

การตรวจสอบข้อสอบด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก



นายวิทวัส วสุเสถียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2566

CONTAMINATED RICE INSPECTION BY USING DIELECTRIC
PROPERTY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การตรวจสอบข้อผิดพลาดด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร. อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ




(รองศาสตราจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนเสกฐ์ ทศศิริพัฒน์)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำราญ สันतालุนย์)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิตพงศ์ เวชไธสงค์)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิฑวัส วสุเสถียร : การตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก
(CONTAMINATED RICE INSPECTION BY USING DIELECTRIC PROPERTY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภณ, 107 หน้า.

คำสำคัญ: ข้าวปลอมปน/การตรวจสอบข้าว/คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งในประเทศไทย โดยเฉพาะข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวที่มีความนุ่ม อร่อย และมีกลิ่นหอมของใบเตยอ่อน ๆ ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นที่ต้องการอย่างมากทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศ แต่ราคาของข้าวพันธุ์นี้จะสูงกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นโดยประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีการปลอมปนข้าวสายพันธุ์อื่นลงไปเพื่อโก่งราคาขาย ข้าวที่นิยมนำมาปลอมปนหลัก ๆ จะมีข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าไห้ ซึ่งวิธีการตรวจสอบข้าวปลอมปนในปัจจุบันจะมีหลายวิธีเช่น การใช้โอโอดิน ซึ่งเป็นการตรวจสอบที่เกิเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปริมาณของอะมิโลสในข้าวกับโอโอดินที่ผสมกับน้ำยาตรวจสอบ การคัดจากสี หรือรูปทรงไม่ว่าจะใช้เครื่องจักรคัดแยก หรือใช้การสังเกตจากผู้เชี่ยวชาญ การหุงแล้วชิมซึ่งใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารขนาดเล็กเนื่องจากไม่ต้องมีการลงทุนที่สูงโดยใช้เพียงผู้เชี่ยวชาญในการชิมรสชาติ และการสุ่มตรวจ DNA ของข้าว ซึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือการตรวจสอบ DNA ของข้าวซึ่งสามารถทราบชนิดพันธุ์ของข้าวที่สุ่มมาตรวจสอบได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ผลตรวจสอบที่ได้จะเป็นเพียงผลตรวจสอบข้าวที่ได้จากการสุ่ม 1 กำมือจากทั้งหมด และยังใช้เวลาตรวจสอบที่ค่อนข้างนานอีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง จึงนิยมใช้ตรวจสอบข้าวที่จะทำการส่งออกเท่านั้น ในปัจจุบันได้มีการวิจัย และพัฒนาวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบข้าวปลอมปนอยู่หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาใช้น้ำยาตรวจสอบแบบโอโอดินให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือแม้แต่การตรวจสอบด้วยการประมาณผลจากภาพถ่าย แต่ก็ยังอยู่ในระหว่างการวิจัย และพัฒนาต่อไป ซึ่งผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีต้นแบบที่จะใช้ในการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยวิธีอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้ได้ง่าย และเป็นวิธีใหม่ ซึ่งจากการศึกษาปรีทศวรรณกรรมทำให้เห็นว่าการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) นั้นมีความเป็นไปได้ตามทฤษฎี เนื่องจากวัสดุทุกชนิดในโลกนี้จะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวไม่ว่าจะเป็นวัสดุประเภทเดียวกันแต่ต่างชนิดกัน ซึ่งข้าวแต่ละชนิดกันก็จะต้องมีความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเนื่องจากว่าสารอาหารต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโปรตีน ไขมัน หรือคาร์โบไฮเดรตประเภทต่าง ๆ ที่มีอยู่ข้าวแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน ซึ่งสารอาหารเหล่านี้ก็มีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเฉพาะตัวเช่นกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจากการใส่สาร

ละลายน้ำเกลือเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อให้ตัวอย่างทดลองมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดได้ และเป็นการเพิ่มความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวปloomปนมีความแตกต่างจากข้าวที่ไม่ได้มีการปloomปนมากขึ้น การทดลองจะใช้ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นข้าวอ้างอิง เปรียบเทียบกับข้าวปloomปน โดยใช้ข้าวหอมมะลิ 105 ผสมกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเสาไห้ ในอัตราส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าสามารถตรวจสอบข้าวปloomปนได้จริง ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นต้นแบบเพื่อนำไปใช้พัฒนาต่อยอดสำหรับทำระบบ หรือนวัตกรรมใหม่ ๆ สำหรับการตรวจสอบข้าวปloomปนได้



สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา วิภาวี วัฒนสิทธิ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

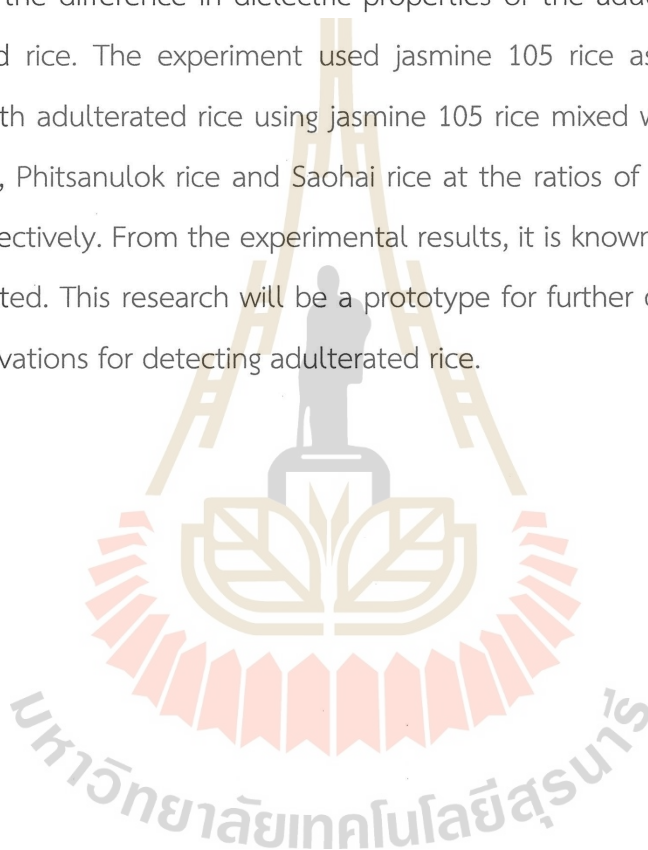
WITTAWAT WASUSATHIEN : CONTAMINATED RICE INSPECTION BY USING DIELECTRIC PROPERTY.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHANCHAI THONGSOPA, 107 PP.

KEYWORD : CONTAMINATED RICE/RICE INSPECTION/DIELECTRIC PROPERTIES

Rice is one of the important economic crops in Thailand, especially jasmine rice 105, which is soft, delicious and has a mild pandan leaves aroma. Jasmine 105 rice is in high demand both in Thailand and other countries, but the price of this rice is about 30 percent higher than other rice cultivars, causing adulteration of other rice cultivars to cheat the selling price. The main types of rice that are commonly used for adulteration with Jasmine 105 rice are Hompathum rice, Gorkor79 rice, Phitsanulok rice and Saohai rice. Currently, there are several methods for detecting the contaminated rice as follows: Iodine test which is to observe the color that occurs from the reaction between the amount of amylose in rice and iodine mixed with the chemical reagent. Separation from colors or shapes, whether using a sorting machine or using observation from experts. Tasting, which is commonly used in the small-scale food industry, due to it does not require high investments by using only expert tastings. Rice DNA testing, which is the most effective way to check rice DNA, which can know the rice cultivars of rice sample with 100 percent accuracy, but the result is only the result of a random handful of rice from all and it also takes a long time to check and has a high cost. Therefore, it is commonly used to inspect rice that will be exported only. Currently, there are several research on the detection of adulterated rice in many ways, such as the development of reagent for iodine method to be more effective or even inspecting by estimating results from photographs, but they are still under research and further development. The researcher has foreseen the problems that occurred and has an idea to develop prototype of new method that can be used to inspect contaminated rice with high efficiency and easy to use. From the review of the literatures, it was found that the detection of adulterated rice by dielectric properties was theoretically

possible. Because every material in this world is unique, whether it is the same type of material. Therefore, each type of rice must have different dielectric properties, due to the various nutrients such as protein and carbohydrates contained in each rice variety are different which nutrients also have unique dielectric properties. This research used dielectric properties with adding saline solution to inspect contaminated rice. The saline solution will qualify the sample for use with the measuring equipment and increase the difference in dielectric properties of the adulterated rice from the unadulterated rice. The experiment used jasmine 105 rice as a reference rice by comparing with adulterated rice using jasmine 105 rice mixed with Hompathum rice, Gorkor79 rice, Phitsanulok rice and Saohai rice at the ratios of 10, 20, 30, 40 and 50 percent, respectively. From the experimental results, it is known that adulterated rice can be detected. This research will be a prototype for further development towards the new innovations for detecting adulterated rice.



School of Electronic Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature*Wittawat*.....
Advisor's Signature*T. Chanohi*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ และด้านการปฏิบัติจากบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภาก ซึ่งเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คอยให้คำปรึกษา แนะนำทั้งทางด้านทฤษฎี และการดำเนินงาน อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้ทำงานวิจัยนี้ มาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนเสฏฐ์ ทศดิกรพัฒน์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญส่ง สุตะพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำราญ สันทาลุนัย อ. ดร. มาโนทย์ มาปะโท และ อ. ดร. ศุภวัฒน์ คชประดิษฐ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยช่วยให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จลุล่วง รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมต่าง ๆ คุณกัญญา พับโพธิ์ เลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยช่วยเหลือในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างที่ศึกษาอยู่จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางวิชาการในด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอขอบคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของข้าพเจ้าทุกท่านที่คอยให้การอบรมเลี้ยงดู และคอยให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดี อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถประสบความสำเร็จในการศึกษาได้ สุดท้ายนี้ สำหรับความดีความชอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าจนสามารถสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	ต
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	4
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	10
2 ความเป็นมาของปัญหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไดอิเล็กตริก และอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริก.....	12
2.1 กล่าวนำ.....	12
2.2 ความเป็นมาของปัญหาของราคาข้าวที่เกิดจากการปลอมปน.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการตรวจพันธุ์ข้าว และข้าวที่ผสมกับข้าวต่างสายพันธุ์ด้วย ค่าไดอิเล็กตริก.....	18
2.3.1	ลักษณะต่าง ๆ ของข้าวและการผสมข้าวที่ทำขายกันตามท้องตลาด	18
2.3.2	ทฤษฎีพื้นฐานของค่าไดอิเล็กตริก.....	20
2.3.3	ข้อเปรียบเทียบระหว่างการตรวจสอบด้วยไดอิเล็กตริกกับวิธีการ ตรวจสอบแบบอื่นในการตรวจสอบข้าวที่มีการผสมต่างพันธุ์.....	29
2.4	ผลกระทบที่เกิดขึ้นของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า	34
2.5	ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริก	42
2.6	การประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร.....	44
2.7	แรงระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ในข้าว และเกลือเมื่อละลายในน้ำ	42
2.8	สรุป.....	42
3	การติดตั้งอุปกรณ์ และตั้งค่าโปรแกรมวัดค่า เทคนิคการผสมน้ำเกลือในข้าว และวิธีการ วัดค่าไดอิเล็กตริก.....	51
3.1	กล่าวนำ.....	51
3.2	การติดตั้งเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริก และการสอบเทียบอุปกรณ์.....	51
3.2.1	การติดตั้งเครื่องมือวัด และการทำงานของเครื่องมือ	51
3.2.2	การสอบเทียบอุปกรณ์ (Calibration)	54
3.2.3	การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก	59
3.3	สรุป.....	63
4	การทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด ข้าวบดละเอียดผสมน้ำเกลือ และข้าว ปลอมปนบดละเอียดผสมน้ำเกลือ พร้อมเปรียบเทียบผลการวัด.....	64

สารบัญ (ต่อ)

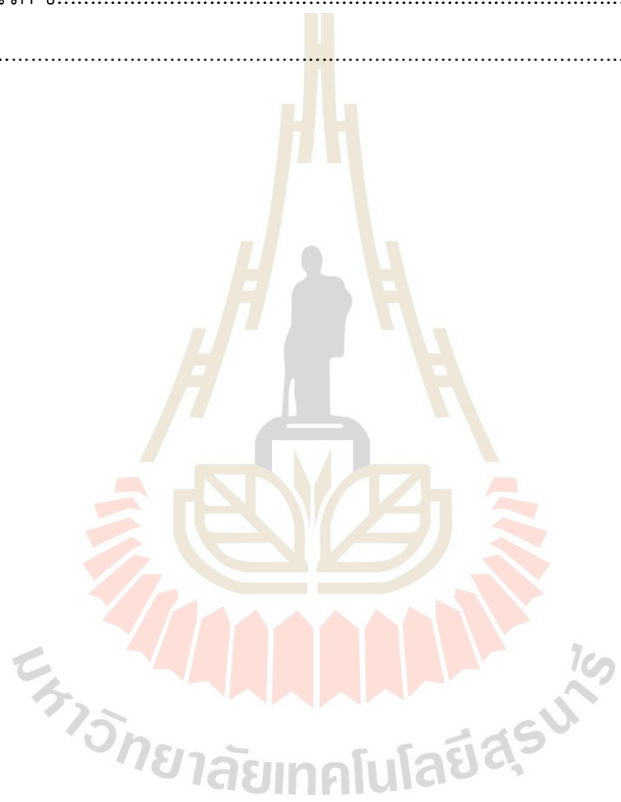
หน้า

4.1	กล่าวนำ.....	64
4.2	การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด.....	65
4.2.1	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด	65
4.2.2	วิเคราะห์ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด	67
4.3	การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนบดละเอียดผสมน้ำเกลือ	70
4.3.1	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	70
4.3.2	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	72
4.3.3	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	74
4.3.4	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวเส้าไห้ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	76
4.3.5	วิเคราะห์ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปน.....	77
4.4	สรุป.....	91
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	92
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์	92
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ	93
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	93
	รายการอ้างอิง.....	94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก	98
ภาคผนวก ข.....	100
ประวัติผู้เขียน	107

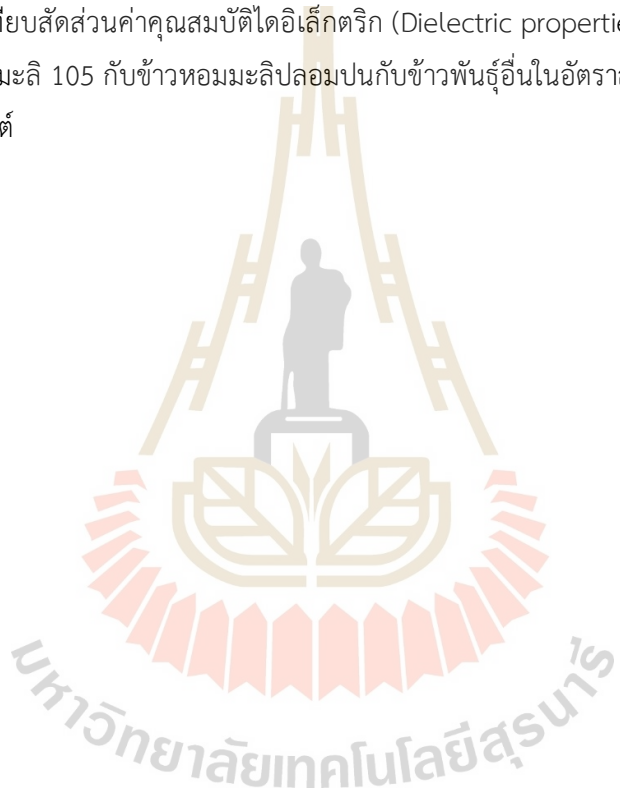


สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ราคาขายส่งข้าวเปลือกเจ้า นาปรัง ปี 2563	16
2.2 ราคาขายส่งข้าวเปลือกหอมมะลิ ปี 2563	17
2.3 ราคาขายส่งข้าวเปลือกปทุมธานี นาปรัง ปี 2563	17
2.4 ความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กทริกกับข้าวของตัวทำละลาย	20
2.5 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor) กับความถี่ของน้ำที่อุณหภูมิ 20° C	26
2.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับสมการของ Debye ที่ relaxation frequency ของน้ำในอุณหภูมิต่างกัน	26
2.7 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor) กับความถี่ของน้ำที่อุณหภูมิ 50° C	28
2.8 การจัดประเภทของข้าวและเนื้อสัมผัสตามปริมาณอะมิโลส	30
4.1 ความชื้นของข้าวบดละเอียดแต่ละชนิดพันธุ์	66
4.2 เปรียบเทียบอัตราส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ของข้าวบดละเอียดสำหรับการทดลอง	69
4.3 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์	81
4.4 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์	82
4.5 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 30 เปอร์เซ็นต์	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6	84
เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์	
4.7	85
เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 30 เปอร์เซ็นต์	



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบรายได้ 5 พืชเศรษฐกิจหลักของไทย	15
2.2	คุณลักษณะของข้าวทางกายภาพ และทางเคมี	16
2.3	โครงสร้างทางเคมีของสารระเหย 2-acetyl-1-pyrroline	19
2.4	การจัดเรียงประจุตามทิศทาง Polarization ในสนามไฟฟ้า	23
2.5	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) ของวัสดุตามสมการ Debye relaxation	25
2.6	แผนภาพ Cole-Cole ของวัสดุตามสมการ Debye relaxation	25
2.7	การตรวจสอบปริมาณอะมิโลสจากสีด้วยสารละลายไอโอดีน	30
2.8	เครื่องสำหรับใช้คัดแยกสีเมล็ดข้าวโดยการดีดออก	31
2.9	ตัวอย่างการตรวจสอบพันธุกรรมของข้าว	32
2.10	ตัวอย่างการวิเคราะห์รสชาติของข้าวด้วยการชิม	33
2.11	ทิศทางของไดโพลโมเมนต์	35
2.12	สเปกตรัมของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ที่ความถี่ต่าง ๆ ทั้งในกลไก Relaxation และ Resonance	36
2.13	Electronic polarization ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าไปแยกกลุ่มอิเล็กตรอนออกจากนิวเคลียส	37
2.14	ไดโพลโมเมนต์ของสารสองชนิด ได้แก่ น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์	38
2.15	การเกิด Ionic polarization ใน NaCl โดย A เป็นการจับตัวของผลึก NaCl เมื่อไม่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า และ B เป็นการจับตัวของผลึก NaCl เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า	39
2.16	การวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค Open-end coaxial probe	42
2.17	การวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค Parallel plate	43
2.18	การวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค Free space	44
2.19	โครงสร้างโมเลกุลของกลูโคสที่ละลายในน้ำ	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.20	โครงสร้างโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตต่าง ๆ	47
2.21	โครงสร้างโมเลกุลของ sodium chloride	48
2.22	โครงสร้างโมเลกุลของ sodium chloride ที่ละลายในน้ำ	48
3.1	พื้นที่หน้าตัดของหัว Open-end coaxial probe ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	53
3.2	หัว Open-end coaxial probe ชนิด High temperature probe	53
3.3	การต่อ Network analyzer และคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน	54
3.4	การสอบเทียบโพรบด้วย Air/short/water	55
3.5	หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม N1500A materials measurement suite	56
3.6	ตัวเลือกในหัวข้อ Calibration	57
3.7	หน้าจอกำหนดช่วงความถี่ กำลังส่ง และจำนวนจุดที่วัด	57
3.8	หน้าจอกำหนดวิธีการสอบเทียบ	58
3.9	การสอบเทียบหัววัด Open-end coaxial probe ชนิด High temperature	58
3.10	เครื่องบดสมุนไพรงำลังสูง	60
3.11	ข้าวบดละเอียดหลังจากร่อนผ่านฟیلเตอร์แล้ว	61
3.12	ปริมาณการผสมน้ำ และเกลือในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์	61
3.13	การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวด้วย Open-end coaxial probe	62
3.14	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอุณหภูมิ 30 องศาจากสมการของ Debye	62
4.1	รูปถ่ายเปรียบเทียบลักษณะของเม็ดข้าวทั้งขนาด สี และรูปทรงของข้าวที่นำมาทดลอง	66
4.2	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวบดละเอียด โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมเมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)	70
4.4 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 เมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)	73
4.5 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกเมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)	75
4.6 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวเสาไห้เมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)	77
4.7 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์	86
4.8 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์	87

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดโอดีเล็คทริก และ ค่าการสูญเสียไดโอดีเล็คทริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 30 เปอร์เซ็นต์	88
4.10	กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดโอดีเล็คทริก และ ค่าการสูญเสียไดโอดีเล็คทริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์	89
4.11	กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดโอดีเล็คทริก และ ค่าการสูญเสียไดโอดีเล็คทริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์	90



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

IEEE	=	institute of electrical and electronics engineers
DNA	=	deoxyribonucleic acid
ppm	=	parts per million
VNA	=	vector network analyzer
2AP	=	2-acetyl-1-pyrroline
RF	=	radio frequency
DC	=	direct current
AC	=	alternating current
IRRI	=	international rice research institute
GMO	=	genetically modified organism
ISM	=	industrial sciences medicine
DI	=	deionized
ϵ'	=	dielectric constant
ϵ''	=	dielectric loss factor
ϵ_r	=	Relative dielectric
ϵ_0	=	absolute permittivity
ϵ_s	=	Static dielectric
ϵ_∞	=	high frequency dielectric constant

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ϵ''_d	=	dipolar dielectric loss factor
ϵ''_σ	=	ionic dielectric loss factor
f	=	frequency
Γ	=	Reflection coefficient
τ	=	Relaxation time
ω	=	angular frequency
σ	=	conductivity
ρ	=	density
C_p	=	specific heat
E	=	electric field
d_p	=	penetration depth
λ_0	=	free space wavelength
c	=	speed of light
α_d	=	dipolar polarizability
α_e	=	electronic polarizability
α_i	=	ionic polarizability
\vec{p}	=	electric dipole moment
q	=	electric charge
r	=	finite distance

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

p_0	=	permanent dipole moment
\vec{p}_d	=	dipolar dipole moment
\vec{p}_e	=	electronic dipole moment
\vec{p}_i	=	ionic dipole moment
T	=	temperature
k	=	Boltzmann statistics
N	=	number of molecules per unit volume
χ	=	electric susceptibility

