive to purchase. In addition, this 2.45 GHz source is more energy efficient compared to other signal sources operating at lower frequencies.

Table I shows the $\tilde{\epsilon}$ of each layer in *Elaeis quineensis* Jacq. var. *Tenera* [Pongsuwan et al., 2014]. The temperature-dependence equations for ϵ' and ϵ'' at 2.45 GHz of all three palm layers are formed with polynomial functions. The $\tilde{\epsilon}$ characteristics of the mesocarp and kernel layers are more sensitive with temperature than the shell layer. To predict the temperature distribution profile in the palm fruit, a three-layer dielectric model for the palm fruit is formed with the polynomial functions shown in Table I.

Table I. Dielectric equations of three layers of the palm fruit at 2.45 GHz.	
Layer	ϵ'
Kernel	$-1.560 \times 10^{-7} T^5 + 2.969 \times 10^{-5} T^4 - 1.975 \times 10^{-3} T^3 + 5.809 \times 10^{-2} T^2 - 0.720 T + 5.937$
Shell	$4.396 \times 10^{-8} T^5 - 4.614 \times 10^{-6} T^4 - 3.924 \times 10^{-5} T^3 + 1.620 \times 10^{-2} T^2 - 0.415 T + 4.060$
Mesocarp	$1.302 \times 10^{-7} T^5 - 2.658 \times 10^{-5} T^4 + 2.068 \times 10^{-3} T^3 - 7.435 \times 10^{-2} T^2 + 1.222 T + 1.947$
Layer	ϵ''
Kernel	$-6.288 \times 10^{-8} T^5 + 1.135 \times 10^{-5} T^4 - 7.335 \times 10^{-4} T^3 + 2.111 \times 10^{-2} T^2 - 0.256 T + 1.286$
Shell	$-3.276 \times 10^{-10} T^6 + 7.499 \times 10^{-8} T^5 - 6.352 \times 10^{-6} T^4 + 2.418 \times 10^{-4} T^3 - 3.966 \times 10^{-3} T^2 + 2.652 \times 10^{-2} T - 5.087 \times 10^{-2}$
Mesocarp	$3.750 \times 10^{-8} T^5 - 8.102 \times 10^{-6} T^4 + 6.605 \times 10^{-4} T^3 - 2.451 \times 10^{-2} T^2 + 0.408 T + 0.241$
T=Temperature (°C)	

Thermal property

To accurately predict the thermal characteristics of the microwave application for heating the palm fruit, the three following parameters, thermal conductivity (k), density (ρ), and specific heat capacity (C_p), were included in the model [Becker and Fricke, 1999]. To model thermal conductivity of the palm fruit at a specific temperature, $k_{Total}(T)$, thermal parameters of all physical contents in the palm fruit, as illustrated in Figure 1, were considered. This is described by,

$$k_{Total}(T) = \sum_i k_i(T) V_i(T) \quad (1)$$

where $k_i(T)$ and $V_i(T)$ are the thermal conductivity and the volume fraction of layer i (i is the mesocarp, kernel, or shell), respectively. The volume fraction is proportional to the mass fraction, $W_i(T)$, and density, $\rho_i(T)$, of layer i as shown by

$$V_i(T) = \frac{W_i(T)/\rho_i(T)}{\sum_i (W_i(T)/\rho_i(T))} \quad (2)$$

The density of the palm fruit, $\rho_{Total}(T)$, can be calculated from,

$$\rho_{Total}(T) = \left(\sum_i \frac{W_i(T)}{\rho_i(T)} \right)^{-1} \quad (3)$$

Assuming that each layer in the palm fruit is anisotropic and homogeneous, the thermal conductivity of each palm layer can be considered to be dependent on the heat flow direction. The mesocarp layer (as seen in Figure 1) is predominantly liquid containing water and oil except for a small layer of solid fiber. Let $V_M(T)$ and $V_f(T)$ be the average volume of all the contents in the mesocarp layer and the volume of fiber, respectively, therefore the proportion of fiber contained in the mesocarp layer is defined by $V_f(T)/V_M(T)$. Since the mesocarp layer mainly contains liquid, the thermal conductivity depends on the direction of heat flow. Hence, k_M , the thermal conductivity of

the mesocarp layer in the $W(m \cdot K)^{-1}$ unit, can be written as [Kopelman, 1966],

$$k_M = k_L \left[\frac{1 - \left(\frac{V_f(T)}{V_M(T)} \right)^{2/3}}{1 - \left(\frac{V_f(T)}{V_M(T)} \right)^{2/3} \left(1 - \left(\frac{V_f(T)}{V_M(T)} \right)^{1/3} \right)} \right] \quad (4)$$