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งในประเทศแถบเอเชียโดยเฉพาะประเทศไทย ประเทศในแถบเอเชียเป็นแหล่งที่มีภูมิอากาศที่เหมาะสมกับการปลูกข้าวมากทำให้หลาย ๆ ประเทศ เช่น ไทย เวียดนาม กัมพูชา และพม่า มีการส่งออกข้าวเป็นรายได้หลัก ในประเทศไทยมีข้าวอยู่หลายประเภทโดยแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักคือ ข้าวหอมมะลิ ข้าวขาว ข้าวเหนียว และข้าวเพื่อสุขภาพ (ข้าวสี) โดยข้าวที่เป็นผลผลิตส่งออกมากที่สุดในประเทศไทย มีรสชาติหอมนุ่ม และมีราคาที่ค่อนข้างสูงคือข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งจะมีกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์คล้ายกับกลิ่นของใบเตยไม่เหมือนข้าวชนิดอื่น และปลูกได้ดีเฉพาะประเทศไทย อีกทั้งเป็นที่ต้องการในท้องตลาดของประเทศเนื่องจากเป็นข้าวที่หอมนุ่ม และรสชาติอร่อยทำให้ครัวเรือนต่าง ๆ นิยมซื้อมาประกอบอาหารที่บ้าน แต่เนื่องด้วยราคาที่สูงกว่าข้าวชนิดอื่น ๆ ทำให้ผู้ขายข้าวบางรายมีการโกงปริมาณข้าวโดยใช้การผสมระหว่างข้าวที่มีราคาสูงกับข้าวที่มีราคาต่ำกว่าในอัตราส่วนที่รับประทานเข้าไปแล้วผู้ที่รับประทานไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงรสชาติ โดยหวังที่จะได้กำไรจากส่วนต่างของราคาข้าวที่ผสมเข้าไป ในปัจจุบันการตรวจสอบชนิดของข้าว หรือข้าวที่มีการผสม นิยมใช้การตรวจสอบด้วยไอโอดีนโดยจะทำให้เกิดสีเข้มขึ้นตามปริมาณของอะมิโลส (Amylose) ในเมล็ดข้าว (Colorimetric Methods) ซึ่งในข้าวแต่ละชนิดจะมีปริมาณของอะมิโลสที่แตกต่างกันตามความเหนียวนุ่มของเมล็ดข้าว โดยปริมาณของอะมิโลสจะบอกถึงความแข็งกระด้างของข้าว ข้าวที่มีอะมิโลสต่ำจะมีความนุ่ม เช่น ข้าวหอมมะลิ และข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีความแข็ง เช่น ข้าวเสาไห้ โดยการตรวจสอบด้วยวิธีนี้ถึงแม้จะทำได้สะดวกแล้วเร็วกว่าวิธีอื่น ๆ และสามารถตรวจสอบการผสมกันของข้าวที่มีอะมิโลสต่างกันมากๆ ได้อย่างแม่นยำเนื่องจากความแตกต่างของอะมิโลสในข้าวที่ต่างกันให้สีที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน แต่จะมีข้อเสียในเรื่องการตรวจสอบข้าวที่มีการผสมโดยใช้ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสใกล้เคียงกันทำให้แทบจะแยกความแตกต่างของสีไม่ได้หรืออาจทำได้ยากมาก ยังมีอีกวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อม และขนาดกลาง คือการทดสอบหุงและชิมรสชาติ (จรรยา แสงเขียว และคงศักดิ์ ศรีแก้ว, 2554) แต่ต้องอาศัยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน และเป็นการวัดผลทางความรู้สึก โดยงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นปัญหาที่

เกิดขึ้นในปัจจุบันและคิดหาทางเลือกอื่นเพื่อมาใช้ตรวจสอบการผสมกันของข้าวอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ใช้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Property) ในการตรวจสอบ โดยเป็นที่ทราบกันว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุทุกชนิดในโลกนี้จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวทำให้ไม่เหมือนกันแม้ว่าบางชนิดจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกันมาก ดังเช่นค่าไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละชนิดที่มีค่าไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกันมากแต่ด้วยความที่ข้าวแต่ละสายพันธุ์จะมีสารอาหารและคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) โปรตีน (Protein) วิตามิน (Vitamins) และอะมิโนส ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของข้าวในแต่ละสายพันธุ์มีค่าไดอิเล็กตริกที่เฉพาะตัว และเพื่อที่จะแยกข้าวได้จึงต้องทำการเพิ่มวิธีการบางอย่างเพิ่มความแตกต่างที่เล็กน้อยของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนั้นเพิ่มมากขึ้น และในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือลงไปในข้าวแล้วทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยที่น้ำจะเป็นตัวผสมให้ตัวข้าว และเกลือมีการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเกลือจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความนำ (Conductivity) ของตัวข้าวให้มีค่าที่สูงขึ้น และทั้งสองอย่างจะไปทำลายสารอาหารต่างๆ ในข้าวออกมา และรวมกันจนเกิดเป็นพันธะใหม่ ที่มีค่าการโพลาไรซ์ (Polarization) ที่ต่างกันไปตามสารอาหารในข้าวพันธุ์นั้น ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบข้าวที่มีการผสมเพื่อโกงราคาขายได้เนื่องจากเนื่องจากข้าวที่ได้ทำการผสมจะทำให้มีค่าไดอิเล็กตริกที่ผิดไปจากเดิม งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบในการต่อยอดเพื่อทำนวัตกรรมสำหรับใช้ในการตรวจสอบข้าวที่ขายทั้งภายในประเทศ และการส่งออกเพื่อยืนยันคุณภาพได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อตรวจสอบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละสายพันธุ์
- 1.2.2 เพื่อได้วิธีการตรวจสอบข้าวที่มีการปลอมปนผสมกันได้ด้วยหลักการตรวจสอบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก
- 1.2.3 เพื่อที่จะได้วิธีการตรวจสอบข้าวที่มีการผสมปลอมปนกันด้วยวิธีใหม่แทนแบบเดิมที่มีข้อจำกัด

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 วัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวโดยการบดให้เป็นผงก่อนทำการวัด
- 1.3.2 ข้าวที่ทำการบดแล้วจะทำการเพิ่มน้ำเกลือเข้าไปผสมก่อนการวัด

1.3.3 จะทำการเก็บข้อมูลการวัดค่าไดโอดีลิกทริกของข้าวทั้งผสมน้ำเกลือ ไม่ผสมน้ำเกลือ และข้าวที่ทำการผสมต่างพันธุ์กันแล้วเปรียบเทียบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วัดค่าไดโอดีลิกทริกของข้าวในประเทศไทยที่นิยมนำมาขายทั่วไปตามท้องตลาด และนิยมนำมาผสมกับข้าวหอมมะลิ

1.4.2 การวัดค่าไดโอดีลิกทริกจะทำในสภาวะแวดล้อมที่เหมือนกันเพื่อให้ได้ผลการวัดคงที่มากที่สุด

1.4.3 การผสมข้าวจะใช้ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นหลักเนื่องจากเป็นพันธุ์ที่ถูกผสมมากที่สุด และอาจเป็นหาในการส่งออกต่างประเทศ

1.4.4 การวิเคราะห์จะใช้การเก็บข้อมูลการวัดค่าไดโอดีลิกทริกแล้วมาเปรียบเทียบผล

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาการใช้งานเครื่องมือวัดค่าไดโอดีลิกทริก
- 3) วัดค่า และเก็บข้อมูลของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ
- 4) วัดค่า และเก็บข้อมูลของข้าวที่ผสมกัน
- 5) วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) วัดค่าไดโอดีลิกทริกของข้าวทั้งผสม และไม่ผสมกัน
- 3) วิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟค่าไดโอดีลิกทริกในช่วงความถี่ต่างๆ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer)

- 2) โปรแกรมเฉพาะทางวิศวกรรม Keysight materials measurement suit
- 3) หัวโพรบสำหรับวัดสัญญาณ และสายนำสัญญาณประเภท open end (Open-end coaxial line probe)
- 4) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (network analyzer)
- 5) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ (impedance analyzer)

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการทดลองวัดผลด้วยเครื่องวัดไดอิเล็กตริกและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Keysight materials measurement suit

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการออกแบบวิธีการตรวจสอบซ้ำที่มีการผสมต่างพันธุ์ นั้นจะ ถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริก และทฤษฎี รวมทั้ง เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ไปแล้ว

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้วิธีการตรวจสอบซ้ำที่มีการผสมต่างพันธุ์กันเพื่อการโง่งสำหรับการค้าด้วยวิธีใหม่ที่ ดีกว่าการตรวจสอบแบบเดิมที่มีข้อจำกัดหลายอย่าง

1.6.2 คาดว่าจะช่วยลดปัญหาการผสมซ้ำเพื่อการค้าได้ เนื่องจากเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทุกที่ ภายในประเทศ

1.7 ปริทัศน์วรรณกรรม

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางที่จะศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบซ้ำที่ถูกปลอมปน ด้วยหลักการไดอิเล็กตริก วิธีดำเนินการทดลอง ตลอดจนการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อ นำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ จึงได้ทำการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ที่ผ่านมาโดยอาศัย ฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงต่างๆที่ได้รับการ ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล Science direct นอกจากนี้ยังได้มีการ สืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย ต่าง ๆ โดยจะใช้ผลจากการสืบค้นไปประยุกต์ปรับปรุงเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย ต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ศึกษา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบข้าวที่ผสมกันโดยใช้ค่าไดอิเล็กตริก โดยเพิ่มเทคนิคการเติมน้ำเกลือเข้าไปให้มีค่าความต่างมีความชัดเจนมากขึ้น สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้ คือ งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร งานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และงานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณโซเดียมในวัสดุต่าง ๆ และศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกว่ามีที่มาจากอะไร

1.7.1 ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีในการตรวจสอบชนิดพันธุ์ของข้าว และข้าวที่มีการผสมกันด้วยวิธีต่าง ๆ ที่จะมาแทนการตรวจสอบแบบเดิมที่ตรวจสอบด้วยไอโอดีนหรือการตรวจสอบเอกลักษณ์พันธุกรรม ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ จรรยา แสงเขียว และคงศักดิ์ ศรีแก้ว (2554) ได้ใช้วิธีการตรวจสอบการปลอมปนของข้าวหอมมะลิโดยการพิจารณาจากปริมาณของอะมิโลส โดยใช้ไอโอดีนมาทำปฏิกิริยากับอะมิโลสทำให้เกิดสี ขั้นตอนการเตรียมการของงานวิจัยนี้มีดังนี้คือ นำข้าวหอมมะลิ 105 ที่ผ่านการตรวจสอบทาง DNA มาแล้วจากหน่วยงานเฉพาะ มาผสมกับข้าวชัยนาท 1 ชัยนาท 2 และพิษณุโลก 2 ในอัตราส่วน 95:5 90:10 85:15 80:20 75:25 70:30 65:35 60:40 ต่อน้ำหนักโดยข้าวที่นำมาผสมทั้งสามจะอยู่ที่ 1:1:1 แล้วมาบดให้ละเอียดจากนั้นใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์มากำจัดไขมันในข้าวออกไป และนำไปผสมกับไอโอดีนเพื่อดูสีที่เกิดขึ้นต่อไปโดยที่ความเข้มข้นของสีจะต่างกันไปตามปริมาณของอะมิโลส และสามารถแยกได้จากการมอง ซึ่งการตรวจสอบสีของงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ColorSchemer Studio และ OPenRGB หลังจากนั้นจึงนำแถบสีที่ได้มาจัดเรียงด้วยโปรแกรม Photoshop อีกทีแล้วจึงนำเอาแถบสีที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อเพื่อหาปริมาณของอะมิโลสด้วยเครื่อง Spectrophotometer อีกทีตามงานวิจัยของ Juliano (1971) ซึ่งจากงานวิจัยของ จรรยา แสงเขียว พบว่าปริมาณของอะมิโลสมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากปริมาณของอะมิโลสข้าวหอมมะลิ 105 ประมาณร้อยละ 16 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมกับข้าวชนิดอื่นเข้าไปตั้งแต่ 5 เปอร์เซ็นต์จนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณของอะมิโลสที่วัดได้จากสีประมาณ 19-28 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่ทั้งนี้งานวิจัยของ จรรยา แสงเขียว ยังไม่ได้มีการทดลองกับข้าวที่มีปริมาณของอะมิโลส หรือมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิ 105 และในการทดลองยังเป็นการผสมข้าวหอมมะลิ 105 พร้อมกันที่เดียวกับข้าวอีกสามพันธุ์ที่เดียวซึ่งต่างก็เป็นข้าวที่มีปริมาณของอะมิโลสที่สูงมาก ประมาณ 29-32 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 จึงอาจทำให้การจำแนกด้วยสี หรือทางเคมี สามารถทำได้เนื่องจากความแตกต่างของสีค่อนข้างชัดเจน อีกหนึ่งงานวิจัยที่ใช้การตรวจสอบทางเคมีเช่นเดียวกันคืองานวิจัยของ ศิริธร ศิริอมรพรรณ (2548) ได้ทำการตรวจสอบการปนของข้าวด้วยวิธีการตรวจสอบทางเคมี โดยได้นำข้าวที่นิยมผสมได้แก่ ข้าวหอมปทุม

1 และข้าวชัยนาท 1 มาผสมกับข้าวหอมมะลิ 105 ในอัตราส่วน 80:20 70:30 60:40 50:50 ต่อน้ำหนักแล้วจึงตรวจสอบทางเคมี และกายภาพไม่ว่าจะเป็น อะมิโลส แพคติน โพรตีน ไขมัน ขนาดและเนื้อสัมผัส พบว่าอะมิโลสเป็นตัวแปรชนิดเดียวที่สามารถใช้แยกแยะการปนกันของข้าวได้เมื่อตรวจสอบทางเคมี แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยของ จรรยา แสงเขียว และคงศักดิ์ ศรีแก้ว (2554) และศิริธร ศิริอมรรณ (2548) ต่างก็เป็นการตรวจสอบข้าวจากปริมาณของอะมิโลสซึ่งสามารถตรวจสอบการผสมกันของข้าวได้ดีเมื่อข้าวที่ถูกนำมาผสมเป็นข้าวที่มีปริมาณของอะมิโลสที่ต่างกันมาก เช่นข้าวหอมมะลิ และข้าวชัยนาท หรือข้าวพิษณุโลก แต่ถ้าเมื่อข้าวที่นำมาผสมมีปริมาณของอะมิโลสที่ใกล้เคียงกันมากจะทำให้ตรวจสอบได้ยาก หรืออาจจะไม่สามารถทราบได้เนื่องจากความเข้มของสีจากการตรวจสอบทางเคมีจะแสดงได้จากปริมาณของอะมิโลสในข้าวที่นำมาตรวจสอบเท่านั้น จึงอาจต้องหาวิธีตรวจสอบแบบอื่นทำควบคู่ไปด้วย และอีกวิธีที่น่าสนใจคือการแยกข้าวด้วยเครื่องแยกสิ่งเจือปน (ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์, รพีพัฒน์ ลาตศรีทา, และโกเมน อาสนาทิพย์, 2557) ซึ่งปกติแล้วเครื่องนี้จะใช้สำหรับแยกเศษเปลือก หรือก่อนกรวดออกจากเมล็ดข้าวโดยการสั่นตะแกรง แล้วใช้ลมดูด ซึ่งในการทดลองเครื่องนี้สามารถแยกเศษที่ไม่ต้องการออกได้เฉลี่ย 87.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเราสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้แยกชนิดพันธุ์ข้าวที่มีการปลอมปนได้บ้างด้วยการปรับขนาดของฟิลเตอร์ และแรงลม ถ้าข้าวที่นำมาปนกันนั้นมีความยาวเมล็ดที่แตกต่างกันประมาณหนึ่ง แต่ก็ไม่สามารถแยกข้าวที่มีขนาดเท่ากันได้ หรือจำแนกได้ว่าข้าว นั้นเป็นชนิดพันธุ์อะไร

นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบชนิดพันธุ์ของข้าว หรือข้าวที่ถูกผสมด้วยวิธีอื่นอีก เช่น การตรวจสอบจาก DNA (Deoxyribonucleic acid) หรือ DNA test เป็นวิธีที่สามารถทราบชนิดพันธุ์ของข้าว หรือการผสมกันของข้าวได้ชัดเจนที่สุด และเหมาะที่จะใช้สร้างความมั่นใจให้ประเทศคู่ค้า และช่วยเพิ่มมาตรฐานให้ราคาข้าวส่งออก ซึ่งเมื่อก่อนก่อนตรวจสอบทาง DNA นั้นใช้เวลามากซึ่งอาจจะใช้เวลานานถึง 2 เดือนแต่ในช่วงหลังได้มีสถาบันที่สามารถตรวจสอบได้มากขึ้น เช่น มหาวิทยาลัยต่างๆ รวมถึงงานวิจัยทางด้านนี้ได้พัฒนาไปอย่างมากทำให้ใช้เวลาตรวจสอบเร็วมากขึ้น ซึ่งอาจใช้เวลาเพียง 6-24 ชั่วโมงเท่านั้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามการตรวจสอบด้วย DNA test ก็ยังมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงอีกด้วย และอีกวิธีที่มีการใช้อยู่บ้างในบางอุตสาหกรรมคือการทดสอบโดยการหุงแล้วชิม วิธีนี้มักจะใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลาง และเล็กแต่วิธีนี้ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญด้านรสชาติ และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบต่ำมากที่สุด เนื่องจากเป็นไปได้ยากมากที่จะตรวจสอบรสชาติของข้าวที่มีการผสมถึงแม้ว่าผู้ชิมจะมีความเชี่ยวชาญทางด้านรสชาติอาหาร แต่ถ้าจำแนกชนิดพันธุ์ของข้าวที่ไม่ได้มีการผสมกันจะสามารถทำได้เนื่องจากรสชาติ และสัมผัสของข้าวแต่ละพันธุ์จะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว

จากที่กล่าวมาข้างต้น และข้อมูลของวิธีตรวจสอบชนิดพันธุ์ข้าว หรือข้าวที่มีการปลอมปนแบบเก่ายังมีข้อจำกัดบางอย่าง ซึ่งอาจมาก หรือน้อยแล้วต่อวิธีการตรวจสอบ งานวิจัยนี้จึงได้สังเกตเห็นปัญหาดังกล่าว และคิดหาวิธีตรวจสอบชนิดพันธุ์ของข้าว และข้าวที่มีการปลอมปนด้วยวิธีอื่นที่สามารถทำได้เร็ว ง่าย และสะดวก จึงได้วิธีการตรวจสอบข้าวด้วยค่าคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกขึ้นมา โดยที่รู้กันทั่วไปว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทุกชนิดในโลกจะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ไม่มีทางจะเหมือนกันได้หนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าวัสดุบางชนิดจะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่คล้ายกันมากก็ตาม ซึ่งงานวิจัยนี้ก็ให้เห็นว่าข้าวแต่ละชนิดพันธุ์จะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสารอาหาร เช่น แป้ง โปรตีน ไขมัน และอะมิโลสซึ่งเป็นน้ำตาลประเภทหนึ่ง ก็ยังมีความแตกต่างกันในแต่ละชนิดพันธุ์ของข้าวจึงทำให้ข้าวแต่ละพันธุ์จะมีความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกอยู่บ้างถึงแม้ว่าจะมีความคล้ายกันมากจนแทบจะเหมือนกันเลยก็ตาม

1.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าไดอิเล็กตริกในวัสดุที่เป็นอาหาร หรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้มีการวิจัยมาอย่างมากมายต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นอาหารประเภทเนื้อสัตว์ดิบ เช่นงานวิจัยของ Bodakian (1994) ซึ่งวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อวัว และเนื้อไก่ที่ความถี่ 1 Hz ถึง 1 MHz โดยวัดค่าไดอิเล็กตริกทั้งแบบดิบ และปรุงสุกแล้ว และอีกงานวิจัยได้แก่งานของ Samir Trabelsi (2012) ที่ทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้ออกไก่ดิบ และวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยหัววัด Open-end coaxial probe ที่ความถี่ 200 MHz -20 GHz และอุณหภูมิจาก -20 ถึง 25 °C ถึงแม้ว่าเนื้อสัตว์จะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกไม่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แต่สามารถใช้อ้างอิงเรื่องการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ ความถี่ต่าง ๆ ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชก็มีหลายงาน เช่นงานวิจัยของ Stuart O Nelson เป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผักผลไม้ และข้าว อีกทั้งยังมีการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกในสถานะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำมากจนไปถึงอุณหภูมิที่สูงมากหรือสภาพความชื้นของวัตถุ แม้กระทั่งความหนาแน่นที่ต่างกันของวัตถุ และทดลองวัดที่หลากหลายความถี่ เช่นของ Stuart O Nelson (2003, 2004) เป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผัก และผลไม้ดังต่อไปนี้ ได้แก่อะโวคาโด แครอท และส้ม ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 5-95 °C และความถี่ 200 MHz ถึง 20 GHz โดยเมื่อสังเกตกราฟในงานวิจัยจะเห็นว่าอะโวคาโด และแครอทมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับตัวอย่างชนิดเดียวกันในทุกอุณหภูมิที่ทดลองวัดที่ความถี่มากกว่า 100 MHz และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอะโวคาโด และแครอทที่ความถี่ต่ำกว่า 100 MHz จะสังเกตได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในแต่ละอุณหภูมิเริ่มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มมากขึ้นโดยมีการเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เล็กน้อยแตกต่างกันไปในแต่ละอุณหภูมิ และยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นในขณะที่ความถี่ลดลงก็ยิ่งทำ

ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่ามากขึ้นอย่างมาก ในส่วนของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ก็มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ขณะที่ความถี่ลดลงเช่นเดียวกันกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก แต่ความถี่ที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ที่ช่วงตั้งแต่ 1 GHz ลงไปในขณะที่ความถี่ที่มากกว่านั้นจะแทบไม่เห็นความแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ในส่วนของการวัดสัมในงานวิจัยเดียวกันจะเห็นว่าถึงแม้ว่าจะเป็นผลไม้ชนิดที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากก็มีแนวโน้มของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนไปเหมือนกันเมื่ออุณหภูมิ และความถี่เปลี่ยนไปเพียงแต่ช่วงความถี่ที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะแตกต่างกัน และในงานวิจัยของ Stuart O Nelson (2008) ยังมีการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแอปเปิลสามชนิดแล้วเปรียบเทียบกัน โดยใช้ใช้สายพันธุ์ Fuji Pink lady และ Red rome วัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งจะเห็นว่าแม้จะเป็นผลไม้ชนิดเดียวกันแต่เมื่อเป็นคนละสายพันธุ์ก็จะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกันและมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ซึ่งจากงานวิจัยทั้งสองจะเห็นว่าวัสดุไดอิเล็กตริกประเภทอาหารถึงแม้ว่าจะเป็นชนิดเดียวกันแต่ถ้าเป็นคนละสายพันธุ์ก็จะมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกันด้วย และอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่เป็นอาหารไม่ว่าวัสดุชนิดนั้นจะมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบมาก หรือน้อยก็ตาม โดยที่ความถี่ต่ำ ซึ่งอาจจะอยู่ในช่วงของ Radio frequency หรือช่วงต้น ๆ ของ Microwave frequency โดยที่ความถี่สูงมากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไม่ค่อยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสักเท่าไร และสามารถนำผลจากงานวิจัยทั้งสองของ Stuart O Nelson มาวิเคราะห์เพื่อใช้กับงานวิจัยในเล่มนี้ได้

นอกจากงานวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารแล้วยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวโดยตรงด้วย เช่นงานวิจัยของ Sang Ha Noh and Nelson (1989) ซึ่งเป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวในช่วงความถี่ตั้งแต่ 50 Hz จนถึง 12 GHz โดยงานวิจัยของ Sang Ha Noh ได้ใช้ข้าวสายพันธุ์จากยุโรปรวมถึงข้าวเปลือก และข้าวกล้อง โดยข้าวแต่ละชนิดมีความชื้นตั้งแต่ 11.4 ถึง 16.4 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความชื้นในข้าวให้เท่ากันได้ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะให้ค่าความชื้นมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งจากผลการวัดทั้งข้าวขาว ข้าวกล้อง และข้าวเปลือกมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกน้อยมาก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 3-5 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกประมาณ 0.4-0.75 ซึ่งกราฟแทบจะทับกันในทุกตัวอย่างที่วัด แต่อีกสิ่งหนึ่งที่สังเกตได้คือ ความชื้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแต่จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่ต่ำกว่า 1 MHz ที่ความชื้น 11.4-14.1 เปอร์เซ็นต์มีเพียงความชื้นตั้งแต่ 15.7 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปเท่านั้นที่มีความต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนไปในทุกความถี่ และในข้าวแต่ละพันธุ์ก็มีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นที่แตกต่างกันอีกด้วย จึงสามารถสรุป

ได้ว่าที่ความถี่ตั้งแต่ 1 MHz ขึ้นไป และถ้าข้าวมีความชื้นต่ำกว่า 14.1 เปอร์เซ็นต์ค่าไดอิเล็กตริกจะแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าข้าวมีความชื้นตั้งแต่ 15.7 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปจะทำให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีการเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้น และในข้าวแต่ละสายพันธุ์ก็มีการเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่เท่ากันอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้ได้สังเกตเห็นความสำคัญจุดนี้คือการเพิ่มความชื้นให้ถึงจุด ๆ หนึ่ง ในปริมาณที่เท่ากันจะทำให้ได้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวในแต่ละสายพันธุ์เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ต่างกัน จึงได้นำผลวิเคราะห์นี้มาประยุกต์ใช้ต่อเพื่อใช้ตรวจแยกชนิดพันธุ์ข้าว และตรวจสอบข้าวที่มีการปลอมปน

สาเหตุที่ข้าวแต่ละสายพันธุ์มีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ไม่เหมือนกันแม้ว่าจะมีค่าใกล้เคียงกันก็ตามเนื่องจากว่าสารอาหารในข้าว เช่น ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งงานวิจัยของ Cheng, You, Lee, Abbas, Rahim, Khor, Zakaria, and Lee (2017) ได้มีการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวโดยใช้ ข้าวหอม ข้าวขาว และข้าวกล้องโดยใช้หัววัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ Open-end coaxial probe วัดที่ความถี่ 200 MHz ถึง 10 GHz ทำให้เห็นว่าระดับความต่างของไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต มีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งช่วยยืนยันความความเป็นไปได้ที่จะจำแนกชนิดพันธุ์ข้าว หรือตรวจสอบข้าวที่มีการปลอมปนด้วยไดอิเล็กตริกได้ และนอกข้าวแต่ละสายพันธุ์แล้วสิ่งอื่นที่ปนมาก็มียค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างจากข้าวด้วย เช่นในงานวิจัยของ Stuart O Nelson (1996) ซึ่งเป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวเทียบกับมอดข้าว (Rice weevils) จะเห็นว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีความต่างกันประมาณหนึ่ง และ relaxation frequency ก็ยังมีขนาดที่ต่างกันมากอีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะตรวจสอบข้าวด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกไม่ว่าจะตรวจสอบสายพันธุ์ข้าว หรือข้าวปลอมปน หรือแม้แต่มดแมลง และก้อนกรวดปนอยู่ด้วยก็ตาม

1.7.3 นอกจากความถี่ และความชื้นในวัสดุแล้วยังมีตัวแปรหลายอย่างที่ทำให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเปลี่ยนไป และงานวิจัยนี้ก็เลือกใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำ (Conductivity) หรือก็คือการเติมเกลือ (NaCl) ลงไปโดยที่มิงงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกเมื่อเพิ่มความนำลงไป เช่นงานวิจัยของ Gadani, Rana, Bhatnagar, Prajapati, and Vyas (2012) ซึ่งเป็นการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นกับน้ำเมื่อเพิ่มเกลือเข้าไป โดยเตรียมตัวอย่างน้ำเกลือ (น้ำกลั่นผสมกับเกลือ) สามแบบที่ความเข้มข้น 5000 ppm 10000 ppm และ 35000 ppm (Parts per million หรือหนึ่งในล้านส่วน) วัดบนความถี่ตั้งแต่ 200 MHz ถึง 1.4 GHz โดยใช้ Vector network analyzer (VNA) จากผลทดลองจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำจะมีการลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อความถี่สูงขึ้น และมีการลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือมาก

ขึ้น ในส่วนของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นนั้นมีการเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่น้ำเกลือ นั้นจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นจากความถี่ที่วัดคือ 200 MHz ถึง 1.4 GHz และการลดลงของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกเมื่อความถี่สูงขึ้นนั้นมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือ สูงขึ้น จากพฤติกรรมของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นเมื่อใส่เกลือเพิ่มลงไปใต้น้ำในงานวิจัยของ Gadani สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยในเล่มนี้ได้เช่นกัน และนอกจากการศึกษาผลกระทบ ของเกลือต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในน้ำแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของเกลือเมื่อผสมลง ในอาหารอีกด้วยดังเช่นงานวิจัยของ Ahmed, Ramaswamy, and Raghavan (2007) ซึ่งเป็น การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนยเมื่อมีการเพิ่มเกลือลงไป และเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยของ Ahmed เป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนยทั้งจืด และแบบเพิ่มเกลือโดยมีความชื้นอยู่ที่ 17-19 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ที่ใช้วัดอยู่ที่ 500 MHz ถึง 3 GHz ที่ อุณหภูมิ 10 °C และระหว่าง 30-80 °C จากผลจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนยจืดจะขึ้นอยู่กับ ความถี่ ในขณะที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และทั้งค่าคงที่ และการ สูญเสียไดอิเล็กตริกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในส่วนของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนยผสมเกลือจะ ลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งในงานวิจัยของ Ahmed สรุปไว้ว่าการเพิ่ม เกลือเป็นการเพิ่มค่าความนำจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนยจืด และเนยเค็ม แตกต่างกัน และเมื่ออุณหภูมิของเนยสูงขึ้นจนละลายเป็นน้ำมันเนยจะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกลดลง เนื่องมาจากการที่มีส่วนประกอบของน้ำลดลง และการทะลุผ่านของคลื่น (Penetration depth) จะ ลดลงตามอุณหภูมิ ความถี่ และเกลือที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย เมื่อวิเคราะห์จากผลของงานวิจัยที่กล่าวมา ทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะตรวจสอบชนิดพันธุ์ของข้าว หรือตรวจสอบข้าวปลอมปน ด้วยค่าไดอิเล็กตริก และการเพิ่มเทคนิคน้ำเกลือลงไปเพื่อเพิ่มความแตกต่างของค่าไดอิเล็กตริกข้าวแต่ ละสายพันธุ์ให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งงานวิจัยเล่มนี้ได้สังเกตเห็นแนวคิดนี้ และเห็นว่ามีความประโยชน์ที่จะทำการศึกษา เพื่อเป็นต้นแบบที่สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมใหญ่ ๆ หรือเพื่อการส่งออกข้าวใน ระดับโลกได้ โดยสามารถใช้แทนการตรวจสอบแบบเก่าที่อาจจะมีข้อเสียบางอย่าง และเพื่อช่วยเพิ่ม ความมั่นใจให้ผู้บริโภค และผู้ค้าได้

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาในตลาดข้าว ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริก รวมถึงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้อ้างอิง

บทที่ 3 กล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก การตั้งค่าโปรแกรมวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก เทคนิคการผสมน้ำเกลือในข้าว และวิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริก

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง



บทที่ 2

ความเป็นมาของปัญหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไดอิเล็กตริก และ อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริก

2.1 กล่าวนำ

ข้าวจัดว่าเป็นอาหารหลักของคนในประเทศไทยที่สามารถบริโภคได้แทบทุกวัย ถ้าไม่มีปัญหาสุขภาพบางอย่างที่แพทย์ต้องสั่งให้งด อีกทั้งยังเป็นสินค้าทางการเกษตรหลักของประเทศ เนื่องมาจากภูมิประเทศเป็นอากาศร้อนชื้นเหมาะสมที่จะทำการปลูกข้าวชั้นดีทำให้อาชีพเกษตรกรประเภทชาวนาเป็นอาชีพที่มีมากในประเทศไทย และเนื่องจากว่าประเทศไทยมีสภาวะทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมในการปลูกข้าวได้ดีจึงทำให้มีการปลูกข้าวชั้นดีได้ซึ่งก็คือข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมมะลิเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง และสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายหลายชนิด โดยมีคาร์โบไฮเดรตสูง 77 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 8 เปอร์เซ็นต์ และวิตามิน บี 1 และ บี 2 สูงปัจจุบันข้าวหอมมะลินอกจากจะเป็นสินค้าที่นิยมรับประทานในประเทศแล้วยังเป็นสินค้าส่งออกทำรายได้ให้กับประเทศในแต่ละปีมากมายมหาศาล เนื่องจากเป็นข้าวที่มีความนุ่มหอม มีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ รสชาติอร่อย อีกทั้งยังมีราคาที่สูงกว่าข้าวชนิดอื่น ๆ ด้วยกัน ซึ่งการที่เป็นสินค้าที่มีความนิยมสูง และขายได้ราคาดี แต่ก็เกิดปัญหาการโกงเกิดขึ้นโดยการนำข้าวหอมมะลิมาผสมกับข้าวเกรดรองลงมาในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อนำมาค้าขายเก็งกำไรต่อ ซึ่งการผสมข้าวมีตั้งแต่ผสมกันเล็กน้อยคือ น้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจมากกว่า ซึ่งถ้าน้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการขายข้าวของประเทศไทยที่ยอมให้มีการปนได้ไม่ว่าจะเกิดจากความตั้งใจหรือไม่ก็ตาม และแทบจะไม่มีใครรู้ถึงความผิดปกติของรสชาติเมื่อรับประทานเข้าไป แต่ถ้าถ้ามากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์จะเริ่มรับรู้รสชาติได้ในบางคน และเป็นการกระทำเพื่อโกงราคาสินค้า ปัญหานี้พบได้มากมายตามร้านค้าข้าว หรือแม้แต่ข้าวที่บรรจุใส่ถุงผลิตภัณธ์อย่างดีที่ขายในห้างสรรพสินค้า และการตรวจสอบข้าวที่ผสมกันยังทำได้ยากมากในปัจจุบันซึ่งวิธีเดียวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการใช้ตรวจสอบชนิดพันธุ์ของข้าว และการปนของข้าวพันธุ์อื่นได้คือการส่งตัวอย่างไปตรวจสอบทางพันธุกรรม แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยวิธีต่างๆ เช่นการตรวจสอบด้วยเทคโนโลยี Mask R-CNN (Mask Regional Convolutional Neuron Network) หรือใช้ Image processing แต่ว่าวิธีเหล่านี้ยังอยู่ในขั้นตอน

วิจัยที่ไม่สมบูรณ์ที่จะนำมาใช้จริงได้ ทำให้ได้ริเริ่มงานวิจัยนี้ขึ้นมาเพื่อตรวจสอบข้าวที่มีการผสมกันด้วยค่าไดอิเล็กตริก โดยจะใช้ความแตกต่างของค่าไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละสายพันธุ์มาเป็นตัวบ่งชี้เนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาในปัจจุบันเกี่ยวกับการปลอมปนข้าวโดยจะเน้นไปที่ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นข้าวหลัก ทฤษฎี และคุณลักษณะต่าง ๆ ของค่าไดอิเล็กตริก และวัสดุที่จะวัด และทฤษฎีของอุปกรณ์วัดที่จะนำมาใช้วัดค่าไดอิเล็กตริก

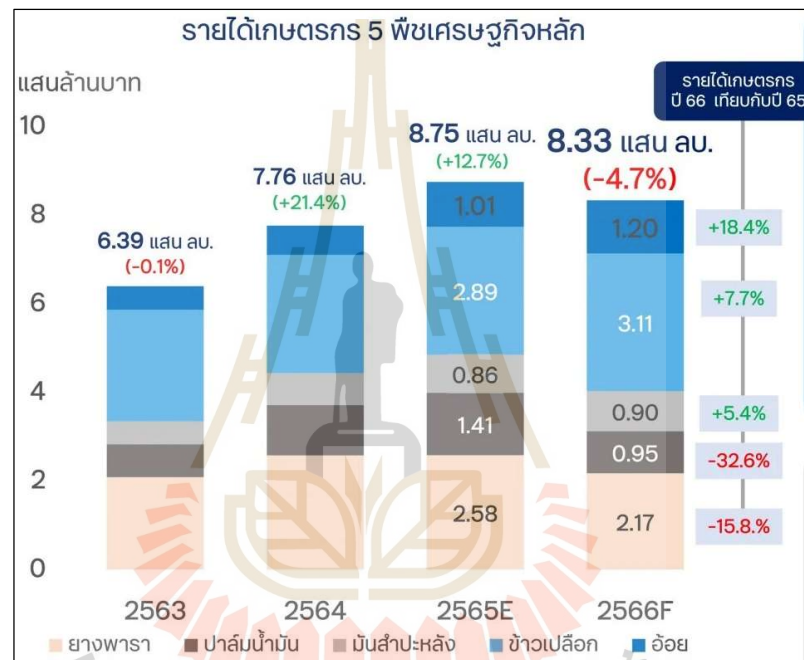
2.2 ความเป็นมาของปัญหาของราคาข้าวที่เกิดจากการปลอมปน

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ถูกเรียกว่าเป็นครัวของโลก เนื่องจากว่าเป็นประเทศที่มีการผลิต และส่งออกสินค้าเกี่ยวกับการเกษตร และอาหารเป็นลำดับต้น ๆ ของโลก โดยพืชเศรษฐกิจหลักของไทยมีอยู่ 5 ชนิดได้แก่ ยางพารา ปาล์ม มันสำปะหลัง ข้าว และอ้อย ซึ่งทำรายได้ให้ประเทศในหลักแสนล้านบาท และพืชที่ทำรายได้มากที่สุดคือข้าว ในช่วงไตรมาสแรกปี พ.ศ. 2565 และ 2566 ข้าวทำรายได้ไป 2.89 และ 3.11 แสนล้านบาทตามลำดับ สามารถดูข้อมูลได้ตามรูปที่ 2.1 ข้าวถือว่าเป็นอาหารหลักมานาน และตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันประเทศไทยก็ยังบริโภคข้าวเป็นอาหารหลักมาโดยตลอด ข้าวเป็นแหล่งของสารอาหารหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) วิตามินต่าง ๆ (Vitamins) และกรดอะมิโน (Amino acid) ที่สำคัญต่อร่างกาย อีกทั้งข้าวยังเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ส่งออกหลักของประเทศอีกด้วย โดยถึงแม้ประเทศไทยจะผลิตข้าวได้เป็นอันดับที่ 6 ของโลก (ผลิตได้ประมาณ 20.2 ล้านตัน (พ.ศ. 2565)) เป็นรอง จีน อินเดีย บังคลาเทศ อินโดนีเซีย และเวียดนาม แต่เรื่องการส่งออกข้าวนั้นกลับมากเป็นอันดับที่ 2 ของโลกประมาณ 6.02 ล้านตัน (พ.ศ. 2565) เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิประเทศที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกทำให้สามารถปลูกข้าวคุณภาพดีได้โดยที่ข้าวที่เป็นที่นิยมอย่างมากทั้งในประเทศ และต่างประเทศคือข้าวหอมมะลิ 105 ถือเป็นข้าวที่หอมเป็นเอกลักษณ์และมีความนุ่มอร่อย ข้าวชนิดนี้ปลูกได้ดีในภูมิอากาศร้อนชื้นทำให้ประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นไม่สามารถปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสินค้าส่งออกที่ประเทศในเขตหนาวเย็นต้องการอย่างมาก ซึ่งข้าวหอมมะลิ 105 เป็นข้าวที่ชนะเลิศ world's best rice awards ถึง 7 ครั้ง ตั้งแต่ปี 2009 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่ชนะมากที่สุดอีกด้วย ปัจจัยที่ทำให้ข้าวหอมมะลิมีความนุ่มและอร่อยกว่าข้าวชนิดอื่นมีหลายปัจจัยเช่น สารเคมีที่สร้างกลิ่นให้หอม (2-acetyl-1-pyrroline (2AP)) ซึ่งข้าวหอมมะลิจะมีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์และคล้ายใบเตยอ่อน ๆ และค่าของอะมิโลสที่บ่งบอกถึงความนุ่มของเมล็ดข้าวสามารถดูได้ตามรูปที่ 2.2 สังเกตได้ว่าถ้าข้าวมีปริมาณของอะมิโลสที่ต่ำจะทำให้มีความอ่อนนุ่มสูง แต่ทั้งนี้ความนุ่มของข้าวก็ไม่ได้พิจารณาแค่เพียงปริมาณของอะมิโลสอย่างเดียว ยังรวมไป

ถึงความคงตัวของแป้งสุกด้วย โดยข้าวที่มีปริมาณของอะมิโลสที่เท่ากันอาจมีความนุ่มไม่เท่ากันก็ได้ ขึ้นอยู่กับความคงตัวของแป้งสุก กระทรวงพาณิชย์ได้กำหนดให้ข้าวหอมมะลิไทยมาตรฐานความบริสุทธิ์หรือเปอร์เซ็นต์ข้าวหอมมะลิไว้ที่ 92 เปอร์เซ็นต์ หรือมีข้าวพันธุ์อื่นปนได้ 8 เปอร์เซ็นต์สำหรับข้าวคุณภาพดี และมีการปนได้ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์สำหรับข้าวที่มีคุณภาพรองลงมาตามลำดับ ซึ่งแม้จะมีกระบวนการตรวจสอบที่เข้มงวดมากแต่ก็ยังตรวจสอบได้ยากหากมีปริมาณการปนเกิดขึ้นเกินกว่ากำหนด ซึ่งถ้ามีการปนกันเกิดขึ้นกับสินค้าส่งออกจะทำให้เกิดผลกระทบขนาดใหญ่ระหว่างประเทศได้ อีกทั้งการค้าขายภายในประเทศก็ยังคงเป็นที่นิยมข้าวสายพันธุ์นี้ เนื่องจากเป็นข้าวที่มีรสชาติอร่อยแต่เนื่องจากว่าเป็นข้าวที่มีราคาที่สูงกว่าข้าวขาวสายพันธุ์อื่น ๆ ตามราคาในตารางที่ 2.1 – 2.3 จะเห็นว่าข้าวหอมมะลิจะมีราคาเฉลี่ยที่ 15,000 บาทต่อตันต่างจากข้าวนาปรังที่มีราคาเฉลี่ยที่ 10,000 บาทต่อตัน ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ จึงเกิดการปัญหาการผสมข้าวโดยใส่ข้าวสายพันธุ์อื่นลงในปริมาณต่าง ๆ ลงไปในข้าวหอมมะลิแล้วนำมาขายในราคาข้าวหอมมะลิ ซึ่งข้าวที่นำมาผสมลงไปจะมีตั้งแต่ข้าวที่มีความแข็งมากจนไปถึงข้าวที่มีความอ่อนนุ่มจนเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิ วิธีการตรวจสอบชนิดของข้าวที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ การตรวจด้วยไอโอไดน หรือเรียกว่าการตรวจสอบทางเคมี การตรวจสอบด้วย DNA หรือการ Lab test การชิมรสชาติ และการตรวจสอบขนาดเมล็ดข้าว แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเยอะมากในการที่จะตรวจสอบข้าวที่มีการผสมกันเมื่อมีการใช้ข้าวที่มีลักษณะทางกายภาพ หรือทางเคมีที่ใกล้เคียงกันมาผสมกันจะทำให้การตรวจสอบที่กล่าวมาทั้งหมดทำได้ยากมาก หรืออาจทำไม่ได้ โดยจะมีเพียงการตรวจสอบทาง DNA เท่านั้นที่สามารถตรวจสอบหาการปลอมปนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงได้คิดหาวิธีการใหม่ที่จะมาใช้ตรวจสอบชนิดของข้าวและข้าวที่มีการปลอมปนกันแทนการตรวจสอบแบบเดิม ซึ่งจะต้องมีความแม่นยำในการตรวจสอบที่สูง มีความซับซ้อนที่น้อยกว่าวิธีดั้งเดิม และใช้เวลาไม่นานในการตรวจสอบ โดยวิธีการใหม่นี้ได้ใช้การตรวจสอบด้วยค่าไดอิเล็กตริกของข้าวโดยใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือเข้าไปช่วยในการเพิ่มความละเอียดในการแยก โดยที่แนวคิดนี้ได้มาจากทฤษฎีของความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งวัสดุทุกชนิดในโลกนี้ จะมีความแตกต่างกันและมีความเฉพาะตัวแม้ว่าบางวัสดุจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกันมาก หรือมีค่าเท่ากันในบางความถี่แต่จะไม่เหมือนกันตลอดทุกความถี่ ซึ่งในข้าวแต่ละชนิดพันธุ์เองก็มีปริมาณของสารอาหารที่สำคัญ เช่น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรตในปริมาณที่แตกต่างกันทำให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) ของข้าวต่าง ๆ มีค่าที่ไม่เหมือนกัน และการเพิ่มน้ำเกลือเป็นการเพิ่มความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละสายพันธุ์ให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