In Equation (4), k_L is the thermal conductivity of the water and oil in the $W(m \cdot K)^{-1}$ unit. Finally, the specific heat capacity of the palm fruit, $C_{p,Total}(T)$, in the $J(kg \cdot K)^{-1}$ unit can be calculated by averaging specific heat capacity, $C_{p,i}(T)$, for all layers in the palm fruit given by

$$C_{p,Total}(T) = \sum W_i(T) C_{p,i}(T) \quad (5)$$

Computation approach

Electromagnetic field distribution

A rectangular cavity is normally chosen for microwave heating applications. Therefore, we have investigated the electromagnetic field distribution in the microwave-heated palm fruit by placing it in a rectangular cavity. Electromagnetic waves were generated from a 2.45 GHz magnetron. Let $\psi(r, \theta, \phi)$ be a wave function defined with the spherical coordinate (r, θ, ϕ) and γ be the wave propagation constant where $\gamma = \gamma_r + \gamma_\theta + \gamma_\phi$, thus the electromagnetic field distribution in the palm fruit can be described from Maxwell's equations by Equation (6) [Metaxas and Meredith, 1983; Geedipalli et al., 2007; Tang et al., 2002],

$$\begin{aligned} \nabla^2 \times \vec{E}(r, \theta, \phi) + \gamma^2 \vec{E}(r, \theta, \phi) = & \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \frac{\partial \psi(r, \theta, \phi)}{\partial r} \right\} + \\ & \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \sin \theta \frac{\partial \psi(r, \theta, \phi)}{\partial \theta} \right\} + \\ & \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi(r, \theta, \phi)}{\partial \phi^2} + r^2 \psi(r, \theta, \phi) \end{aligned} \quad (6)$$

The boundary condition of the Perfect Electric Conductor (PEC) was applied to the cavity and the walls of the waveguide.

No electric field in the normal direction of each PEC interface exists. This is given by Equation (7)

$$\bar{n} \times (\bar{H}_1 - \bar{H}_2) = 0 \quad (7)$$

where $\bar{n}$ represents the normal vector unit to the interface. Since the electric and magnetic field intensities at the interface between the two different mediums (air and the palm fruit surface) are continuous, the boundary conditions are

$$\bar{n} \times (\bar{H}_1 - \bar{H}_2) = 0 \quad (8)$$

$$\bar{n} \times (\bar{E}_1 - \bar{E}_2) = 0 \quad (9)$$

Finally, we assume that no electric field exists at the initial time t_0 , thus

$$E_r(t_0), E_\theta(t_0), E_\phi(t_0) = 0 \quad (10)$$

Volume heat generation $Q(r, \theta, \phi; t)$ obtained from the applied electric field is defined as a heating rate per unit area. It can be calculated from the magnitude of the electric field intensity ($|\bar{E}|^2$) at frequency (f). The ε' and the loss tangent ($\tan \delta$) of the palm fruit layers are related to $Q(r, \theta, \phi; t)$ as shown below [Tang et al., 2002; Ratanadecho et al., 2002],

$$Q(r, \theta, \phi; t) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' |\bar{E}|^2 \tan \delta \quad (11)$$

where ε_0 is the dielectric constant for free space.

Heat transfer equation

The microwave power absorbed in the palm fruit is linearly proportional to f , ε' , $\tan \delta$, and $|\bar{E}|^2$. According to Equation (10), this absorbed power converts to heat. An instantaneous temperature in the palm fruit, $T(r, \theta, \phi; t)$, can be obtained from the Fourier heat transfer equation as shown in Equation (12) [Geedipalli et al., 2007; Dincov and Parrott, 2004],

$$\frac{k}{\rho C_p} \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial T(r, \theta, \phi, t)}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \sin \theta \frac{\partial T(r, \theta, \phi, t)}{\partial \theta} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial T(r, \theta, \phi, t)}{\partial \phi^2} \right\} + \frac{Q(r, \theta, \phi, t)}{2\rho C_p} = \frac{\partial T(r, \theta, \phi, t)}{\partial t} \quad (12)$$

where T_a is the ambient temperature in Kelvin units and k is the thermal conductivity of the palm fruit in $W(m \cdot K)^{-1}$ units. The heat transfer analysis is considered only in the palm fruit. It does not include the space surrounding the palm fruit. To simplify the analysis process considerably, the boundaries of the palm fruit surface are considered as an insulated boundary (no heat between the system and surroundings). This can be defined by

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (13)$$

The internal temperature in the palm fruit at the initial time t_0 is

$$T(t_0) = T_0 \quad (14)$$

Effective moisture diffusivity

To analyze the characteristic of the drying rate, a simple diffusion model based on Fick's second law is applied to investigate how the moisture is transported in the palm fruit. Let D_{eff} be the effective moisture diffusivity in $m^2 s^{-1}$ units and M be the moisture content at arbitrary time. According to Fick's second law, the equation for the transport of moisture in palm fruit is as follows [Crank, 1975],

$$\frac{\partial(M)}{\partial t} = \nabla(\nabla D_{eff} M) \quad (15)$$

Since the model for the palm fruit is assumed to be spherical, the MR can be computed from [Liu and Bakker-Arkema, 1997; Senadeera et al., 2003; Motevali et al., 2012; Minaei et al., 2011],

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{\left[-n^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} t \right]} \quad (16)$$

where r is the radius of the sphere in meter units. The MR is computed from the summation of infinite terms. It is, however, suggested that all higher order terms in Equation (16), $n = 2, 3, \dots, \infty$ can be neglected as advocated by other researchers [Adu and Otten, 1996; Babalis and Belessiotis, 2004]. Hence Equation (16) can be simplified to [Babalis and Belessiotis, 2004; Motevali et al., 2012; Minaei et al., 2011],

$$MR \cong \frac{6}{\pi^2} e^{\left[\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} t \right]} \quad (17)$$

Applying the natural logarithm to both sides in Equation (17), one obtains MR

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} t \quad (18)$$

From Equation (18), a plot of (MR) and t gives a straight line with a slope of k_0 in Equation (19).

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (19)$$

Hence D_{eff} can be determined by applying the linear regression technique. The dependence of the D_{eff} on the temperature distribution in the palm fruit can be described with E_a governed by the Arrhenius equation as shown below [Babalis and Belessiotis, 2004; Maskan et al., 2002; Motevali et al., 2012; Minaei et al., 2011],

$$D_{eff} = D_0 e^{\left[\frac{-E_a}{RT} \right]} \quad (20)$$

where D_0 is the Arrhenius factor in $m^2 s^{-1}$ units and R is the gas law constant in $kJ(mol \cdot K)^{-1}$ units. Equation (20) can be rearranged to a linear function with T^{-1} by applying the logarithmic function as shown,

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (21)$$

From Equation (21), the slope k_1 of T^{-1} is

$$k_1 = -\frac{E_a}{R} \quad (22)$$

The linear regression analysis method was used to fit the equation to the experimental data with high R^2 to determine E_a .

Statistical analysis

The regression analysis was applied to determine the parameter E_a , D_0 and D_{eff} . To see if the calculations could fit with our model, they were verified by the correlation parameter (R^2). Meanwhile, the relevance between the computed and experimented MR s was tested with three statistical parameters, R^2 , Root Mean Square Error ($RMSE$) and Chi-square (χ^2) to indicate the accuracy of the parameters and the model for the MR of the palm fruit with four different microwave power levels. These parameters were computed by

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (MR_{pre,n} - MR_{exp,n})^2}{\sum_{n=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp,n})^2} \quad (23)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (MR_{pre,n} - MR_{exp,n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (MR_{exp,n} - MR_{pre,n})^2}{N - z} \quad (25)$$

where $MR_{exp,n}$ is the experimental moisture ratio of n^{th} data, $MR_{pre,n}$ is the predicted moisture ratio of n^{th} data, MR_{pre} is the mean value of $MR_{pre,n}$, N is the number of observations, and z is the number of constants in the drying model. High R^2 , low $RMSE$ and low χ^2 indicate a good fit [Caglar et al., 2009] hence our model was a good fit.

EXPERIMENT AND COMPUTATION METHODS

The palm fruit for our experiment were obtained from several local areas in Songkhla province, Thailand. Eight year old *var. Tenera* palm fruit were adopted. All the palm fruit were cut from several palm trees and experimented upon within 24 hours.

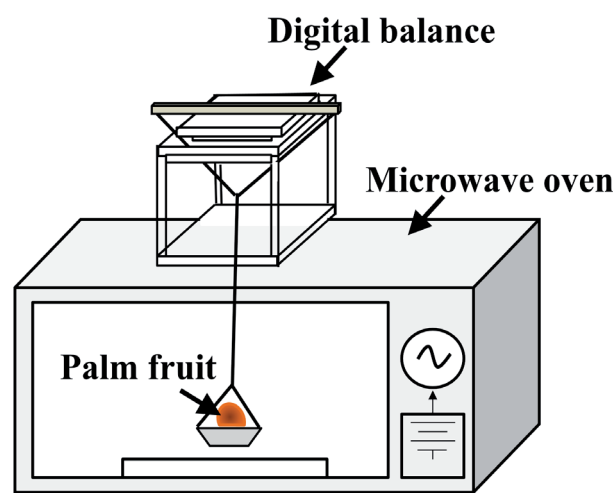


Figure 2. Experiment setup.