เนื่องจากน้ำเกลือจะไปจับกับโครงสร้างพันธะของสารอาหารสำคัญที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไป และเกิดการโพลีไรซ์ที่เปลี่ยนไปจากเดิมเมื่อข้าวเข้าไปอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยจะกล่าวในหัวข้อทฤษฎีถัดไป เทคนิคนี้เป็นวิธีที่ใหม่ และยังคงควบคุมสภาวะแวดล้อมก่อนวัดค่าให้คงที่ และเหมือนกันทุกการวัดแต่ละตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าไดอิเล็กตริกที่สามารถเปรียบเทียบกันได้มากที่สุด



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบรายได้ 5 พืชเศรษฐกิจหลักของไทย (www.ttbbank.com)

การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพข้าวสุก				
พันธุ์ข้าว	เมล็ดยาว (มม.)	อมิโลส (%)	อุณหภูมิตั้งสุก	ความคงตัวแป้งสุก
ข้าวสกลุ่ม และเหนียว				
ขาวดอกมะลิ 105*	7.2-7.6	13-18	ต่ำ	อ่อน
กข15*	7.5	14-17	ต่ำ	อ่อน
กข21	7.3	17-19	ต่ำ	อ่อน
ปทุมธานี1*	7.3-7.8	14-18	ต่ำ	อ่อน
ข้าวสกล่อน (ขาวตาแห้ง)				
ขาวปากหม้อ	7.7	24-26	ปานกลาง	อ่อน
ขาวตาแห้ง 17	7.5	24-28	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน
กข7	7.2	24-28	ปานกลาง	อ่อน
กข23	7.3	22-26	ปานกลาง	อ่อน
สุพรรณบุรี 60	7.5	20-26	ต่ำ	ปานกลาง
ข้าวสุกร่วนแข็ง (เสาไห้หรือข้าวเคียว)				
เหลืองใหญ่ 148	7.3	30-31	ต่ำ	อ่อน-ปานกลาง
น้ำสะกดย 19	7.6	30-31	ต่ำ	อ่อน-ปานกลาง
เหลืองประทิว 123	7.4	28-32	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน-แข็ง
เล็บมือนาง 111	7.6	29-32	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง-อ่อน
ปิ่นแก้ว 56	7.5	29-31	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง
กข11	7.6	29-32	ต่ำ	แข็ง
กข13	6.9	30-33	ต่ำ-ปานกลาง	อ่อน
ปทุมธานี 60*	7.5	27-32	ต่ำ	แข็ง
ชัยนาท 1	7.4	27-30	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง
สุพรรณบุรี 90	7.4	27-30	ต่ำ-ปานกลาง	แข็ง
สุพรรณบุรี 1	7.3	29	ปานกลาง	อ่อน

รูปที่ 2.2 คุณลักษณะของข้าวทางกายภาพ และทางเคมี (www.ricethailand.go.th)

ตารางที่ 2.1 ราคาขายส่งข้าวเปลือกเจ้า นาปรัง ปี 2563 (www.dit.go.th)

ชนิดข้าว	ราคา (บาท/ตัน)
จังหวัดพิจิตร	10,100 - 10,300
จังหวัดนครปฐม	10,300 - 10,400
จังหวัดพิษณุโลก	10,200 - 10,500
จังหวัดนครสวรรค์	9,800 - 10,000
จังหวัดสุพรรณบุรี	10,500 - 10,600
จังหวัดอุทัยธานี	10,500 - 11,000

ชนิดข้าว	ราคา (บาท/ตัน)
จังหวัดฉะเชิงเทรา	9,900 - 10,500
จังหวัดเพชรบูรณ์	10,000 - 10,200
จังหวัดชัยนาท	9,800 - 10,300
จังหวัดปทุมธานี	9,800 - 10,300

ตารางที่ 2.2 ราคาขายส่งข้าวเปลือกหอมมะลิ ปี 2563 (www.dit.go.th)

ชนิดข้าว	ราคา (บาท/ตัน)
จังหวัดสุรินทร์	15,000 - 15,800
จังหวัดนครราชสีมา	16,000 - 16,500
จังหวัดอุบลราชธานี	14,900 - 16,000
จังหวัดศรีสะเกษ	14,800 - 16,000
จังหวัดบุรีรัมย์	14,700 - 15,300
จังหวัดร้อยเอ็ด	16,000 - 16,700
จังหวัดมหาสารคาม	14,600 - 15,400
จังหวัดยโสธร	14,600 - 16,200
จังหวัดขอนแก่น	14,700 - 16,500

ตารางที่ 2.3 ราคาขายส่งข้าวเปลือกปทุมธานี นาปรัง ปี 2563 (www.dit.go.th)

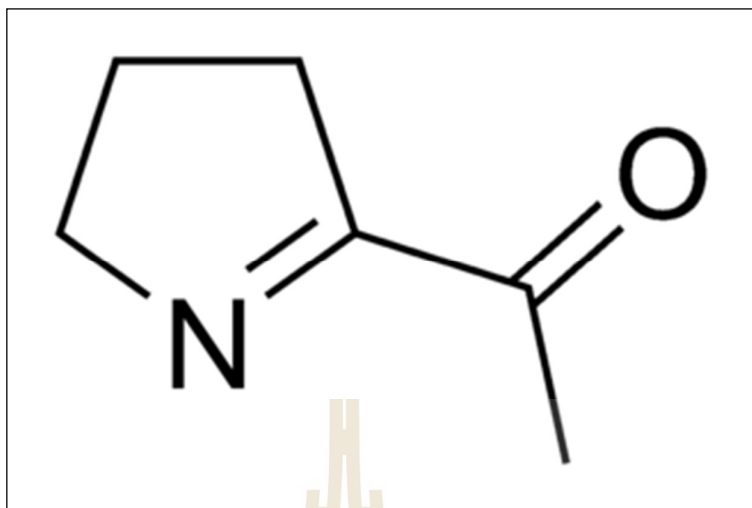
ชนิดข้าว	ราคา (บาท/ตัน)
จังหวัดชัยนาท	11,000 - 11,200

ชนิดข้าว	ราคา (บาท/ตัน)
จังหวัดอ่างทอง	10,500 - 11,000
จังหวัดสุพรรณบุรี	11,300 - 11,600
จังหวัดสิงห์บุรี	11,000 - 11,100

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการตรวจพันธุ์ข้าว และข้าวที่ผสมกับข้าวต่างสายพันธุ์ด้วยค่าไดอิลิกตริก

2.3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของข้าวและการผสมข้าวที่ทำขายกันตามท้องตลาด

ข้าวที่นิยมปลอมปนโดยการผสมข้าวชนิดอื่นลงไปคือข้าวหอมมะลิเนื่องจากเป็นข้าวที่ขายได้ในราคาที่สูง โดยลักษณะเมล็ดมีสีขาว ยาวประมาณ 7.2-7.6 มิลลิเมตร มีเนื้อสัมผัสที่นุ่มเมื่อรับประทานตอนหุงสุก มีความหอมคล้ายใบเตยจากสารระเหย 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ดังรูปที่ 2.3 อยู่ในเมล็ดข้าว และหุงขึ้นหม้อได้ดี ข้าวหอมมะลิจัดเป็นประเภทข้าวไวแสงทำให้สามารถปลูกได้เพียงปีละหนึ่งครั้งเท่านั้นหรือเรียกว่าข้าวนาปีจึงทำให้มีผลผลิตต่อปีน้อยเมื่อเทียบข้าวนาปลังที่ปลูกได้ปีละ 2 ครั้ง โดยการผสมปลอมปนข้าวมีหลายลักษณะ เช่น การปนกันจากการที่ปลูกข้าวหลายพันธุ์ในแปลงใกล้กัน การกลายพันธุ์ หรือการจงใจผสมเพื่อการขาย โดยการผสมเพื่อขายจะนิยมนำข้าวขาวที่มีลักษณะรูปร่างใกล้เคียงข้าวหอมมะลิมาผสม โดยจะมีลักษณะเมล็ดที่แข็ง (อะมิโลสสูง) แต่จะมีราคาที่ถูกกว่ามาก โดยข้าวหอมมะลิจะมีราคาเฉลี่ยอยู่ที่ตันละ 15,000 บาทส่วนข้าวขาวทั่วไปจะมีราคาเฉลี่ยที่ตันละ 10,000 บาท ซึ่งจะผสมข้าวสองชนิดนี้เข้าด้วยกันปริมาณมากไม่ได้เพราะจะทำให้รสสัมผัสเปลี่ยนจะรู้สึกได้ และเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบข้าวในปัจจุบันคือการการใช้ไอโอดีนหยดแล้วสังเกตสีที่เกิดขึ้น ซึ่งถ้าข้าวที่นำมาปลอมปนเป็นข้าวที่มีความแข็ง แสดงว่าข้าวสองชนิดจะมีปริมาณของอะมิโลสที่ต่างกันอย่างมาก โดยที่ข้าวหอมมะลิจะมีปริมาณของอะมิโลสอยู่ประมาณ 13-18 เปอร์เซ็นต์แต่ข้าวขาวทั่วไปจะมีปริมาณอะมิโลสประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ทำให้เห็นความเข้มสีจากการหยดไอโอดีนได้ชัด นอกจากนี้ยังมีการผสมของข้าวหอมมะลิโดยใช้ข้าวขาวที่มีความนุ่มในระดับกลางหรือใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิมาผสมซึ่งจะทำให้โก่งราคาได้ไม่มากแต่จะทำให้การตรวจสอบเป็นไปได้ค่อนข้างยาก และทำให้รับประทานเข้าไปแล้วไม่รู้สึกลึถึงความแตกต่าง หรือแม้แต่การเลือกผสมกับข้าวที่มีขนาดเมล็ด และสีที่ใกล้เคียงกันทำให้มองด้วยตาไม่ออกว่ามีผสมกัน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารระเหย 2-acetyl-1-pyrroline (Wongpornchai, Sriseadka, and Choonvisase 2003)

ข้าวที่นิยมนำมาผสมกับข้าวหอมมะลิแล้วขายในราคาสูง และมีการทำมานานมาก คือข้าวหอมปทุมเนื่องจากข้าวชนิดนี้มีขนาดเมล็ดที่ใกล้เคียงกันกับข้าวหอมมะลิ และยังมีปริมาณอะมิโลสที่ต่ำมากทำให้มีความอ่อนนุ่มใกล้เคียงกันกับข้าวหอมมะลิ ซึ่งข้าวหอมปทุมจะมีราคาขายอยู่ที่ตันละประมาณ 11,000 บาทเท่านั้น และเนื่องจากเป็นข้าวนุ่มจึงทำให้ผสมในปริมาณเยอะขายได้โดยที่ผู้บริโภคไม่รู้สึกที่การเปลี่ยนแปลงรสชาติมาก แต่ยังมีเรื่องของกลิ่นหอมของข้าวที่ยังไม่มากเท่าข้าวหอมมะลิ โดยข้าวหอมปทุมนั้นเป็นข้าวที่เป็นปัญหาของการใช้ผสมกับข้าวหอมมะลิมาเป็นเวลานานแล้ว และยังแก้ไม่หายเนื่องจากผลต่างของราคาต้นทุนที่ต่างจากข้าวหอมมะลิค่อนข้างมาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาข้าวขาวชนิดต่าง ๆ ขึ้นมาให้ความนุ่มอร่อยหรือมีสารอาหารบางชนิดที่ดีขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้นโดยที่มีราคาขายที่ต่ำกว่าข้าวหอมมะลิ เช่น ข้าว กข 43 ที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำเหมาะสมกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำตาลซึ่งมีรสชาติที่นุ่มอร่อยคล้ายกับข้าวหอมมะลิแต่ความหอมจะยังไม่เท่ากับข้าวหอมมะลิ และยังมีข้าว กข 79 เป็นข้าวที่ได้รับรองพันธุ์เมื่อปี 2562 ซึ่งเป็นข้าวที่คุณลักษณะทางกายภาพที่คล้ายกับข้าวหอมมะลิอย่างมาก และยังมีความอ่อนนุ่มของเมล็ดเมื่อหุงสุกคล้ายกับข้าวหอมมะลิ แต่มีราคาขายอยู่ที่ตันละ 8,000-9,000 บาทด้วยความที่มีรสชาติคล้ายข้าวหอมมะลิ และมีความนุ่มแต่ราคาไม่สูงอีกทั้งยังมีความทนปลูกได้ดี ทำให้ข้าวชนิดนี้

ถูกนำมาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิต่างมากในปัจจุบัน หรือมีการนำข้าว กข 79 ร้อยเปอร์เซ็นต์มาขายในราคาข้าวหอมมะลิต่างเช่นข้าวในปี พ.ศ. 2562 เนื่องจากความคล้ายกันมากกับข้าวหอมมะลิ ทำให้ผู้รับประทานโดยส่วนมากจะแยกแยะสัมผัสไม่ค่อยออกกว่าเป็นข้าวหอมมะลิ หรือข้าว กข 79 แต่ทั้งนี้ในเรื่องของกลิ่นหอม ข้าวหอมมะลิก็ยังมีกลิ่นที่หอมมากกว่าข้าว กข 79 ซึ่งจะเห็นว่าถ้าข้าวหอมมะลิถูกนำมาผสมกับ กข 79 จะทำให้การตรวจสอบด้วยไอโอดีน หรือการชิมรสชาตินั้นทำได้ยากมากหรือเป็นไปได้เลย เนื่องจากรสชาติและปริมาณอะมิโลสที่คล้ายกัน โดยการตรวจสอบแบบเก่าจะทำได้วิธีเดียวคือการตรวจสอบทาง DNA

2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของค่าไดอิเล็กตริก

ค่าไดอิเล็กตริกเป็นตัวบ่งบอกความเป็นฉนวนไฟฟ้าของวัสดุแต่ก็ยังมีหลายสิ่งดังเช่นอาหาร อวัยวะในร่างกาย และผลิตผลทางการเกษตรที่นำกระแสไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่งแต่ยังคงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก ค่าไดอิเล็กตริกจะส่งผลในเรื่องการกระจายของกระแสในพื้นที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นค่าไดอิเล็กตริกจึงเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการออกแบบโดยใช้คลื่น RF หรือไมโครเวฟ การประยุกต์ใช้ความถี่ในย่าน RF หรือไมโครเวฟนอกจากใช้ในการสื่อสาร และแปรรูปอาหารแล้วยังสามารถทำได้อีกหลายอย่าง เช่น เซ็นเซอร์ (Sensor) หรือใช้ตรวจสอบสิ่งของ (Investigate) โดยที่กล่าวมาทั้งหมดจะใช้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้น ๆ ในการวิเคราะห์เป็นหลัก วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงก็จะยิ่งบอกถึงการมีขั้ว (Polar) มาก และความสามารถในการเก็บประจุรวมถึงความเป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถดูความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และขั้วได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกกับขั้วของตัวทำละลาย (www.kku.ac.th)

ตัวทำละลาย	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)
Non polar	1-20
Semi polar	20-50
Polar	>50

วัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะแสดงผลของการดูดซับ และสะท้อนพลังงาน ซึ่งถ้าวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากก็จะทำให้คลื่นทะลุผ่านเข้าไปได้น้อย เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวกำหนดค่าการกักเก็บพลังงานทำให้คลื่นที่ส่งผ่านไปจะเกิดการถูกดูดซับ และสะท้อนที่ผิว ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงก็ยิ่งสะท้อนมาก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) จะบอกถึงการสูญเสียของพลังงานที่ได้กักเก็บไว้ ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปจะออกมาในรูปของความร้อน กลไกการสูญเสียจะประกอบไปด้วย ไอออนิก (Ionic) ไดโพลาร์ (Dipolar) อะตอมมิก (Atomic) และอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) ที่ความถี่ในช่วง RF และ Microwave กลไกของ Ionic และ Dipolar จะมีความโดดเด่นที่สุดทำให้ได้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกตามสมการที่ 2.1 โดยที่ ϵ''_d และ ϵ''_σ คือค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกในช่วงของ Dipole และ Ionic ϵ_0 คือค่า Permittivity ที่สภาพสุญญากาศหรืออากาศว่าง ($8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) σ คือค่าความนำของวัสดุ (Sm^{-1}) และ ω คือความถี่เชิงมุม

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_\sigma = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (2.1)$$

จากตัวแปรจะสังเกตได้ว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะแปรผันตามค่าความนำ ซึ่งถ้าตัววัสดุมีค่าความนำมากก็จะยิ่งมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมากขึ้นทำให้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหารแปรรูปหรืออาหารสำเร็จรูปได้ใช้การเพิ่มเกลือผสมลงไปในการอาหารซึ่งนอกจากการเพิ่มรสชาติแล้วยังช่วยในเรื่องลดระยะเวลาการอุ่นอาหารด้วยไมโครเวฟลงอย่างมาก และจากสมการจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะแปรผันกับค่าความถี่ ซึ่งทำให้ทราบแนวโน้มคร่าว ๆ ได้ว่าความถี่ที่สูงขึ้นจะมีผลให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกลดลง แต่จะมีช่วงความถี่ที่จุดหนึ่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสที่จะเกิดกราฟเป็นรูปทรงภูเขา ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า Relaxation frequency ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกจะแปลงพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไปเป็นการสูญเสียในรูปแบบของความร้อน สามารถหาได้ตามสมการที่ 2.2 โดยเฉพาะคลื่นในย่านความถี่ RF และ Microwave โดยที่ ρ ความหนาแน่นตัววัสดุ (kg/m^3) C_p คือค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) $\frac{dT}{dt}$ คืออัตราส่วนของอุณหภูมิต่อเวลา ($^\circ\text{C/s}$) f คือความถี่ (Hz) E คือความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m) และ ϵ'' คือค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก สังเกตได้ว่ายังมีค่าการสูญเสีย

ไดอิเล็กตริกมากก็จะมี การสูญเสียในรูปความร้อนมากตามไปด้วย และยังขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าอีกด้วย

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = 55.63 \times 10^{-12} f E^2 \epsilon'' \quad (2.2)$$

ค่าความทะลุทะลวง (Penetration depth) เป็นอีกหนึ่งสิ่งที่ต้องรู้เพื่อที่จะได้ออกแบบระบบหรือออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งค่าความทะลุทะลวงนี้เป็นตัวบอกความลึกที่คลื่นสามารถส่งผ่านไปใ้ในเนื้อวัสดุได้ สามารถหาได้ตามสมการที่ 2.3 โดยที่ d_p คือค่าความลึกในการทะลุทะลวง (m) λ_0 คือค่าความยาวคลื่นที่อากาศว่าง (m) ϵ' คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และ ϵ'' คือค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) จากสมการที่ 2.3 สามารถเขียนได้อีกรูปตามสมการที่ 2.4 เมื่อ c เป็นค่าความเร็วแสง (3×10^8)

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi \epsilon''} \quad (2.3)$$

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' [\sqrt{1+(\epsilon''/\epsilon')^2} - 1]}} \quad (2.4)$$

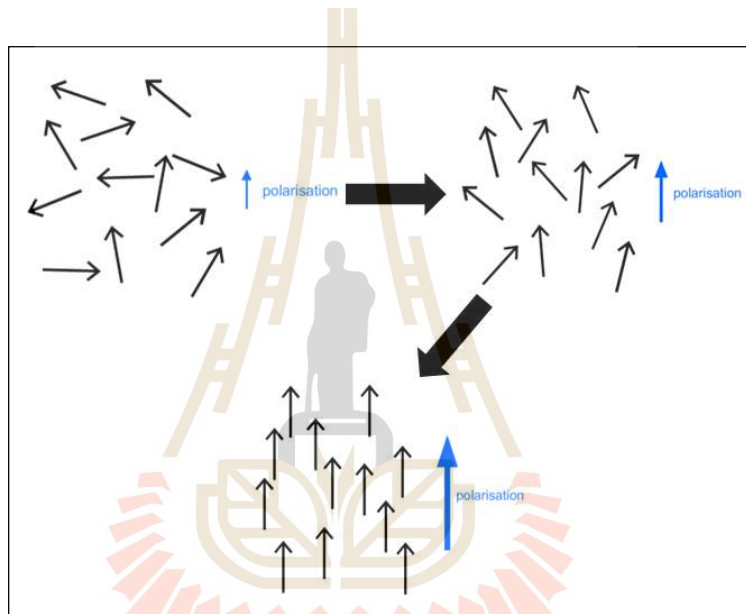
มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เช่น ความชื้นหรือปริมาณน้ำในของสิ่งนั้น ความถี่ของสนามไฟฟ้า อุณหภูมิของตัววัสดุ ความหนาแน่นของวัตถุ โครงสร้างของตัววัตถุ ชั้นส่วนภายในและภายนอกของวัตถุ ปริมาณช่องอากาศข้างในวัตถุ สามารถอธิบายปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริกได้ตามนี้ (จะกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 2.4)

ความถี่ (Frequency)

การกลับขั้ว (Dipole rotation) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกตามความถี่ในสนามไฟฟ้าคือเกิดการจัดเรียงของประจุตามการโพลาไรซ์ (Polarize) ที่

เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าตามรูปที่ 2.4 และจะเกิดการสั่นขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้ามีการกลับตัวด้วยความเร็วในการสั่นขึ้นอยู่กับความถี่ และอุณหภูมิ อธิบายได้โดยสมการคณิตศาสตร์ที่คิดขึ้นโดย Debye เพื่อใช้หาค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุมีขั้วตามสมการดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงประจุตามทิศทาง Polarization ในสนามไฟฟ้า
(www.doitpoms.ac.uk)

โดยที่ ϵ_{∞} แทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง (High frequency dielectric constant) ϵ_s แทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ศูนย์หรือ DC (Static dielectric constant) โดยทั้งสองค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่การสูญเสียเป็นศูนย์ ω แทนความถี่เชิงมุม ($2\pi f$) และ τ แทนค่าการผ่อนคลาย (Relaxation time) และจากสมการดังกล่าวซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนสามารถแยกได้เป็นสองส่วนดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.6)$$

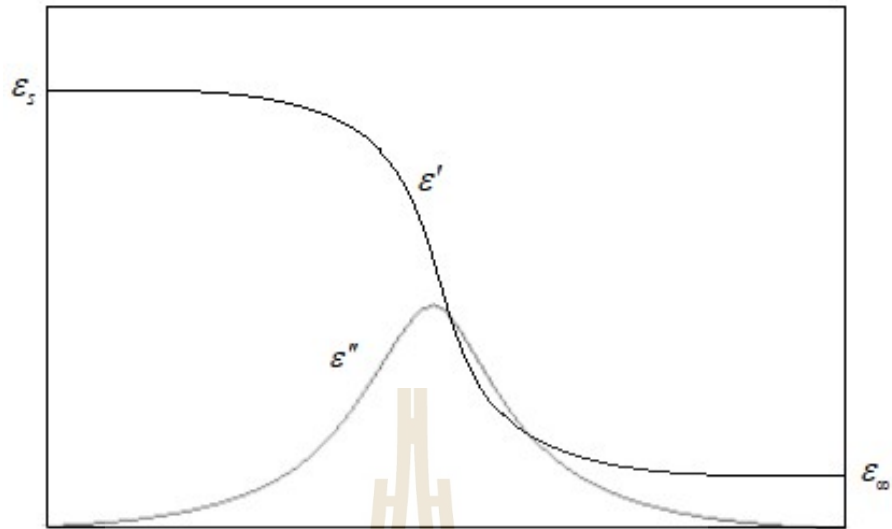
$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.7)$$

โดยที่ ϵ' เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และ ϵ'' เป็นค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ส่วนที่เป็นจำนวนจริงหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการเก็บพลังงานของวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ถ้ามีค่าสูงจะบอกถึงการเก็บพลังงานได้มากอีกทั้งค่านี้ยังเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามความถี่และอุณหภูมิ และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพหรือค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เป็นค่าการสูญเสียไปเป็นความร้อน หรือค่าที่แสดงถึงความสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นความร้อนที่ตัววัตถุ

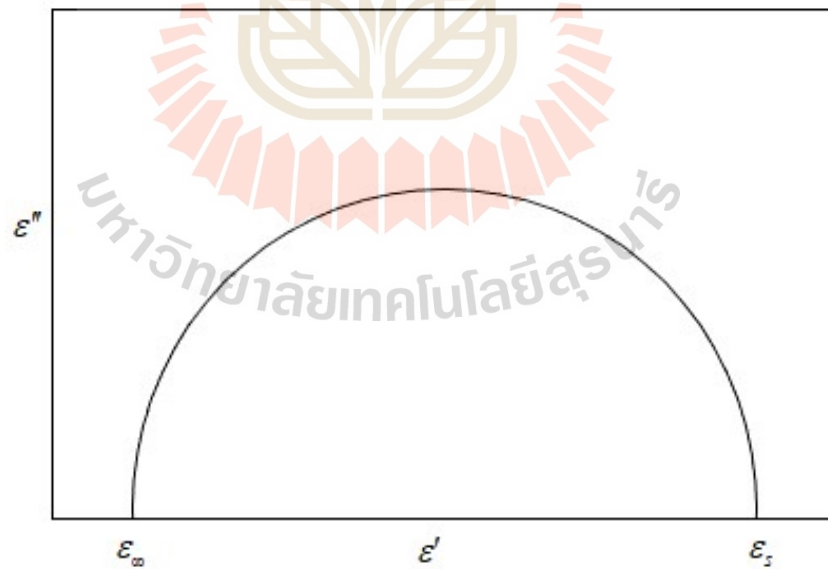
ดูความสัมพันธ์ของสมการได้ตามรูปที่ 2.5 เห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำมาก และสูงมากที่อยู่นอกการผ่อนคลายโมเลกุลจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ ϵ_s และ ϵ_{∞} ตามลำดับเปรียบได้กับมีการสูญเสียเป็นศูนย์ ที่ความถี่กลางค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูงที่สุดที่ความถี่ผ่อนคลาย (Relaxation frequency) $\omega = \frac{1}{\tau}$

สมการของ Debye สามารถแทนด้วยภาพครึ่งวงกลม $\epsilon'' - \epsilon'$ โดยมีค่า $\epsilon' = \epsilon_s$ และ $\epsilon'' = 0$ ที่ความถี่ต่ำสุดและ $\epsilon' = \epsilon_{\infty}$ และ $\epsilon'' = 0$ ที่ความถี่สูงสุดตามรูปที่ 2.6 ซึ่งถูกเรียกว่าแผนภาพ Cole-Cole (Nelson, 1973)

ตารางที่ 2.5 จะยกตัวอย่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีขั้วในย่านความถี่ไมโครเวฟโดยแทนค่าลงไปในสมการของ Debye เมื่อใช้พารามิเตอร์ความผ่อนคลาย (Relaxation parameter) ตามตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) ของวัสดุตามสมการ Debye relaxation (Nelson, 1973)



รูปที่ 2.6 แผนภาพ Cole-Cole ของวัสดุตามสมการ Debye relaxation (Nelson, 1973)

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) กับความถี่ของน้ำที่อุณหภูมิ 20° C (Nelson, 1973)

ความถี่ (GHz)	ϵ'	ϵ''
0.6	80.3	2.75
1.7	79.2	7.9
3.0	77.4	13.0
4.6	74.0	18.8
7.7	67.4	28.2
9.1	63.0	31.5
12.5	53.6	35.5
17.4	42.0	37.1
26.8	26.5	33.9
36.4	17.6	28.8

ตารางที่ 2.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการของ Debye ที่ relaxation frequency ของน้ำในอุณหภูมิต่างกัน (Nelson, 1973)

อุณหภูมิ (°C)	ϵ_s	ϵ_∞	τ (ps)	Relaxation frequency (GHz)
0	87.9	5.7	17.67	9.007

อุณหภูมิ (°C)	ϵ_s	ϵ_∞	τ (ps)	Relaxation frequency (GHz)
10	83.9	5.5	12.68	12.552
20	80.2	5.6	9.36	17.004
30	76.6	5.2	7.28	21.862
40	73.2	3.9	5.82	27.346
50	69.9	4.0	4.75	33.506
60	66.7	4.2	4.01	39.690

อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญต่อการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) ของวัสดุนั้นอีกด้วย และโดยเฉพาะวัสดุที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อน และมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เช่นอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิมากทำให้การวัดค่าไดอิเล็กตริกหรือการทำวิจัยที่ใช้ค่าไดอิเล็กตริกในการวิเคราะห์นั้นต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้ดี โดยอุณหภูมิจะส่งผลโดยตรงต่อการโพลาไรซ์แบบ Dipolar เนื่องจากการโพลาไรซ์ชนิดนี้จะมีตัวแปรของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้องด้วยตามสมการของ α_d ที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป ซึ่งถ้าวัสดุมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากก็จะทำให้อุณหภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมากด้วย

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า Relaxation time จะลดลง และจุดสูงสุดของค่าสูญเสียดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 จะเคลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้น ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีแนวโน้มที่จะลดลงตามอุณหภูมิด้วยเป็นผลมาจากการผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (Dielectric relaxation) ในขณะที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ทั้งขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าสูงหรือต่ำกว่า Relaxation frequency สามารถดูตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้จากตารางที่ 2.7 โดยเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.5 เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) กับความถี่ของน้ำที่อุณหภูมิ 50° C (Nelson, 1973)

ความถี่ (GHz)	ϵ'	ϵ''
0.6	69.9	1.25
1.7	69.7	3.6
3.0	68.4	5.8
4.6	68.5	9.4
7.7	67.2	14.5
9.1	65.5	16.5
12.5	61.5	21.4
17.4	56.3	27.2
26.8	44.2	32.0
36.4	34.3	32.6

ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของวัตถุเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลง เนื่องจากจะบ่งบอกถึงปริมาณของโพรงอากาศภายในวัตถุชิ้นนั้น ซึ่งอากาศจะมีค่าไดอิเล็กตริกเพียงแค่ 1 เท่านั้นถ้ามีโพรงอากาศหรือฟองอากาศในวัตถุที่มีไดอิเล็กตริกสูงจะทำให้เกิดการวัดค่าที่เพี้ยนเยอะมาก และโพรงอากาศยังทำให้เกิดการสะท้อนภายในตัววัตถุ ดังนั้นการวัดค่าไดอิเล็กตริกจึงต้องกำหนดมาตรฐานให้ตัววัตถุมีความหนาแน่นประมาณหนึ่งเพื่อลดการผิดพลาดที่ได้จากการวัดมากที่สุด

ความชื้น (Moisture)

ความชื้นเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกมากที่สุดเนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว และมีค่าไดอิเล็กตริกที่สูงอีกทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยที่ความชื้นก็เปรียบเสมือนกับน้ำที่อยู่ในตัววัสดุ ถ้ามีความชื้นมากก็จะมีน้ำมากทำให้ความสามารถในการโพลาไรซ์แบบ Dipolar (α_d) มีค่ามากขึ้นจึงทำให้ค่าไดอิเล็กตริกมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

2.3.3 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการตรวจสอบด้วยไดอิเล็กตริกกับวิธีการตรวจสอบแบบอื่นในการตรวจสอบข้าวที่มีการผสมต่างพันธุ์

เนื่องจากประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศทางการเกษตรที่มีการส่งออกข้าวมากที่สุดประเทศหนึ่ง และยังมีประชากรภายในประเทศที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลักทำให้ต้องมีการตรวจสอบคุณภาพ และสายพันธุ์ข้าวให้ดีกว่าก่อนที่จะส่งออกหรือค้าขายภายในประเทศ เพื่อป้องกันปัญหาการปลอมปนที่อาจก่อให้เกิดปัญหาใหญ่ได้ โดยการตรวจสอบสายพันธุ์ข้าวหรือข้าวที่ถูกผสมกับข้าวต่างสายพันธุ์ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี ซึ่งวิธีที่ใช้เป็นส่วนใหญ่จะมี 4 วิธีได้แก่ การตรวจสอบโดยใช้ไอโอดีน การใช้เครื่องยิงสี และขนาด การตรวจสอบด้วยผลแลป (DNA) และการชิมรสชาติเมื่อหุงสุก

การตรวจสอบด้วยไอโอดีน (Iodine test) หรือเรียกอีกอย่างว่าการตรวจสี โดยจะใช้สารละลายไอโอดีนไปย้อมเม็ดข้าวที่ขัดสีแล้ว วิธีนี้จะถูกใช้เพื่อตรวจสอบการปลอมปนกันได้ทั้งข้าวเจ้า และข้าวเหนียวโดยอาศัยการตรวจสอบจากสีที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายไอโอดีนกับแป้งชนิดหนึ่งในตัวข้าวที่เรียกว่าอะมิโลส ตามรูปที่ 2.7 โดยสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (IRRI) ได้แบ่งประเภทความอ่อนนุ่มของข้าวได้ 4 ประเภทดังตารางที่ 2.8 ขั้นตอนการตรวจสอบหลังจากเตรียมสารละลายไอโอดีนแล้วให้เตรียมข้าวที่จะตรวจสอบไว้ในภาชนะแต่ต้องเป็นข้าวที่ผ่านการสีแล้ว จากนั้นนำสารละลายเทลงไปในภาชนะเพื่อย้อมเม็ดข้าวให้ท่วมประมาณ 2 นาที จากนั้นจึงเทสารละลายออก และสังเกตดูที่สีของเม็ดข้าวว่าเป็นสีเดียวกันทั้งหมดหรือไม่ ซึ่งความเข้มของสีจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของอะมิโลส วิธีการตรวจสอบด้วยไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่าย และเป็นที่ยอมรับอย่างมากเนื่องจากมีความสะดวกในการทดสอบ หาซื้ออุปกรณ์ง่าย และรวดเร็ว แต่ควรมีเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ใช้งานควบคู่ไปด้วยถ้าต้องการความละเอียด และแม่นยำมากขึ้น ซึ่งในอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีขนาดใหญ่โดยส่วนมากจะไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ทำให้การตรวจสอบพิจารณาจากการสังเกตด้วยตาจึงอาจมีความแม่นยำน้อยกว่าใช้เครื่องมือ การตรวจสอบด้วยไอโอดีนยังมีข้อเสียที่สำคัญคือถ้าข้าวที่ผสมหรือมีการปนกันมามีปริมาณอะมิโลสที่ใกล้เคียงกันมากหรือเท่ากัน เช่น ข้าว

หอมมะลิ 105 ผสมกับข้าวหอมปทุม หรือข้าว กข 79 จะทำให้แยกด้วยสีแทบจะไม่ได้เลยถึงแม้ว่าจะใช้เครื่องมือก็ตามเนื่องจากสีที่เกิดขึ้นเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างอะมิโลสกับสารละลายไอโอดีนเท่านั้น

ตารางที่ 2.8 การจัดประเภทของข้าวและเนื้อสัมผัสตามปริมาณอะมิโลส (srn-rsc.ricethailand.go.th)

ประเภท	เปอร์เซ็นต์อะมิโลส	เนื้อสัมผัส
ข้าวเหนียว	0-2	เหนียวมาก
ข้าวอะมิโลสต่ำ	10-19	นุ่ม
ข้าวอะมิโลสปานกลาง	20-25	ไม่แข็งแต่ค่อนข้างร่วน
ข้าวอะมิโลสสูง	25-34	แข็ง และร่วน



รูปที่ 2.7 การตรวจสอบปริมาณอะมิโลสจากสีด้วยสารละลายไอโอดีน (publiclab.org)

การตรวจสอบด้วยการยิงสี และขนาด สามารถดูตัวอย่างได้จากรูปที่ 2.8 เป็นการคิดเอาสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เม็ดข้าวออกไปเช่นเปลือก ก้อนกรวด หรือเศษหญ้าเครื่องยิงสี และขนาดเป็นเครื่องมือที่แทบทุกโรงสีข้าวมีอยู่แล้วเนื่องจากจำเป็นต้องใช้คัดข้าวก่อนส่งขาย แต่เครื่องมือนี้ยังใช้คัดแยกพันธุ์ข้าวได้บ้างแม้ว่าการคัดแยกพันธุ์ข้าวจะไม่ใช่วิธีจุดประสงค์ของเครื่อง แต่กับข้าวบางพันธุ์ที่มีสีต่างกันมาก หรือมีความยาวเมล็ดที่ต่างกันค่อนข้างมาก ก็สามารถใช้แยกออกมาได้ และสามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยการไหลข้าวผ่านตัวเซ็นเซอร์ และทำการเป่าหรือดีดเมล็ดนั้นออก แต่เนื่องจากว่าไม่ใช่จุดประสงค์ที่แท้จริงในการทำงานของเครื่องจึงไม่ละเอียดพอจะแยกเม็ดข้าวที่มีความใกล้เคียงกันทั้งสีหรือขนาดได้



รูปที่ 2.8 เครื่องสำหรับใช้คัดแยกสีเม็ดข้าวโดยการดีดออก (yontpholdee.co.th)

การตรวจสอบทางพันธุกรรมหรือการตรวจสอบ DNA (ดูตัวอย่างการตรวจสอบพันธุกรรมของข้าวได้ตามรูปที่ 2.9) เป็นการตรวจสอบโดยใช้ยีนของข้าวไปทดสอบ และตรวจดูรหัสพันธุกรรม (RNA) ทางห้องแล็บเพื่อดูว่าเป็นข้าวพันธุ์อะไร และมีการตัดต่อทางพันธุกรรม (GMO) หรือไม่ โดยการทดสอบด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาตรวจสอบขั้นต่ำประมาณ 48 ชั่วโมง ถือว่าค่อนข้างนาน แต่ผลที่ได้จะละเอียด และมีความแม่นยำมากที่สุด โดยสามารถหาข้อมูลทางพันธุกรรมทั้งหมดของข้าวที่นำไปตรวจ ในปัจจุบันสามารถตรวจสอบ DNA ได้จากแล็บหลาย ๆ ที่เช่นตามมหาวิทยาลัยต่าง ๆ แต่ผลการตรวจอาจจะใช้เวลาค่อนข้างนานตั้งแต่ 48 ชั่วโมง จนไปถึงเป็นเดือนขึ้นอยู่กับแล็บนั้น ๆ



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการตรวจสอบพันธุกรรมของข้าว (www.wonnapob.com)

การทดสอบด้วยประสาทสัมผัส หรือการชิมข้าวที่หุงสุกแล้ว วิธีนี้จะเป็นการนำข้าวที่ต้องการตรวจสอบมาตวงชั่งกับน้ำตามปริมาณที่กำหนด และหุงให้สุกตามเวลา ตามรูปที่ 2.10 จากนั้นรับประทานเพื่อวิเคราะห์รสชาติ โดยการชิมรสชาติจำเป็นต้องให้ผู้เชี่ยวชาญทางด้านรสชาติมาวิเคราะห์เท่านั้น และวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเนื่องจากถึงแม้ว่าผู้เชี่ยวชาญจะมีประสบการณ์มากแค่ไหนแต่การแยกรสชาติก็ยังสามารถทำได้ยากมาก



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการวิเคราะห์รสชาติของข้าวด้วยการชิม (www.wonnapob.com)

นอกจากนี้ยังมีการเริ่มหาวิธีตรวจสอบข้าวด้วยวิธีอื่นเกิดขึ้นอยู่บ้างแต่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้งานจริงเนื่องจากยังอยู่ในช่วงการวิจัย และพัฒนาต่อไป เช่นการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์จากภาพถ่าย หรือการถ่ายภาพ (Digital image analysis) ดังเช่นงานวิจัยของ Kleawphaipan, Somprasong, Srahongthong, and Pattanasiri, (2019) ที่ประมวลผลภาพถ่ายจากขนาด และรูปทรงของวัสดุทำให้ทราบว่าเมล็ดข้าวที่ใช้ตรวจสอบเป็นเมล็ดข้าวพันธุ์อะไร ทั้งนี้วิธีการใช้การประมวลผลจากภาพถ่าย (Image processing) เพื่อตรวจสอบข้าว ได้มีงานวิจัยใหม่ออกมาตลอดแต่ก็ยังไม่สามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร

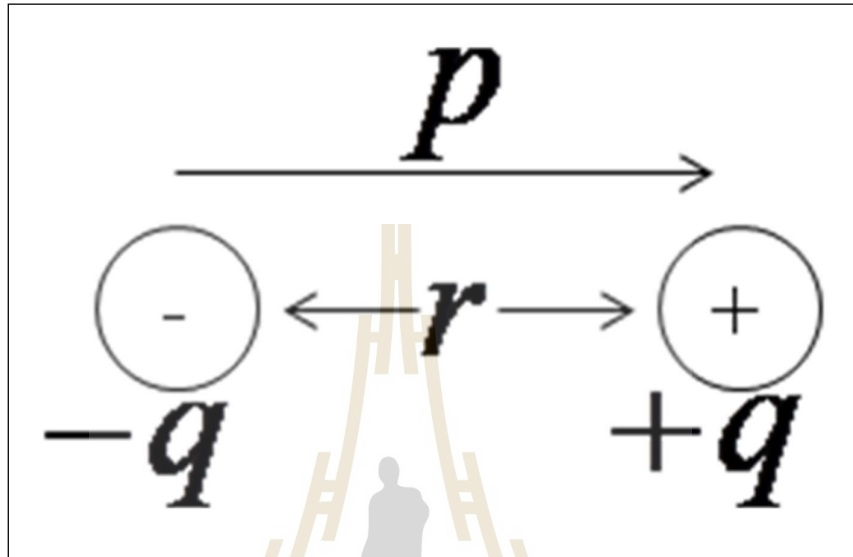
ข้อเสียจากวิธีการตรวจสอบข้างต้นที่กล่าวมาทำให้ได้แนวคิดสำหรับการตรวจสอบแบบใหม่ที่จะมาใช้แทน หรือใช้ควบคู่กับวิธีแบบเดิม โดยวิธีการใหม่คือการตรวจสอบด้วยค่าไดอิเล็กตริกของเมล็ดข้าว เนื่องจากธรรมชาติของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นตัวกำหนดความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวทางไฟฟ้าของวัสดุทุกชนิดในโลกทำให้วัสดุทุกสิ่งในโลกจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่ไม่เหมือนกันร้อยเปอร์เซ็นต์ถึงแม้ว่าจะมีบางชนิดที่มีค่าไดอิเล็กตริกในแต่ละความถี่ใกล้เคียงกันก็ตามแต่ก็จะต้องมีบางความถี่ที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่ Relaxation time ที่ต่างกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นคุณสมบัติจุดนี้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อตรวจสอบการผสมของข้าวได้ และข้อดีต่าง ๆ ของการตรวจสอบด้วยค่าไดอิเล็กตริกที่มีมากกว่าวิธีตรวจสอบแบบเดิม

การตรวจสอบด้วยค่าไดอิเล็กตริกสามารถเลือกใช้ได้หลายความถี่แต่จะใช้ได้ดีในย่านความถี่ต่ำ และเลือกความถี่ที่เป็น ISM band (Industrial Sciences Medicine) ได้ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่ต้องขออนุญาตในการใช้งาน ในด้านความเร็วในการตรวจสอบสามารถทำได้เร็วเนื่องจากใช้การสะท้อนของสัญญาณที่ส่งไปมาวิเคราะห์ แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ต้องมีการเก็บข้อมูลค่าไดอิเล็กตริกที่ค่อนข้างหลากหลายสถานะ เช่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ หรือความชื้นในข้าว และสถานที่ปลูก โดยเก็บเป็นข้อมูลเอาไว้ใช้วิเคราะห์เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกจะมีผลการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรภายนอกดังที่กล่าวมาค่อนข้างเยอะจึงอาจจะใช้เวลาช่วงแรกที่ใช้เก็บข้อมูลจะทำได้ลำบาก และนานมาก และในการตรวจสอบต้องใช้การเพิ่มเทคนิคบางอย่างเข้าไปเนื่องจากข้าวแต่ละสายพันธุ์เมื่อวางขายจะมีการกำหนดค่าความชื้นให้มีค่าน้อยมากประมาณ 8 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละชนิดจะน้อยมากจนมีความใกล้เคียงจนแยกไม่ออกซึ่งต้องหาวิธีที่จะเพิ่มความแตกต่างของค่าไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละพันธุ์ให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นเพื่อให้การตรวจสอบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การเพิ่มน้ำเกลือลงไปในข้าวเพื่อเพิ่มความแตกต่างของค่าไดอิเล็กตริกของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ในแต่ละความถี่