They had a length, width and weight of 40.14 ± 2.27 mm, 26.94 ± 3.25 mm and 15.34 ± 1.56 g, respectively. The initial moisture contents of the palm fruit were measured using a digital balance with 0.1 gram uncertainty by the method of AOAC standards [A. of O. A. Chemists, 1995]. The moisture content of the palm fruit ranged from 29.50 to 30.20 % wet basis, while the statistical mean and the standard deviation were 29.84 and 0.21, respectively, from 113 ripe palm fruit.

In this paper, a microwave oven with cavity dimensions of $485 \times 385 \times 280$ mm was used for heating the palm fruit. Four different microwave powers (160, 320, 480 and 800 W) at 2.45 GHz from a power-adjustable magnetron were applied to the rectangular waveguide to the fruits. In the experiment setup shown in Figure 2, the palm fruit was placed in a small container which was tied and hung with a digital balance for measuring weight. Since oil is mainly contained in the mesocarp layer, our interest lies in the temperature distribution characteristic of the mesocarp layer.

Temperature distribution

The temperature-dependent equations shown in Table I were applied to the three-layer dielectric model in the previous section.

The governed equations for computing the electrical field and temperature characteristic in Equations (6)-(14) were applied. The electric field distribution in the cavity at steady state was analyzed by Maxwell's equations. With the three-layer dielectric model for the palm fruit and the given boundary conditions for electric field and temperature, the electric field distribution in each palm layer was converted to determine $Q(r, \theta, \phi; t)$. The solutions were numerically computed using the Finite Element Method via COMSOL™ Multiphysics software. Figure 3 summarizes a flow diagram of the analytical detail for computing the temperature distribution in the palm fruit from the three-layer dielectric model.

D_{eff} and E_a

The three-layer dielectric model was applied to compute the temperature distribution. Subsequently the E_a and D_0 were derived, and these parameters were used to compute the MR of the palm fruit for the different microwave power levels. The flow diagram for this computation is illustrated in Figure 4. The diagram illustrated the coupling between the heat and mass transfer mechanisms. In Figure 4, the D_{eff} of the palm fruit is determined by Fick's second law by applying the experimental data of M and M_0 .

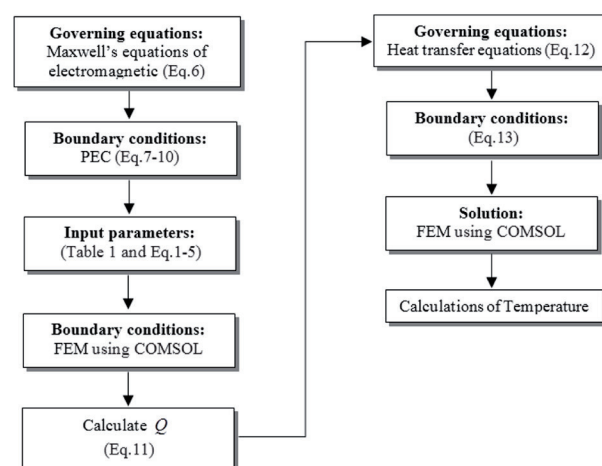


Figure 3. Flow diagram for temperature distribution calculation.

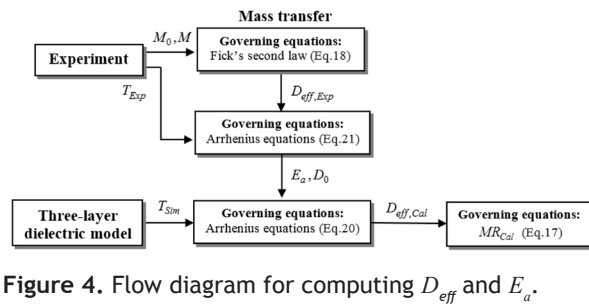


Figure 4. Flow diagram for computing D_{eff} and E_a .

Based on the measured temperature and the D_{eff} estimated from Fick's second law, two parameters of the Arrhenius model (E_a , D_0) shown in Equation (21) were evaluated. Finally the values of MR for the palm fruit for different temperatures were computed using Equation (18). The computed and measured MR were compared to validate the D_{eff} and E_a .

RESULTS AND DISCUSSION

Temperature distribution

Figure 5 shows the simulated and measured temperatures of the palm fruit heated with a 160 W microwave power source for 14 minutes. The temperatures in Celsius units were measured with a FLIR i3 infrared thermal imaging camera. The measurement accuracy of the camera is within $\pm 2\%$ of a reading. It is shown that the measured results were good and agreed with the simulated ones. To further validate the three-layer dielectric model, we measured

the instantaneous temperature of the palm fruit at four microwave power levels. The temperature measurements were performed every minute. Since high microwave power can burn the palm fruit quicker than low power, the final measurement results for four different powers were different. At each sampling time, temperatures measured at eight positions around the middle area of the mesocarp layer (shown in Figure 5) were recorded. These 8 spatial temperatures were averaged and the output was called a spatial temperature mean. To reduce measurement variation, the experiment was performed with three different palm fruits for each recording time. Thus the instantaneous temperature in the mesocarp layer was obtained from the average value of three spatial mean temperatures.