2.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า

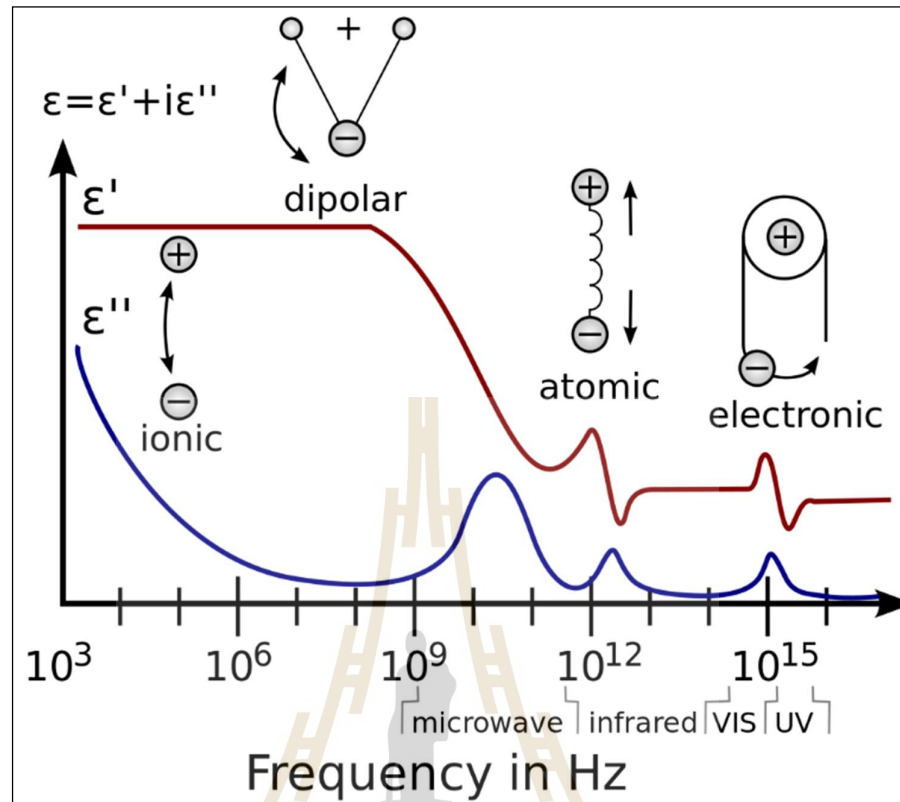
ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงที่มาของสมการ และการเกิดโพลาริซชันต่าง ๆ ภายในวัสดุนั้นซึ่งเป็นที่มาของสมการ Debye (Debye equation) ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) เป็นค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กำหนดความสัมพันธ์ของวัสดุชนิดนั้นกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่วิทยุหรือ RF (Radio-frequency) และคลื่นไมโครเวฟ (Microwave frequency) ไดอิเล็กตริกเป็นตัวบ่งบอกถึงการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีของวัตถุนั้นหรือเป็นฉนวน (Insulator) ตรงกันข้ามกับวัสดุประเภทโลหะที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากโลหะนั้นมีตัวอิเล็กตรอนอิสระมากมายโดยหากทำการป้อนสนามไฟฟ้าไปที่วัสดุไดอิเล็กตริกจะทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (Electric dipole moment) ขึ้นมาเป็น $p = qr$ โดยมีหน่วยเป็น Debye ซึ่ง 1 Debye จะมีค่าเท่ากับ 3.33×10^{-30} Cm (Coulomb meter) เมื่อ q คือประจุไฟฟ้า (C) และ r คือระยะห่างระหว่างประจุ (m) ไดโพลทางไฟฟ้าเป็นหน่วยชนิดหนึ่งที่เกิดมาจากประจุลบ และประจุบวกที่มีปริมาณเท่ากันอยู่ห่างกันในระยะสั้นโดยไดโพลโมเมนต์ หรือสมการ $p = qr$ จะมีทิศทางเคลื่อนที่จากประจุลบไปยังประจุบวก โดยรูปที่ 2.11 จะแสดงตัวอย่างทิศทางของไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น S. O. Kasap (2000) ไดโพลอาจเกิดได้โดยที่สารนั้น ๆ ไม่ต้องอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าอีกด้วยโดยจะเรียกว่าไดโพลถาวร

(Permanent dipole) ซึ่งไดโพลโมเมนต์นั้นจะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ (Polarization) ภายในสารตัวกลางเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007)



รูปที่ 2.11 ทิศทางของไดโพลโมเมนต์ (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007)

กลไกของไดอิเล็กตริกเมื่อตัวกลางเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้ามีอยู่หลายชนิดซึ่งเรียกกกลไกนั้นว่าการโพลาไรซ์ (Polarization) โดยทั่วไปแล้วกลไกของไดอิเล็กตริกจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน Relaxation (Ionic polarization และ Dipole polarization) และ Resonance (Atomic polarization และ Electronic polarization) สามารถดูสเปกตรัมการโพลาไรซ์ของไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่าง ๆ ได้จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่า Ionic polarization และ Dipole polarization จะเป็นการโพลาไรซ์ที่อยู่ในย่านของ RF (Radio frequency) และ Microwave ตามลำดับ อีกทั้งยังรวมไปถึงความถี่ศูนย์หรือ DC (Direct current) อีกด้วย ในส่วน Atomic polarization และ Electronic polarization จะเป็นการโพลาไรซ์ที่อยู่ในย่านความถี่ที่สูงมาก ๆ ในช่วงความถี่แสงขึ้นไปจนถึงช่วงที่เป็นรังสี



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ที่ความถี่ต่าง ๆ ทั้งในกลไก Relaxation และ Resonance (en.wikipedia.org)

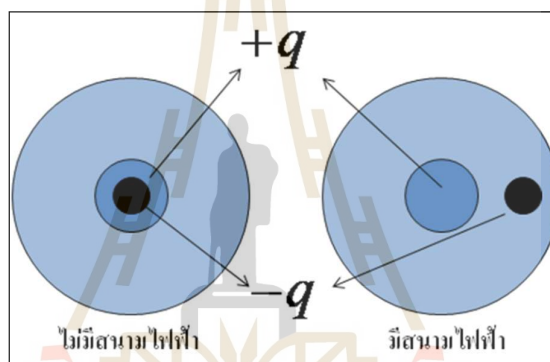
กลไกการเกิดโพลาไรซ์จะสามารถแบ่งจำนวนได้ 3 ชนิด คือ Ionic polarization Dipole polarization และ Electronic polarization โดยการโพลาไรซ์ในแต่ละชนิดนั้นจะเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารวัสดุที่เข้าไปอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าเนื่องจากสารที่เข้าไปภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีโครงสร้างของพันธะโมเลกุลเฉพาะตัว รวมไปถึงโครงสร้างของอะตอมด้วยที่จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ชนิดต่าง ๆ โดยในส่วนถัดไปจะเป็นการแสดงที่ว่าการเกิดโพลาไรซ์ในแต่ละชนิด โดยจะพิจารณาที่สนามแบบ DC ก่อนจากนั้นค่อยหาการโพลาไรซ์รวมจากการโพลาไรซ์ทั้งสามชนิด แล้วจึงมาพิจารณากับสนามแบบ AC หรือการวิเคราะห์แบบ relaxation ซึ่งจะเป็นการพิสูจน์ที่มาของสมการ Debye

ในส่วนของกลไกการเกิดโพลาไรซ์ (Polarization mechanisms) ของ Electronic polarization นั้นมาจากสนามไฟฟ้าเข้าไปแยกกลุ่มของประจุอิเล็กตรอน และนิวเคลียสไปคนละทิศทางกัน จึงทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นดังรูปที่ 2.13 โดยไดโพลโมเมนต์ของอะตอม \vec{p} จะแสดงดัง

สมการที่ 2.8 กรกฎ วัฒนวิเชียร (2007) เมื่อ α_e คือความสามารถในการโพลาไรซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ และ \vec{E} คือสนามไฟฟ้า ค่าความสามารถการโพลาไรซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์หาได้จากสมการที่ 2.9 (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) เมื่อ r คือรัศมีของอะตอม ซึ่งการโพลาไรซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะเกิดขึ้นได้กับวัสดุทุกชนิด

$$\vec{p} = \alpha_e \vec{E} \quad (2.8)$$

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (2.9)$$



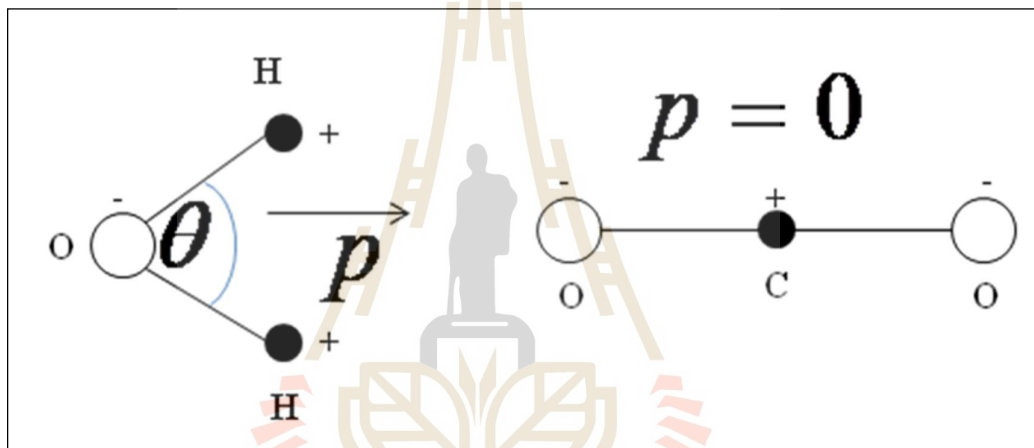
รูปที่ 2.13 Electronic polarization ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าไปแยกกลุ่มอิเล็กตรอนออกจากนิวเคลียส

Dipole polarization จะพบในสารที่มีไดโพลโมเมนต์แบบถาวร เช่นน้ำที่มีไดโพลโมเมนต์ถาวร 1.87 Debye ตัวอย่างของสารที่มีไดโพลโมเมนต์แบบถาวร และไม่มีไดโพลโมเมนต์แบบถาวร แสดงดังรูปที่ 2.14 จากรูปจะเห็นว่าน้ำจะมีไดโพลโมเมนต์แบบถาวร จากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำที่มีการกางมุมออก ประมาณ 104° ทำให้ไดโพลโมเมนต์ไม่ได้หักล้างเป็นศูนย์ ซึ่งต่างจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ q^+ และ q^- หักล้างกันเป็นศูนย์ทำให้ไม่เกิดไดโพลโมเมนต์แบบถาวร การสั่นที่เกิดจากสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนจะขึ้นแบบสุ่ม ซึ่งถ้าอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไดโพลโมเมนต์จะมีคุณสมบัติเปรียบเสมือนแม่เหล็กโดยจะเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า โดยจะเรียกว่า Orientation polarization หรือการโพลาไรซ์แบบเรียงตัว โดยค่าไดโพลโมเมนต์จะหาได้จากสมการที่ 2.10 (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) โดยที่ p_0 คือไดโพลโมเมนต์ถาวร T คืออุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$) \vec{E} คือสนามไฟฟ้า (V/m)

k คือค่าคงที่ของ Boltzmann ($J/^{\circ}K$) และ k คือไดโพลโมเมนต์ถาวร ค่า Orientation polarization สามารถหาได้ตามสมการที่ 2.11 (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) เมื่อ $\vec{p} = \alpha_d \vec{E}$ โดย α_d คือค่าความสามารถในการในการเรียง หรือ Dipole orientational polarizability

$$\vec{p} \approx \frac{p_0^2 \vec{E}}{3kT} \quad (2.10)$$

$$\alpha_d = \frac{p_0^2}{3kT} \quad (2.11)$$

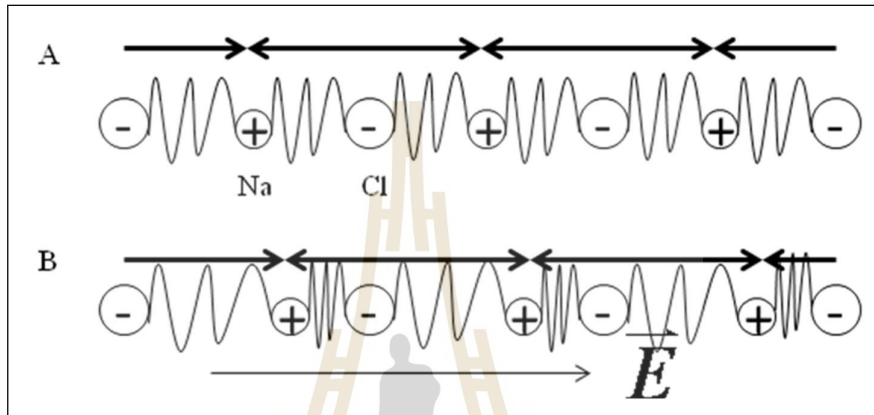


รูปที่ 2.14 ไดโพลโมเมนต์ของสารสองชนิด ได้แก่ น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007)

ในส่วนของไอออนิกโพลาไรซ์ หรือ Ionic polarization เป็นการโพลาไรซ์เมื่อสารที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ามีพันธะแบบไอออนิก เช่น NaCl จากรูปที่ 2.15 (Kasap, 2006) จะแสดงการเกิด Ionic polarization ของ NaCl เมื่ออยู่ และไม่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า การจับตัวของผลึก NaCl จะแสดงดังรูปที่ 2.10 A จะเห็นว่าไดโพลโมเมนต์จะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากไดโพลโมเมนต์ของประจุบวกจะวิ่งสวนทางกับประจุลบด้วยระยะทางที่เท่ากันจึงหักล้างกันทั้งหมดพอดี ($\vec{p} = \vec{p}_+ - \vec{p}_- = 0$) และเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะทำการดึงให้ Na เคลื่อนที่ไปทิศทาง +X จึงทำให้ไดโพลโมเมนต์ทางบวก (\vec{p}_+) มีค่ามากขึ้นในขณะที่ไดโพลโมเมนต์ของทางฝั่งลบ (\vec{p}_-) จะมาค่าลดลง (Kasap, 2006) ดังรูปที่ 2.10 B ทำให้ค่าไดโพลโมเมนต์ไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เกิดเป็น Ionic

polarization ขึ้นและสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.12 (Kasap, 2006) เมื่อ α_i คือความสามารถในการโพลาไรซ์แบบไอออนิก (Ionic polarizability) และ \vec{E} คือสนามไฟฟ้า (V/m)

$$\vec{p} = \alpha_i \vec{E} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.15 การเกิด Ionic polarization ใน NaCl โดย A เป็นการจับตัวของผลึก NaCl เมื่อไม่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า และ B เป็นการจับตัวของผลึก NaCl เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า (Kasap, 2006)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปการ Polarization แบบรวมได้ดังสมการที่ 2.13 สามารถเขียนต่อได้เป็นสมการที่ 2.14 (Kasap, 2006) เมื่อ N คือจำนวนของอะตอมต่อปริมาตร และสามารถหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ได้ตามสมการที่ 2.15 (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างประจุที่ถูกยึดเหนี่ยวต่อประจุอิสระ (Electric susceptibility) มีค่าเท่ากับ $\chi = (\epsilon_r - 1) = \frac{\vec{p}}{\epsilon_0 \vec{E}}$ (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) เมื่อ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก หรือในที่นี้คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ศูนย์ หรือ DC จึงอาจใช้เป็น ϵ_s (Static dielectric) ได้ และถ้าพิจารณาที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจะสามารถแยก \vec{p}_d ออกได้ทำให้เหลือเพียง \vec{p}_e และ \vec{p}_i

$$\vec{p} = \vec{p}_e + \vec{p}_d + \vec{p}_i \quad (2.13)$$

$$\vec{p} = N \vec{E} (\alpha_e + \alpha_d + \alpha_i) \quad (2.14)$$

$$\epsilon_r - 1 = \frac{N}{\epsilon_0} \left(\alpha_e + \alpha_i + \frac{p^2}{3k} \right) \quad (2.15)$$

โดยที่กล่าวมาเป็นการพิจารณาค่าไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าแบบ DC ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเป็นสนามแบบ AC ได้ และจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปในเรื่องของ Dielectric relaxation เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของไดโพล (Dipole polarization) และ การเก็บประจุไฟฟ้า (Ionic polarization) เนื่องจากการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าและ มักพบในช่วงความถี่ 100 Hz ไปจนถึง 10 GHz กลไกของ Dielectric relaxation จะค่อนข้างช้าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเกิด Resonance ในช่วงอิเล็คทรอนิกส์หรือการสั่นของโมเลกุลที่มีความถี่มากกว่า 1000 GHz

Relaxation time หรือ τ เป็นการวัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในวัสดุ Dielectric relaxation เกิดจากการล่าช้าในการโพลาริซของโมเลกุลเมื่อตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของไดโพลภายใต้สนามทำให้เกิดการชนกันดังนั้นจึงเกิดการเสียดสีกันเกิดขึ้นทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ช้าลงจนกระทั่งถึงสถานะสุดท้ายของการโพลาริซ เมื่อสนามไฟฟ้าหยุดลง Relaxation frequency เป็นส่วนกลับของ Relaxation time

เมื่อพิจารณาในระดับโมเลกุลไม่ว่าสารจะอยู่ในสภาวะไหนก็ตาม ผลการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ τ ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่ไดโพลสามารถปรับทิศตามสนามไฟฟ้าได้ทัน หรือที่ความถี่มากกว่าไดโพลโพลาริซโมเลกุลแบบมีขั้วจะไม่สามารถตามสนามไฟฟ้าได้ทันจึงเกิดการเปลี่ยนช่วงโพลาริซ ซึ่งผลมาจากแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular forces) และการสั่นของโครงสร้างผลึกที่เกิดจากความร้อน (Lattice vibration) (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) และเนื่องจากอาจเกิด Phase lag ค่าไดอิเล็กตริกจึงต้องแบ่งออกเป็นสองพจน์ทั้งจำนวนจริง และจำนวนจินตภาพ ดังสมการที่ 2.16

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r'' \quad (2.16)$$

ซึ่งยกตัวอย่างการโพลาริซแบบ Dipolar เมื่ออยู่ในสนาม AC จากสมการโพลาริซแบบรวมที่กล่าวมาก่อนหน้านี้จะได้ดังสมการที่ 2.17 ให้ $\alpha_d(\omega)$ มีโอเมก้าเนื่องจากมีความสัมพันธ์กับความถี่เมื่ออยู่ในสนาม AC โดยการโพลาริซแบบ Electronic นั้นเป็นการโพลาริซที่เกิดกับความถี่สูงมากซึ่งสารที่มีการโพลาริซแบบ Dipolar ไม่สามารถหมุนตามสนามได้ทันจึงทำให้ α_e น้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่พิจารณาได้ ทำให้ได้เป็นอีกสมการตามสมการที่ 2.18 โดย ϵ_r จะถูกแบ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนเมื่อการโพลาริซชนิด Dipolar อยู่ในสนาม AC และให้ $\alpha_d(\omega)$ มีค่าดังสมการที่

2.19 จากการกระจายของการโพลาไรซ์ที่สนามแบบ DC ดังนั้นจะได้ตามสมการที่ 2.20 นำ $1 - j\omega\tau$ มาคูณเศษ และส่วนจะได้ดังสมการที่ 2.21 เมื่อ $\epsilon_r(0) = \epsilon_s$ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ DC หรือค่า Static dielectric constant ซึ่งมาค่าดังสมการที่ 2.22 แล้วเมื่อแทนค่าลงไปจะได้ดังสมการที่ 2.23 และสามารถแบ่งคิดเป็นส่วนของจำนวนจริง และจำนวนจินตภาพได้ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 เมื่อ ϵ_∞ มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งก็คือสมการของ Debye นั้นเอง

$$\epsilon_r - 1 = \frac{N}{\epsilon_0} (\alpha_e + \alpha_d(\omega)) \quad (2.17)$$

$$\epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 + \frac{N}{\epsilon_0} \alpha_d(\omega) \quad (2.18)$$

$$\alpha_d(\omega) = \frac{\alpha_d(0)}{1+j\omega\tau} \quad (2.19)$$

$$\epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 + \frac{N}{\epsilon_0} \left(\frac{\alpha_d(0)}{1+j\omega\tau} \right) \quad (2.20)$$

$$\epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 + \frac{N\alpha_d(0)}{\epsilon_0} \left(\frac{1}{1+j\omega\tau} \right) \left(\frac{1-j\omega\tau}{1-j\omega\tau} \right) = 1 + \frac{N\alpha_d(0)}{\epsilon_0} \frac{1-j\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} \quad (2.21)$$

$$\epsilon_r(0) = 1 + \frac{N\alpha_d(0)}{\epsilon_0} = \epsilon_s \quad (2.22)$$

$$\epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 + \left[\epsilon_r(0) - 1 \left(\frac{1-j\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} \right) \right] \quad (2.23)$$

$$\epsilon_r' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1+(\omega\tau)^2} \quad (2.24)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} \quad (2.25)$$

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริก

การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริกเป็นเรื่องที่ไม่ควรมองข้าม เนื่องจากว่าอุปกรณ์แต่ละชนิดถูกออกแบบมาสำหรับใช้งานในสภาวะที่ต่างกัน หรือช่วงความถี่ที่ใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นควรคำนึงถึงว่าวัสดุที่วัดเป็นอะไร ของแข็ง ผง ของเหลว หรือแม้แต่ขนาด แล้วเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสม โดยเทคนิคที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกจะมีหลายวิธี เช่น สายโคแอกเซียล (Coaxial probe) สายส่ง (Transmission line) ส่งผ่าน (Free space) แผ่นเพลทขนาน (Parallel plate) และ เรโซแนนซ์ (Resonant cavity) แต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างกันทั้งเรื่องความถี่ ขนาดวัตถุ หรือรูปร่าง

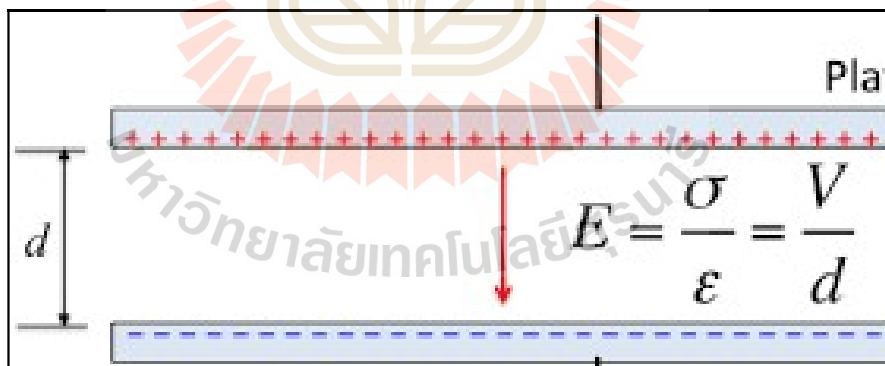
การวัดด้วยเทคนิค Coaxial probe หรือเรียกอีกอย่างว่า Open-end เป็นเทคนิคที่ใช้วัดในย่านความถี่ได้ตั้งแต่ 20 MHz ถึง 20 GHz นิยมใช้เครื่องมือวัดโครงข่าย (Network Analyzer) ร่วมกับสาย Coaxial probe ตามรูปที่ 2.16 มีจุดเด่นคือสามารถส่งคลื่นเข้าไปในตัววัตถุได้โดยไม่ต้องเตรียมหรือทำลายรูปร่างวัตถุจึงสะดวกและรวดเร็ว เทคนิค Open-end coaxial probe เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากใช้งานง่ายสามารถใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกผลิตภัณฑ์อาหารได้ เทคนิคนี้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดย Agilent Technologies มีความเหมาะสมกับการวัดในช่วงความถี่ Broadband สามารถใช้กับของเหลว และกึ่งของแข็งที่มีค่าการสูญเสียสูงได้ อีกทั้งวิธีนี้ยังสามารถใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่มีขนาดใหญ่หลายๆได้เช่น ต้นไม้ เศษไม้ หรือเนื้อสัตว์ชิ้นใหญ่