The experiment temperatures obtained by averaging temperatures of eight positions in the mesocarp layer compared with the average eight temperatures in the mesocarp layer computed from the dielectric model are plotted in Figure 6. The temperature characteristic in the mesocarp layer after applying four different power levels (160, 320, 480 and 800 W) were plotted with the drying time of 14, 9, 7 and 3 minutes, respectively. The increase of temperature represents the increase of absorbed power that appeared in the form

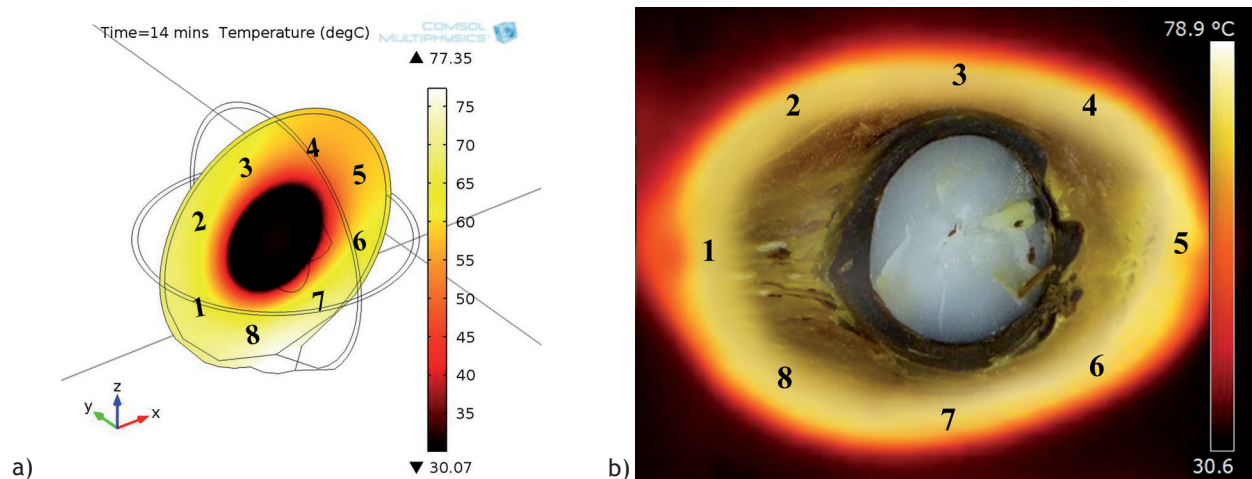


Figure 5. Temperature distribution in the palm fruit heated with the microwave source (14 minutes @160 W) obtained from (a) simulation and (b) experimentation.

of $Q(r, \theta, \phi; t)$. The absorbed power is proportional to $|\vec{E}|^2$, f and ε'' as governed by Equation (11). The temperature in the palm fruit increased more rapidly with higher microwave power compared with lower microwave power, which is relevant to the nonlinear relationship shown in Equation (11). The measured temperature distribution in the palm fruit has excellent agreement with the model results determined from Equation (12). Correlation analysis was applied to both sets of temperatures shown in Figure 6 for microwave power at 160, 320, 480 and 800 W. The correlation coefficients computed between these two data sets are 0.997-0.999, which are excellent correlations. This certainly proves the validity of the three-layer dielectric model for the palm fruit and the time-dependent dielectric functions presented in Table I.

D_{eff} and E_a

It is well known that the D_{eff} is a critical parameter to characterize the diffusion properties of fluid molecules in palm fruit from high to low concentration regions. The D_{eff} of the palm fruit can be applied to predict the MR in the palm fruit under microwave heat. In this paper, we determined D_{eff} from the experimented MR . The measured weights of all the experiment palm fruit (before and after the microwave heating) were applied to compute the MR for each sampling time. Once the MR is

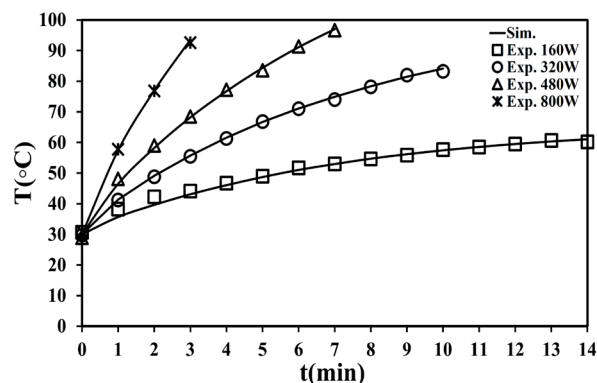


Figure 6. Comparison between measured and computed temperatures.

known, the instantaneous D_{eff} values can be determined by solving Equation (18). Figure 7 shown plots of the D_{eff} from the MR obtained from the experiment. The D_{eff} increases with temperature since the water molecules in the palm fruit diffuse quicker at high temperature. The D_{eff} of palm fruit increases with microwave power, which is also commonly found in other agricultural products [Al-mahasneh et al., 2007; Minaei et al., 2011; Motevali et al., 2012].

Based on the D_{eff} shown in Figure 7, the parameters E_a and D_0 were obtained by the applying the linear regression technique to the Arrhenius equation model shown in Equation (21). Table II shows the values of E_a and D_0 for four different microwave powers used in the palm fruit. The R^2 values are obtained close to 1, which demonstrates a good fit with the Arrhenius model. The E_a indicates the required energy to remove moisture in the palm fruit. The obtained E_a of the palm fruit ranges from 31.06 to 48.91 $\text{kJ}(\text{mol})^{-1}$ for the different microwave powers. These E_a are in accordance with the E_a for food and agricultural crops which lie in the 12.7-110 $\text{kJ}(\text{mol})^{-1}$ range [Aghbashlo et al., 2008]. In addition, the D_0 is similar to research on the microwave-convective drying of garlic cloves [Sharma and Prasad, 2004].

Validation Results

The derived E_a and D_0 data shown in Table II was used to compute the MR of the palm fruit. Comparisons between the computed and experimental MR were made. To validate the results, various statistical analysis techniques were performed.

Power (W)	E_a ($\text{kJ}(\text{mol})^{-1}$)	D_0 (m^2s^{-1})	R^2
160	48.910	101.413	0.980
320	47.880	61.087	0.956
480	34.680	0.795	0.913
800	31.060	0.643	0.964

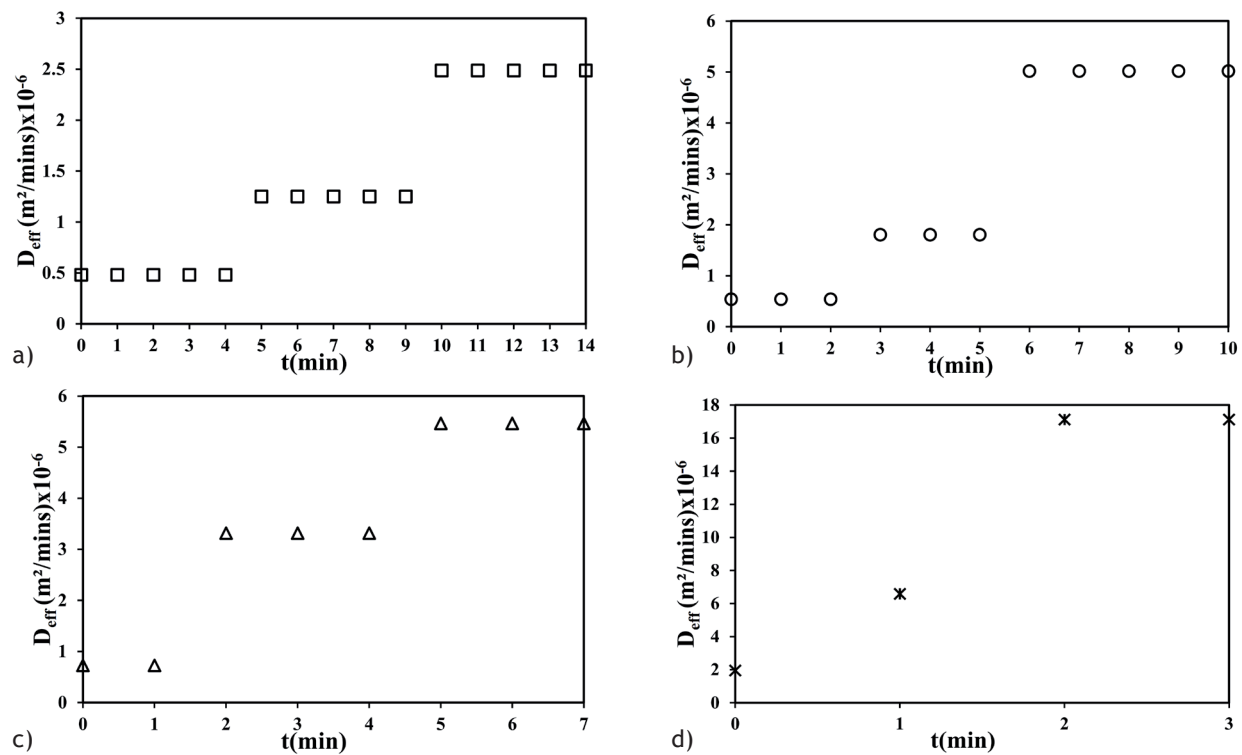


Figure 7. D_{eff} versus time in minutes (a) 160 W, (b) 320 W, (c) 480 W, and (d) 800 W.

The instantaneous MR for the different microwave powers were computed from Equation (17) with the computed D_{eff} . The MR shown in Figure 8 decreased with time. Increasing the microwave power will increase the heat energy produced and, hence, accelerate the mechanism of moisture transport and vaporization. As palm fruit is porous, the moisture content (29.84% wet basis) in the palm fruit continuously decreased from the initial moisture content

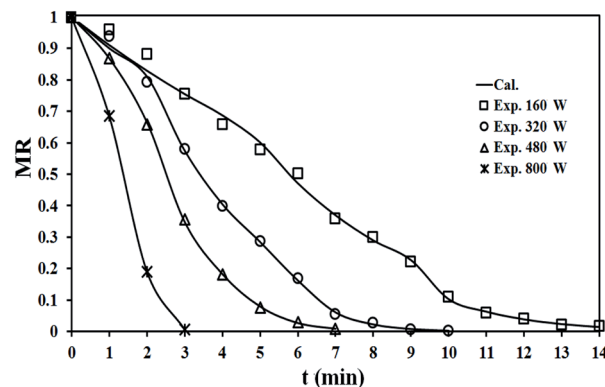


Figure 8. The value of MR the palm fruit with four different microwave power levels.

until it reached the final palm fruit moisture content of 3.34, 5.09, 5.43, and 5.72% when heated at 160, 320, 480 and 800 W, respectively, while the drying times were 10 min, 6 min, 4 min, and 2 min, respectively. These results are the proper moisture levels in the process of extracting crude oil [Khumhom and Arjarn, 2008]. These MR were compared with the experimental ones as shown in Figure 8 where it is shown that both data sets are highly correlated. The statistical parameters summarized in Table III shows $R^2 > 0.996$, $RMSE < 1.336 \times 10^{-2}$ and $\chi^2 < 1.963 \times 10^{-4}$. These results confirm excellent agreement.

Table III. Statistical parameters for correlation analysis applied to the model and the experiment results of MR .

Power (W)	R^2	$RMSE$	χ^2
160	0.996	2.303×10^{-2}	5.683×10^{-4}
320	0.999	1.336×10^{-2}	1.963×10^{-4}
480	0.999	4.331×10^{-3}	2.144×10^{-5}
800	1.000	1.461×10^{-5}	2.846×10^{-10}

CONCLUSION

The D_{eff} , E_a and D_0 the three-layer dielectric model for microwave heating application of palm fruit at 2.45 GHz have been presented. We proposed the three-layer dielectric model which is based on the physical structure of the palm fruit for the heat transfer mechanism. It consists of three dielectric layers being the mesocarp, shell and kernel. The model can accurately predict the temperature in the palm fruit. For the mass transport mechanism, the D_{eff} , D_0 and E_a reported in this paper are the key parameters for predicting the MR in the palm fruit. We believe that our findings can be applied for designing an energy-efficient microwave heating system for the palm fruit.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is supported by the Thai Research Fund (Grant no. RSA5680056), Prince of Songkla Graduate Studies Grant and the Department of Computer Engineering, Prince of Songkla University.

REFERENCES

- A. of O. A. Chemists. (1995) Official methods of analysis of AOAC International, AOAC Washington.
- Adu B. and Otten L. (1996) "Diffusion characteristics of white beans during microwave drying". *Journal of Agricultural Engineering Research*. 64(1), pp.61-69.
- Aghbashlo M., Kianmehr M. and Samimi-Akhijahani H. (2008) "Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae)". *Energy Conversion and Management*. 49(10), pp. 2865-2871.
- AL-Mahasneh Majdi A., Rababah Taha M., Al-Shbool Mohammad A. and Yang W. (2007) "Thin-layer drying kinetics of sesame hulls under forced convection and open sun drying". *Journal of Food Process Engineering*. 30, pp. 324-337.
- Babalís S. J. and Belessiotis V. G. (2004) "Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs". *Journal of Food Engineering*. 65(3), pp. 449-458.
- Basiron Y. (2005) "Palm oil" in *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, John Wiley & Sons, Inc.
- Becker B. R. and Fricke B. A. (1999) "Food thermo physical property models". *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 26(5), pp. 627-636.
- Caglar A., Togrul I.T. and Togrul H. (2009) "Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying". *Food Bioprod. Process*. 87, pp. 292-300.
- Cheng S. F., Nor L. M. and Chuah C. H. (2011) "Microwave pretreatment: A clean and dry method for palm oil production". *Industrial Crops and Products*. 34(1), pp. 967-971.
- Choi Y. and Okos M. R. (1986) "Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods". *Food Engineering and Process applications*. 1, pp. 93-101.
- Chow M. C. and Ma A. N. (2007) "Processing of fresh palm fruits using microwaves". *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 40(3), pp. 165-173.
- Crank J. (1975) "The mathematics of diffusion". Oxford, Clarendon Press.
- Dinov D. D., Parrott K. A. and Pericleous K. A. (2004) "Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating". *Journal of Food Engineering*. 65(3), pp. 403-412.
- Geedipalli S. S. R., Rakesh V. and Datta A. K. (2007) "Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens". *Journal of Food Engineering*. 82(3), pp. 359-368.
- Kopelman I. J. (1966) "Transient heat transfer and thermal properties in food systems". Michigan State University. Dept. of Food Science.

- Khumhom S. and Arjharn W. (2008) "Study of application of belt type microwave oven in oil palm sterilization process". M. Eng. Thesis, Suranaree University of Technology.
- Liu Q. and Bakker-Arkema F. W. (1997) "Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development". *Journal of Agricultural Engineering Research*. 66(4), pp. 275-280.
- Maskan A., Kaya S. and Maskan M. (2002) "Hot air and sun drying of grape leather (pestil)". *Journal of Food Engineering*. 54(1), pp. 81-88.
- Maskan M. (2000) "Microwave/air and microwave finish drying of banana". *Journal of Food Engineering*. 4(2), pp. 71-78.
- Metaxas A. C. and Meredith R. J. (1983) "Industry Microwave Heating". London, U. K. Peter Peregrinus.
- Minaer S., Motevali A., Najafil G. and Seyedi S.R.M. (2011) "Influence of drying methods on activation energy, effective moisture diffusion and drying rate of pomegranate arils (*Punica Granatum*)". *Australian Journal of Crop Science*. 6(4), pp. 584-591.
- Mohd. Halim Shah. I., Mustafa Kamal A. A. and Noor Azian M. (2009) "A systems approach to mathematical modelling of sterilization process in palm oil mill". *European Journal of Scientific Research*. 35(4), pp. 583-592.
- Motevali A., Abbaszadeh A., Minaei S., Khoshtaghaza MH. and Ghobadian B. (2012) "Effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in Thin-layer drying of jujube (*Zizyphus jujube* mill)". *Journal of Agricultural Science and Technology*. 14, pp. 523-532.
- Narvez P. C., Rinc n S. M., Castaeda L. Z. and Nchez F. J. S. (2008) "Determination of some physical and transport properties of palm oil and of its methyl esters". *Latin American Applied Research*. 38(1), pp. 1-6.
- Owolarafe O. K., Olabige M. T. and Faborode M. O. (2007) "Physical and mechanical properties of two varieties of fresh oil palm fruit". *Journal of Food Engineering*. 78(4), pp. 1228-1232.
- Poku K. (2002) "Small-scale palm oil processing in Africa". Food & Agriculture Organization of the UN (FAO).
- Pongsuwan K., Pamornak B., Tongurai C. and Chongcheawchamnan M. (2014) "Complex permittivity of fully ripe palm fruit and its application for microwave heating". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 21(3), pp. 1415-1423.
- Prasertsan S. and Prasertsan P. (1996) "Biomass residues from palm oil mills in Thailand: An overview on quantity and potential usage". *Biomass and Bioenergy*. 11(5), pp. 387-395.
- Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M. (2002) "Influence of irradiation time, particle sizes, and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials". *Journal of Heat Transfer*. 124, pp. 151-161.
- Senadeera W., Bhandari B. R., Young G. and Wijesinghe B. (2003) "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying". *Journal of Food Engineering*. 58(3), pp. 277-283.
- Sharma G. P. and Prasad S. (2004) "Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying". *Journal of Food Engineering*. 65, pp. 609-617.
- Sukaribin N. and Khalid K. (2009) "Effectiveness of sterilization of oil palm bunch using microwave technology". *Industrial Crops and Products*. 30(2), pp. 179-183.
- Sumathi S., Chai S. P. and Mohamed A. R. (2008) "Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(9), pp. 2404-2421.
- Tang J., Feng H. and Lau M. (2002) "Microwave heating in food processing". *Advances in Bioprocessing Engineering*. 1, pp. 1-44.