รูปที่ 2.16 การวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค Open-end coaxial probe (speag.swiss)

หลักการงานคือการใช้หัวโพรบแบบ Open-end ร่วมกันกับ Network analyzer หรือ Impedance analyzer วัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) จากวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อส่งคลื่นตามความถี่ที่กำหนดออกไป และรับการสะท้อนกลับของคลื่นแล้วมาคำนวณเป็นค่า Permittivity แต่ต้องระวังเรื่องการควบคุมอุณหภูมิของห้องให้คงที่เนื่องจากวิธีนี้จะเป็นการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุในลักษณะเปิดอยู่ในห้องโดยไม่มีกล่องหรืออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิใด ๆ มาป้องกัน และวัสดุควรมีความหนาประมาณหนึ่ง

การวัดด้วยเทคนิค Parallel plate เป็นอีกหนึ่งในวิธีที่นิยมอย่างมาก ซึ่งเป็นการสร้าง Capacitor โดยการทำให้วัสดุที่จะทำการวัดมีลักษณะเป็นแผ่นบางแล้วประกบด้วยแผ่นโลหะที่มีขั้วต่างกัน ดูตัวอย่างได้ตามรูปที่ 2.17 วิธีการนี้มีความแม่นยำสูงมากแต่การใช้งานจะเหมาะสมกับความถี่ต่ำ และตัววัสดุจะต้องมีขนาดที่เล็ก และเรียบโดยอาจทำการเคลือบให้ตัววัสดุเรียบและมีขนาดพอดีกับแผ่นเพลทให้ง่ายต่อการคำนวณก็ได้ โดยที่วิธีนี้จะเป็นการวัดค่า Capacitance แล้วนำไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าไดอิเล็กตริกโดยเปรียบเทียบกับขนาดแผ่นและความหนาของวัสดุ ซึ่งมีข้อเสียคือการจัดเตรียมวัสดุก่อนทำการวัดที่ยากเพราะต้องทำให้วัสดุพอดีกับแผ่นถ้าวัสดุเป็นน้ำหรือผงจะต้องทำการเคลือบหรือขึ้นรูปให้เป็นของแข็งก่อน และเหมาะสมกับการวัดที่ความถี่ต่ำ การวัดด้วยวิธีนี้มักใช้คู่กับ Impedance Analyzer หรือ RLC meter



รูปที่ 2.17 การวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค Parallel plate (www.physics.smu.edu)

การวัดด้วยเทคนิค Free space เป็นวิธีที่ไม่ต้องไปสัมผัสกับวัสดุ เหมาะสมกับการใช้งานกับการวัดวัสดุที่ไม่สามารถแตะหรือสัมผัสได้ และไม่ต้องทำการผ่าหรือเปลี่ยนรูปร่างลักษณะของวัสดุ

ใหม่ ดูได้ตามรูปที่ 2.18 วิธีนี้เหมาะที่จะใช้งานกับความถี่สูงย่านไมโครเวฟ โดยวิธีนี้จะใช้การส่งคลื่นความถี่สูงผ่านสายอากาศ (Antenna) ผ่านไปที่ตัววัสดุแล้วรับจากด้านหลังแล้วไปคำนวณต่อเป็นค่า Permittivity วิธีนี้สามารถใช้กับอุณหภูมิที่สูงได้ และง่ายในการดำเนินการ แต่วิธีนี้จำเป็นจะต้องวัดใน Chamber หรืออาจจะใช้ Waveguide ครอบไว้ป้องกันการกระจายของคลื่น หรือสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งอื่น



รูปที่ 2.18 การวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค Free space (www.dlr.de)

2.6 การประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

ในอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหารมีการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแปรรูปหรือเพื่อถนอมอาหารมากมายโดยนิยมใช้คลื่นในย่านไมโครเวฟที่ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ ISM band หรือความถี่ที่ถูกกำหนดให้ใช้ได้ทางอุตสาหกรรม และการศึกษา

ไมโครเวฟสามารถนำมาใช้อบแห้งเพื่อถนอมอาหารแทนการอบด้วยลมร้อนได้ ซึ่งการใช้ไมโครเวฟมีข้อดีที่สามารถอบแห้งได้เร็วกว่าการอบด้วยเตาอบทำให้ประหยัดเวลา โดยการใช้เตาหรือการให้ความร้อนทั่วไปจะเป็นการให้ความร้อนจากด้านนอกเข้าข้างในทำให้ทราบได้ยากว่าข้างในมีความชื้นมากน้อยแค่ไหน และยังใช้เวลาอบค่อนข้างนานแต่ไมโครเวฟจะเป็นการให้ความร้อนจากข้างในออกมาข้างนอก และไล่ความชื้นจากข้างในออกมาทำให้สังเกตความแห้งจากภายนอกได้ และยังใช้เวลาเร็วกว่าการอบด้วยเตาอบ ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้การอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามอุตสาหกรรมคือ เมล็ดพืชต่าง ๆ มะพร้าว ถั่ว หรือ ผลไม้ต่าง ๆ นอกจากการอบแห้งไมโครเวฟยังสามารถใช้ประกอบอาหารได้เช่น การทำอาหารสัตว์ หรือการอุ่นอาหารสำเร็จรูป

นอกจากการประกอบอาหารแล้วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังสามารถประยุกต์ใช้งานได้อีกหลายอย่างเช่น ตรวจสอบแมลงในต้นไม้ ผักและ ผลไม้ต่าง ๆ หรือใช้ตรวจสอบคุณสมบัติบางอย่างของอาหารได้เช่น การตรวจสอบความชื้นในวัสดุ ตรวจสอบประเมินขนาดของสิ่งที่อยู่ข้างในเช่น เมล็ดผลไม้ หรือใช้กำจัดแมลงศัตรูพืช ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านของ RF และ Microwave มาประยุกต์ใช้ตรวจสอบชนิดพันธุ์ข้าว และข้าวผสมโดยวิเคราะห์จากค่าไดอิเล็กตริกของข้าว และใช้วิธีการเพิ่มน้ำเกลือเพื่อเพิ่มค่าความนำโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของข้าวในแต่ละพันธุ์มีความต่างกันมากขึ้น

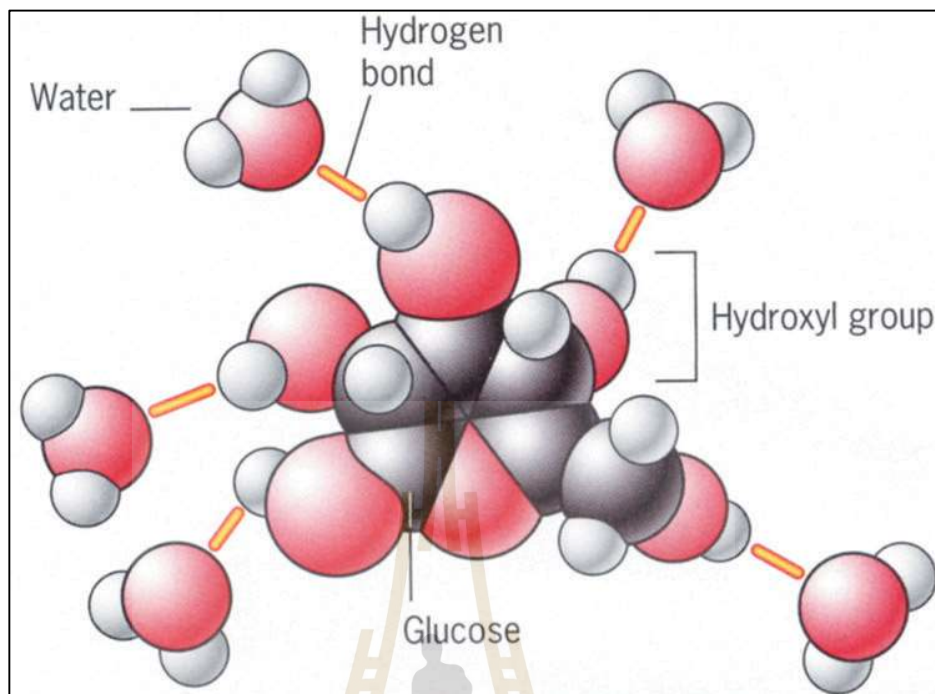
2.7 แรงระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ในข้าว และเกลือเมื่อละลายในน้ำ

สารอินทรีย์หมายถึงสารประกอบที่มีอะตอมของคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสารอินทรีย์เป็นสารประกอบที่มีความเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต สถานะทางกายภาพของสารจะขึ้นอยู่กับแรงที่ยึดอนุภาคของสารนั้นเข้าด้วยกัน ซึ่งข้าวเป็นอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก (ประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์) และคาร์โบไฮเดรตเองก็เป็นสารอินทรีย์ด้วยเช่นกันเนื่องจากคาร์โบไฮเดรตเป็นการรวมกันของกลุ่มของน้ำตาลโมเลกุลต่าง ๆ ประกอบไปด้วยธาตุ 3 ชนิดได้แก่ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) โดยคาร์โบไฮเดรตแบ่งได้เป็น 3 ชนิดได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) เป็นกลุ่มที่มีโมเลกุลเล็กที่สุด ดูดซึมได้เร็วที่สุด และละลายในน้ำได้ดี เช่น กลูโคส (Glucose) และฟรุคโตส (Fructose) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharide) เป็นกลุ่มที่เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด และน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ (Polysaccharide) เป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีรสหวาน โมเลกุลมีขนาดใหญ่ โครงสร้างมีความซับซ้อน และละลายน้ำได้ยาก เช่น เซลลูโลส (Cellulose) และอะมิโลส (Amylose)

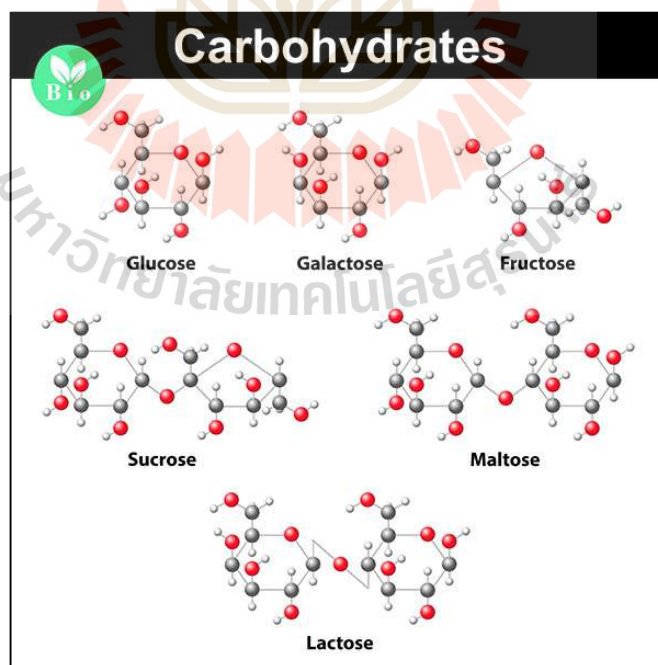
ข้าวเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของกลูโคส และฟรุคโตสที่สูง (Cheng, You, Lee, Abbas, Rahim, Khor, Zakaria, and Lee, 2017) รวมไปถึงอะมิโลสด้วยที่จะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของข้าว ดังนั้นจึงสามารถสกัดกลูโคส และฟรุคโตสออกมาได้ด้วยการละลายน้ำเนื่องจากเป็นกลุ่มการละลายในน้ำได้ง่าย โดยกลูโคส และฟรุคโตส มีค่าไดโพลโมเมนต์อยู่ที่ 1.8 และ 3.65 Debye โดยสถานะของสารอินทรีย์นั้นจะเป็นพันธะแบบมีขั้ว ซึ่งเมื่อถูกละลายในน้ำแล้วโครงสร้างที่เกาะตัวกันเป็นผลึก (Crystal) จะแยกออกจากกันแล้วไปจับกับขั้วตรงข้ามของน้ำแทน การเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (Physical change) ดังรูปที่ 2.19 ที่แสดงตัวอย่างของโมเลกุลของกลูโคสที่ถูกละลายในน้ำ จะเห็นว่ากลุ่มของคริสตัลที่แตกตัวกระจายอยู่ในน้ำ แล้วจะดึงเอาขั้วลบของออกซิเจนของน้ำมาติดกับขั้วบวกของไฮโดรเจนของกลูโคส สังเกตได้ว่า

โมเลกุลของกลูโคสประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน -OH ของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้วซึ่งมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับโมเลกุลของน้ำที่อยู่รอบตัวมันได้ คุณสมบัติความมีขั้วในโมเลกุลของน้ำ ทำให้น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับโมเลกุลที่มีขั้วเช่นเดียวกัน ซึ่งโมเลกุลของกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในโครงสร้างโมเลกุล เป็นผลให้โมเลกุลของกลูโคสดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ด้วยแรงระหว่างขั้ว (Dipole-dipole forces) การสร้างพันธะระหว่างกันทำให้เกิดโครงสร้างโมเลกุลใหม่ (New bonds) ขึ้นมา นอกจากนี้การเกิดโครงสร้างโมเลกุลใหม่นั้นยังรวมไปถึงน้ำตาลฟรักโทสด้วยเนื่องจากประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเช่นกัน สามารถดูโครงสร้างได้ตามรูปที่ 2.20 โดยปกติแล้วน้ำจะมีค่าไดโพลโมเมนต์ถาวรอยู่ที่ 1.87 Debye ซึ่งเมื่อเกิดการรวมตัวกันแล้วจะทำให้ไดโพลโมเมนต์ถาวรของสารละลายนั้นเปลี่ยนไปด้วย

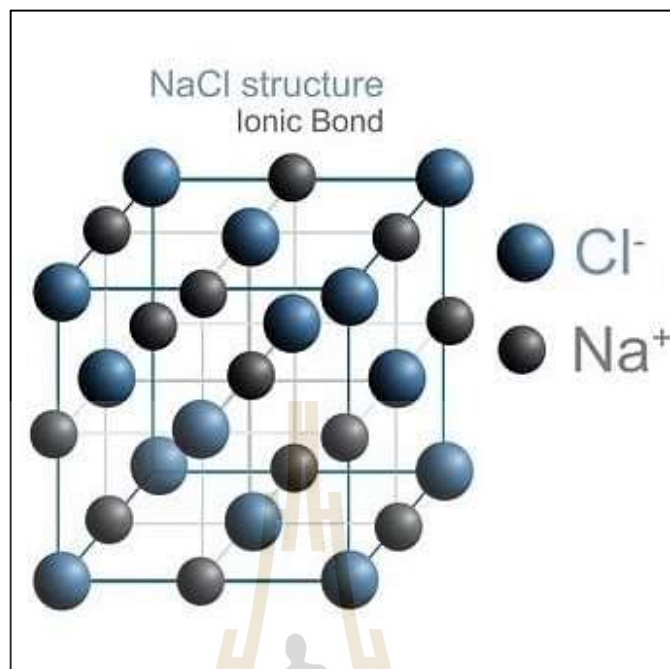
เกลือ (NaCl) หรือ sodium chloride เป็นสารที่มีโครงสร้างพันธะแบบไอออนิก (Ionic bonds) ตามรูปที่ 2.21 ซึ่งเกลือจะมีปฏิกิริยาทางเคมีที่แตกต่างจากคาร์โบไฮเดรตที่ละลายกับน้ำ โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Chemical change) โครงสร้างผลึกของเกลือเมื่อละลายในน้ำจะเกิดการแตกตัวจากการจับกันแน่นออกเป็น NaCl ซึ่ง NaCl จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกับน้ำโดยถูกแยกออกเป็น Na^+ และ Cl^- ซึ่งมีสภาพเป็นขั้วจึงสามารถละลายได้ดี โมเลกุลของน้ำมี O เป็นประจุลบ และ H ประจุบวก ดังนั้นจึงจับตัวกันได้โครงสร้างใหม่ตามรูปที่ 2.22 ($[\text{Na}(\text{OH}_2)_6]^+$ และ $[\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_4]^-$) ซึ่งทำให้ไดโพลโมเมนต์ถาวรของสารละลายนั้นเปลี่ยนไปด้วยเช่นเดียวกันกับกรณีของคาร์โบไฮเดรตเนื่องจากโครงสร้างพันธะมีการเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจาก Hydrogen bond เป็นพันธะแบบพิเศษที่เกิด dipole-dipole forces ระหว่างอะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างพันธะแบบมีขั้วได้ ดังนั้นกรณีของน้ำเกลือถ้ายังไม่ถึงจุดอิ่มตัวของสารละลาย ก็สามารถไปจับตัวแบบ dipole-dipole forces กับพันธะอื่น ๆ ได้อีกยกตัวอย่างเช่นการใส่น้ำเกลือลงในสารประเภทคาร์โบไฮเดรต ก็จะทำให้อะตอมที่มีขั้วต่างกันมาจับตัวกันทั้งน้ำ เกลือ และคาร์โบไฮเดรต และจะทำให้ได้ค่าไดโพลโมเมนต์ค่าใหม่ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการโพลาไรซ์ (Polarizability) และค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารนั้น



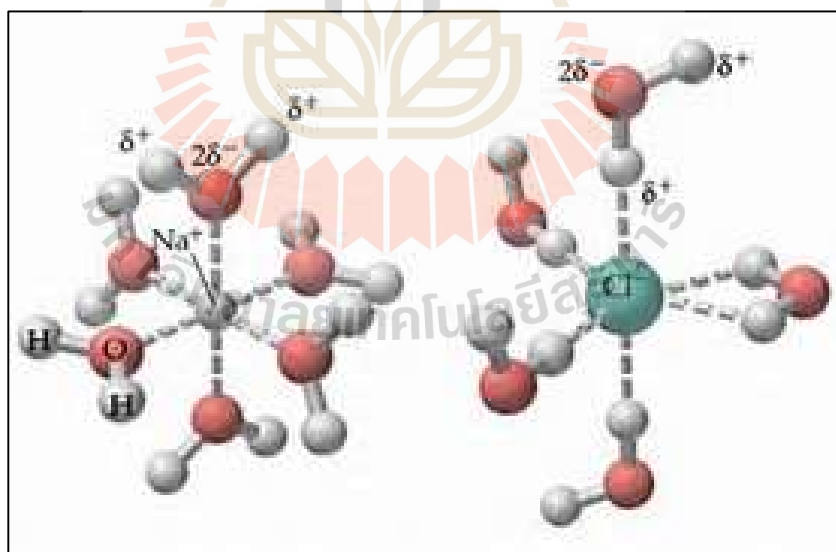
รูปที่ 2.19 โครงสร้างโมเลกุลของกลูโคสที่ละลายในน้ำ (www.bio.miami.edu)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตต่าง ๆ (chem.libretexts.org)



รูปที่ 2.21 โครงสร้างโมเลกุลของ sodium chloride (edurev.in)



รูปที่ 2.22 โครงสร้างโมเลกุลของ sodium chloride ที่ละลายในน้ำ (socratic.org)

2.8 สรุป

ในการศึกษาวิธีการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก สิ่งสำคัญคือต้องทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวเก็บไว้เป็นข้อมูลให้หลากหลายสายพันธุ์เพื่อใช้ในการเทียบเมื่อต้องการจะตรวจสอบ และควรเก็บข้อมูลไว้ให้หลากหลายสภาวะแวดล้อม เช่นอุณหภูมิต่าง ๆ ความชื้น และระยะเวลาที่เก็บรักษาเมล็ดข้าว โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเมล็ดข้าวทั้งหมด เช่นความชื้น ความถี่ ความหนาแน่น หรืออุณหภูมิ ควรที่จะถูกควบคุมไว้ให้ยู่ให้ลักษณะที่เหมือนกันในทุกการทดลองซ้ำ รวมไปถึงถ้ามีการเพิ่มเทคนิคบางอย่างในการวัดเข้าไปก็ต้องเก็บข้อมูลในลักษณะเดียวกันด้วย จากทฤษฎีต่าง ๆ ในบทนี้ และเอกสารอ้างอิงในบทนี้ และบทที่ 1 ทำให้ทราบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะตรวจสอบข้าวที่ปลอมปนด้วยค่าไดอิเล็กตริก เนื่องจากข้าวแต่ละชนิดพันธุ์เองก็มีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกันไปเนื่องจากสารอาหาร ความชื้น หรือลักษณะทางกายภาพ และข้าวแต่ละชนิดก็มีการเพิ่มขึ้นของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดพันธุ์ และสามารถเพิ่มเทคนิคเติมน้ำเกลือเข้าไปได้เพื่อขยายความแตกต่างของค่าไดอิเล็กตริกให้สามารถจำแนกจากกราฟได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ในส่วนของเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนั้นสามารถใช้ได้หลากหลาย ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้ได้เลือกใช้การวัดด้วย Open-end coaxial probe เนื่องจากสามารถใช้งานได้ง่าย ไม่มีความซับซ้อน และไม่ต้องจัดเตรียมวัสดุที่จะนำมาวัดยากดังเช่น การวัดด้วยแผ่น Plate ที่ต้องเตรียมวัสดุให้พอดีกับช่อง และต้องอัดพร้อมเคลือบไว้ให้เป็นชั้นพอดีกับแผ่น Plate ก่อนจากนั้นจึงจะสามารถนำมาวัด และคำนวณเพื่อหาค่าไดอิเล็กตริกได้ อีกทั้ง Open-end coaxial probe ยังเป็นที่นิยมใช้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุประเภทอาหาร หรือผลิตภัณฑ์ทางเกษตร อีกทั้งยังมีช่วงความถี่ในการวัดที่กว้างมากตลอดทั้งย่าน RF และ Microwave โดยตัวอย่างของข้าวในงานวิจัยนี้ที่นำมาใช้ในการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วย Open-end coaxial probe จะทำการบดให้ละเอียดแล้วผสมกับน้ำเกลือให้เป็นเนื้อเดียวกันเท่านั้น ในงานวิจัยเล่มนี้จะใช้ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นหลักโดยนำข้าวที่มีราคาถูกกว่า และเป็นข้าวที่นิยมนำมาปลอมปนมาผสมเข้าไปเพื่อให้ได้ข้าวปลอมปนเนื่องจากว่าข้าวหอมมะลิ 105 เป็นข้าวที่มีปัญหาการปลอมปนอย่างมากให้ประเทศไทย เนื่องจากมีราคาที่สูงมากประมาณ 15,000 บาท ต่อตัน โดยข้าวที่นิยมนำมาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิ 105 นั้นมีหลายพันธุ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้าวหอมปทุม กข 79 พิษณุโลก และเสาว์ให้มาเป็นข้าวที่ใช้ปลอมปน กฎหมายในประเทศไทยกำหนดให้ข้าวเกรดดีสามารถมีสิ่งเจือปนได้ 8 เปอร์เซ็นต์โดยสิ่งเจือปนอาจเป็นข้าวพันธุ์อื่น ก้อนกรวด หรือเศษเปลือกข้าวก็ได้ ดังนั้นงานวิจัยเล่มนี้จะใช้การผสมข้าวเริ่มตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จนถึงครึ่งต่อครึ่งหรือ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัย

นี้จะทำเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับนำไปประยุกต์ต่อเพื่อทำนวัตกรรมการตรวจสอบข้าวปลอมปนสำหรับ
โรงงาน หรือการค้าขายกับต่างประเทศในอนาคต



บทที่ 3

การติดตั้งอุปกรณ์ และตั้งค่าโปรแกรมวัดค่า เทคนิคการผสมน้ำเกลือในข้าว และวิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริก

3.1 กล่าวนำ

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) ของข้าวหลากหลายงานวิจัย พบว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่าง ๆ ไม่เพียงแต่ข้าวจะมีตัวแปรหลักอยู่หลายชนิดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความหนาแน่น ความถี่ที่ใช้ งาน สารอาหารในข้าว และวัสดุเจือปนอื่น ๆ ซึ่งในเนื้อหาส่วนนี้จะกล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และการตั้งค่าโปรแกรมเพื่อการสอบเทียบ (Calibration) และวิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าว โดยในส่วนของเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกนั้นได้ใช้หัววัดแบบ Open-end coaxial probe ควบคู่ไปกับเครื่อง Vector network analyzer โดยทำการ Calibration เพื่อวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในช่วงความถี่ 200 MHz – 1 GHz ในส่วนของข้าวที่นำมาวัดค่าไดอิเล็กตริก จะใช้ข้าวที่เป็นนิยมบริโภค และขายตามท้องตลาดของไทย และข้าวที่นิยมนำมาผสมเพื่อโภชนาการ และน้ำหนัก ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ 105 ข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเสาไห้ โดยการวัดจะดำเนินการทั้งแบบแห้ง และผสมน้ำเกลือ ซึ่งข้าวที่นำมาวัดจะต้องทำการอบให้ละเอียดก่อน น้ำเกลือที่นำมาผสมจะมีความเข้มข้นในอัตราส่วนของน้ำ 80 เปอร์เซ็นต์ และ เกลือ 20 เปอร์เซ็นต์ และนำมาผสมกับข้าวในอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำเกลือเท่ากับ 1 ต่อ 1.5 ซึ่งก่อนการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุกตัวอย่าง จะต้องทำการคุมสภาวะของอุณหภูมิของห้อง และตัวอย่างของข้าวให้คงที่ อีกทั้งปริมาณของข้าวที่นำมาใส่บรรจุภัณฑ์จะต้องทำการชั่งให้มีน้ำหนักที่เท่ากัน และนำมาอัดลงขวดด้วยแรงกดที่เท่ากันเพื่อให้เกิดความคาดเคลื่อนน้อยที่สุด

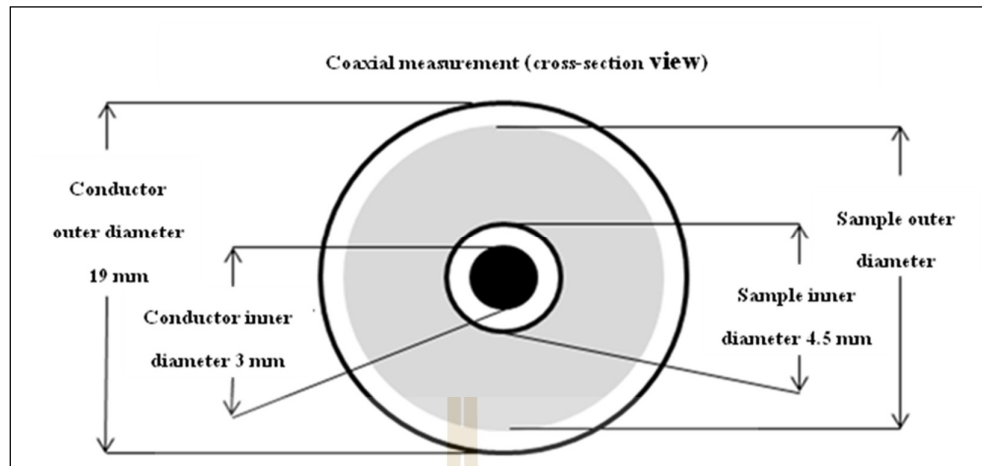
3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริก และการสอบเทียบอุปกรณ์

3.2.1 การติดตั้งเครื่องมือวัด และการทำงานของเครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าไดอิเล็กตริกมีอยู่หลายชนิด เช่น Parallel plate หรือ Coaxial probe หรือ Free space เป็นต้น การเลือกใช้งานจะเลือกตามความเหมาะสม เช่น ความถี่

หรือลักษณะรูปร่างของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวัดไดอิเล็กตริกด้วย Coaxial probe ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริกวัสดุประเภทอาหารหรือวัสดุที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยรูปร่างของหัวโพรบจะทีลักษณะตัดเป็นพื้นเรียบ การวัดต้องนำส่วนพื้นี่หน้าตัดไปแนบไว้ที่ตัววัสดุที่จะนำมาวัดค่าไดอิเล็กตริก ทำให้เรียกหัวโพรบนี้ได้อีกอย่างว่า Open-end coaxial probe สามารถดูขนาดของพื้นที่หน้าตัดได้ตามรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดหัวมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 19 มิลลิเมตร ดังนั้นควรหาภาชนะ หรือบรรจุภัณฑ์ใส่ตัวอย่างของที่จะทำการวัดให้มีขนาดกว้างกว่าหัวโพรบ และงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หัววัดไดอิเล็กตริกชนิด High temperature probe สามารถดูได้ตามรูปที่ 3.2 เป็นหัววัดไดอิเล็กตริกชนิดที่ทนต่อความร้อนได้ดี และสามารถใช้งานได้ตั้งแต่อุณหภูมิ -40 ถึง 200 °C สามารถใช้งานกับวัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว และผงอัดแน่นได้ การวัดด้วยหัวชนิดนี้สามารถนำมาแนบชิดกับวัสดุได้เลยโดยไม่ต้องทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่างถ้าวัสดุมีความเรียบที่ผิวอยู่แล้วแต่ถ้ามีความขรุขระ หรือมีโพรงอากาศมากอาจต้องทำการตัดให้เรียบ หรือบดให้ละเอียดก่อนได้ โดยการวัดสามารถทำได้งานแล้วไม่ต้องใช้เวลาในการเตรียมวัสดุมากนัก และมีความแม่นยำในการวัดที่ค่อนข้างสูง ($\pm 1\%$) โพรบจะทำการวัดค่าการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งออกไปจากปลายหัวโพรบแล้วรับคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากตัวของวัสดุที่นำมาวัดแล้วนำไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ข้อควรระวังในการใช้งานหัววัดไดอิเล็กตริกแบบ Open-end coaxial probe คือสาย coaxial ต้องตรงไม่บิดตัวมากนัก และต้องยึดสายสัญญาณให้แน่นอย่าปล่อยให้หลวม หรือมีการขยับได้ ขณะวัดถ้าเป็นวัสดุของแข็งควรมีความเรียบของพื้นผิวที่มากพอ และถ้าเป็นของเหลวไม่ควรที่จะปล่อยให้มีส่วนอากาศเกาะที่หัวโพรบขณะวัด หรือถ้าเป็นผงก็ควรอัดให้แน่นโดยให้มีช่องว่างของอากาศให้น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการวัดจากวัสดุและโพรงอากาศให้น้อยที่สุด และสุดท้ายที่ต้องระวังคือเรื่องของความหนาของชิ้นวัสดุที่เตรียมมาวัด วัสดุจะต้องมาความหนาประมาณหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงการทะลุผ่านของคลื่นไปกระทบพื้น เราสามารถคำนวณความหนาของชิ้นวัสดุโดยประมาณได้จากสมการที่ 3.1 เมื่อ t_{min} คือความหนาขั้นต่ำของวัสดุหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$$t_{min} = \frac{20}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

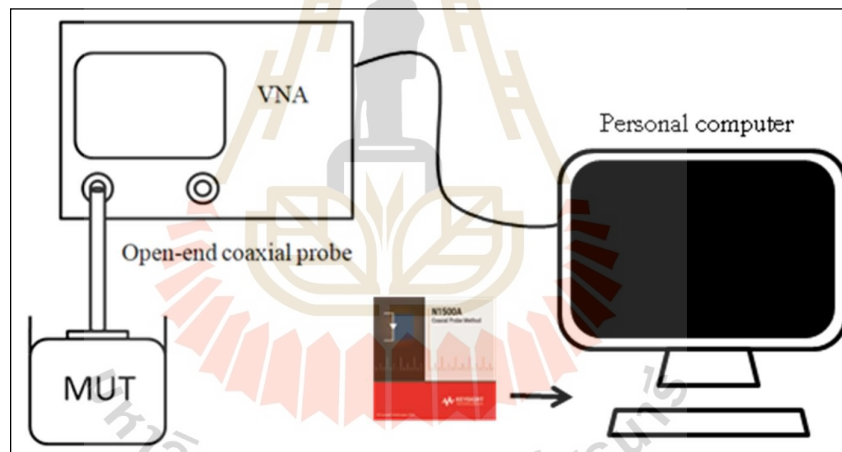


รูปที่ 3.1 พื้นที่หน้าตัดของหัว Open-end coaxial probe ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.2 หัว Open-end coaxial probe ชนิด High temperature probe

นอกจากนี้แล้วการใช้งานเครื่องมือวัดไดอิเล็กตริกด้วยหัว Open-end coaxial probe จะต้องใช้งานควบคู่ไปกับ Vector network analyzer และคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล สามารถดูได้จากรูปที่ 3.3 โดยหลักการทำงานคือ Network analyzer จะทำการส่งคลื่นในความถี่ต่าง ๆ ออกไปตามที่ได้ตั้งค่าเอาไว้ โดยส่งผ่านหัวโพรบไปที่ตัวของวัสดุซึ่งจะทำให้มีคลื่นบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับมาจากตัวของวัสดุโดยที่คลื่นสะท้อนจะมาก หรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าของไดอิเล็กตริกของวัสดุแต่ละชนิดนั้น ๆ และเครื่องมือจะนำไปคำนวณค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยอาศัยข้อมูลจากการ Calibration เครื่องมือก่อนทำการวัด และไปเปรียบเทียบเป็นกราฟข้อมูล โปรแกรมที่ใช้ประมวลผล และแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้คือ N1500A materials measurement suite ซึ่งเป็นตัวคอยนำค่าการสะท้อนที่รับได้ขึ้นมาจากหัวโพรบมาคำนวณ และแสดงผลให้เห็นโดยมีฟังก์ชันใช้งานที่ค่อนข้างง่าย

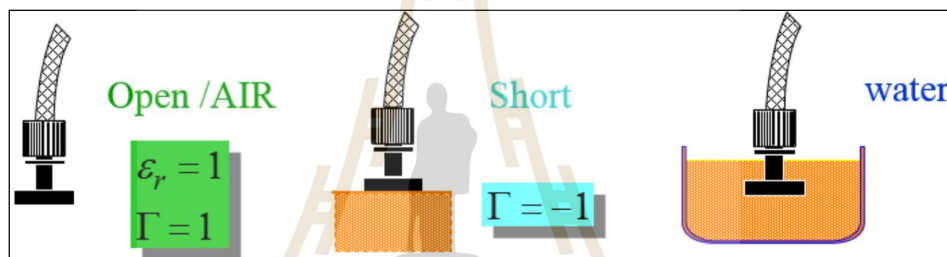


รูปที่ 3.3 การต่อ Network analyzer และคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน

3.2.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ (Calibration)

การสอบเทียบอุปกรณ์ หรือ Calibration เป็นพื้นฐานสำคัญที่ควรทำทุกครั้งก่อนใช้งานอุปกรณ์ที่ต้องใช้ความละเอียดทุกชนิด เพราะจะทำให้ช่วยลดความผิดพลาดระหว่างการวัดจากค่าแฝงทางไฟฟ้าในอุปกรณ์ และสายสัญญาณ หรือแม้แต่เรื่องของระยะ และสภาวะแวดล้อม ดังนั้นการสอบเทียบอุปกรณ์จึงเป็นกระบวนการยืนยันความถูกต้องสำหรับเครื่องมือวัดนั้น ๆ การ Calibration

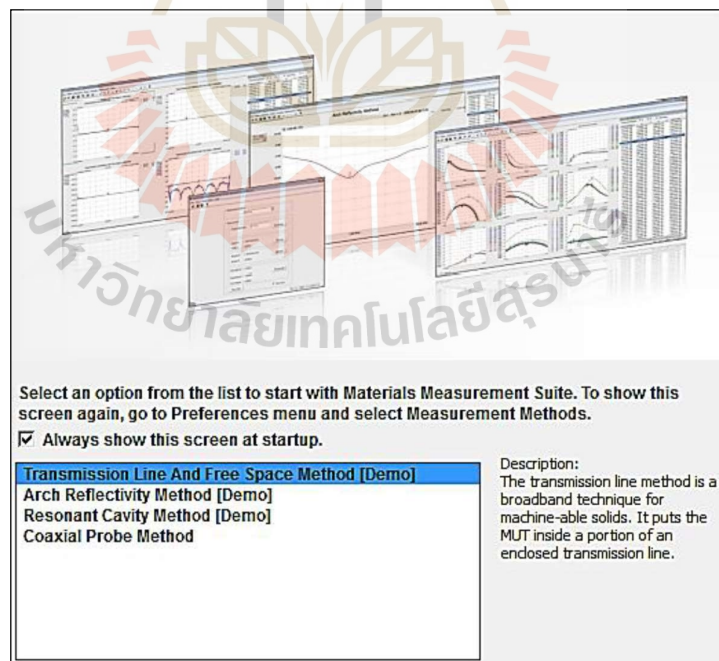
สำหรับหัวแบบ Open-end coaxial probe ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ทำการ Calculation โดยใช้ Air/short probe/water ผ่านโปรแกรม N1500A materials measurement suite เนื่องจากว่า Air นั้นมีอยู่ทั่วไป และมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกคงที่เท่ากับ 1 ในทุกความถี่ Short probe เป็นอุปกรณ์มาตรฐานที่จะต่อเข้าไปตรงปลายสายเพื่อชดเชยค่าของเฟส และ Water เป็นโพลด ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไปโดยใช้น้ำสะอาด แต่ควรใช้ DI water (Deionized water) หรือเรียกว่าน้ำ DI จะดีที่สุด เนื่องจากเป็นน้ำที่ปราศจากประจุทำให้เหมาะสมที่จะใช้ทำงานวิจัย หรืองานทดลองในห้องแลป วิทยาศาสตร์ ซึ่งน้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 34-80 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความถี่ที่ใช้งานใน ขณะนั้น สามารถดูภาพจำลองการสอบเทียบหัวโพรบด้วย Air/short/water ได้ตามรูปที่ 3.4

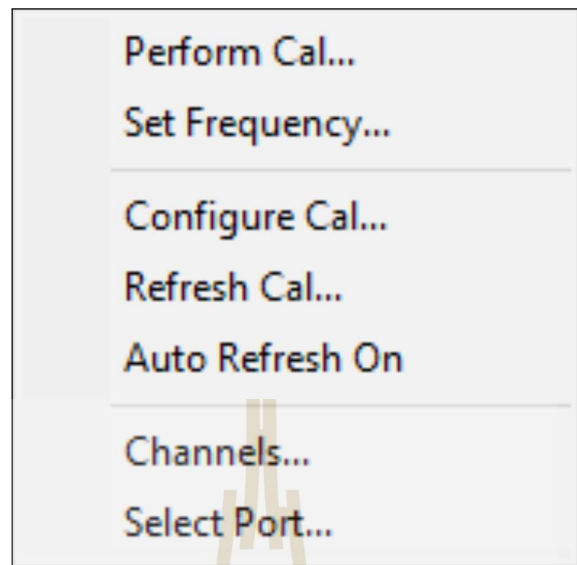


รูปที่ 3.4 การสอบเทียบโพรบด้วย Air/short/water

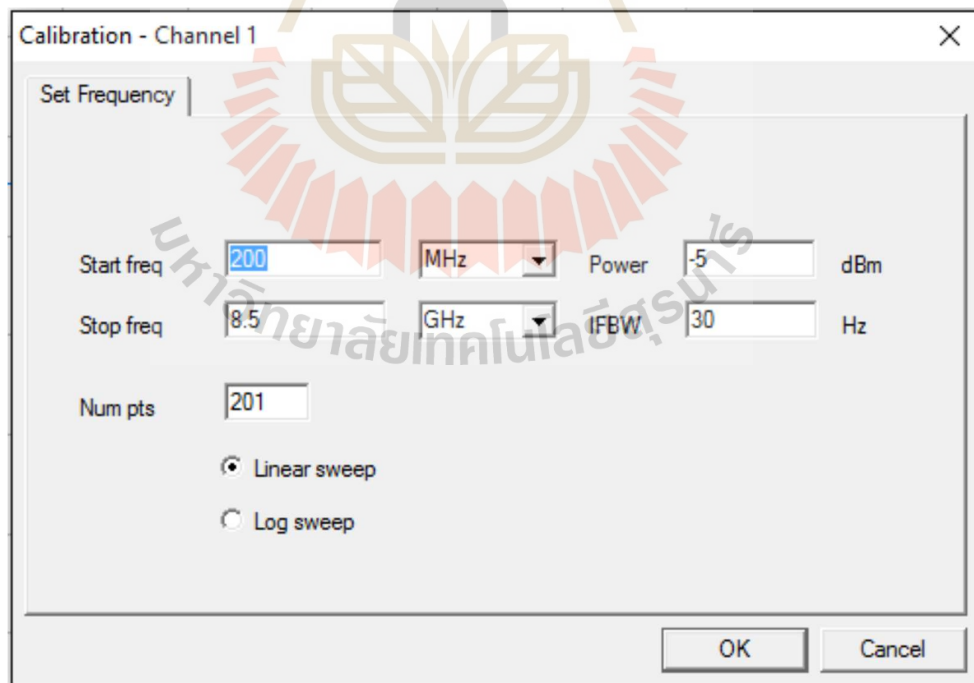
อันดับแรกเมื่อเข้ามาที่โปรแกรมจะพบหน้าจอตั้งรูปที่ 3.5 โดยจะมียูสึ่ฟังก์ชันให้ เลือกลง และเนื่องจากงานวิจัยเล่มนี้ได้ใช้การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแบบ Open-end coaxial probe จึงต้องเลือกที่ฟังก์ชัน Coaxial probe method และเมื่อกดเข้ามาแล้วให้เลือกหัวข้อ Calibration จะแสดงตัวเลือกตามรูปที่ 3.6 จากนั้นเลือก Set frequency จะได้หน้าต่างตามรูปที่ 3.7 เพื่อกำหนดช่วงของความถี่เริ่มต้นจนถึงความถี่สิ้นสุด ส่วนกำลังส่ง และจำนวนจุดที่วัด ใน หัวข้อ Calibration ยังสามารถกำหนด Port ได้จาก Select port หลังจากกำหนดช่วงความถี่แล้ว ให้ Configure cal. เพื่อกำหนดวิธีการสอบเทียบ ซึ่งจะได้หน้าต่างตามรูปที่ 3.8 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี สอบเทียบแบบ Air/Short/Water โดยให้รีเฟรชค่าสอบเทียบที่อากาศเพื่อความสะดวก และได้ใช้หัว โพรบสำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นแบบ High temperature น้ำที่นำมาสอบเทียบสำหรับ งานวิจัยนี้คือน้ำ DI โดยนำมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อน 30 นาทีก่อนนำมาใช้งานเพื่อปรับอุณหภูมิให้

คงที่ ในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำ และข้าวที่นำมาวัดให้อยู่ที่ 25 °C จะได้มีมาตรฐานที่อุณหภูมิเดียวกันทุกตัวอย่างทดลอง หลังจากตั้งค่าจนถึงรูปที่ 3.8 แล้ว ให้ปล่อยหัวโพรบลอยไว้ห่างจากพื้นประมาณหนึ่งดิ่ง รูปที่ 3.9 จากนั้นให้เลือกเมนู Perform Cal. จากหัวข้อ Calibration รอจนกระทั่งโปรแกรมสอบเทียบจนเสร็จ การทำแบบนี้เพื่อให้โปรแกรมจำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเทียบกับอากาศ หรือก็คือส่งผ่านได้ทั้งหมด ($\Gamma = 1$) แล้วใส่อุปกรณ์ Short probe เข้าไปที่หัวโพรบตาม รูปที่ 3.9 และกด OK เพื่อสอบเทียบอีกครั้ง เมื่อเสร็จแล้วให้ถอดหัว Short probe ออกจากการตั้งค่าแบบนี้เพื่อให้โปรแกรมจำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเมื่อสะท้อนกับฉากกัน หรือก็คือคลื่นที่ส่งออกไปสะท้อนกลับทั้งหมด ($\Gamma = -1$) จากนั้นจึงนำหัววัดมาจุ่มลงในน้ำ DI ที่เตรียมไว้ตามรูปที่ 3.9 แล้วกด OK อีกครั้งเพื่อสอบเทียบอีกรอบเพื่อเป็นการทำผลวัดอ้างอิงเมื่อคลื่นสะท้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริก และน้ำเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่หาได้ง่าย และสามารถตรวจสอบอุณหภูมิได้ง่ายจึงนิยมนำมาเป็นผลอ้างอิง เมื่อโปรแกรมคำนวณเสร็จแล้วจึงสิ้นสุดการสอบเทียบและพร้อมใช้งาน ก่อนการใช้งานหัววัดควรเช็ดและทิ้งไว้ซักพักให้แห้งก่อนหลังจากนำออกจากน้ำเพื่อไม่ให้เกิดการคลาดเคลื่อนระหว่างการวัด

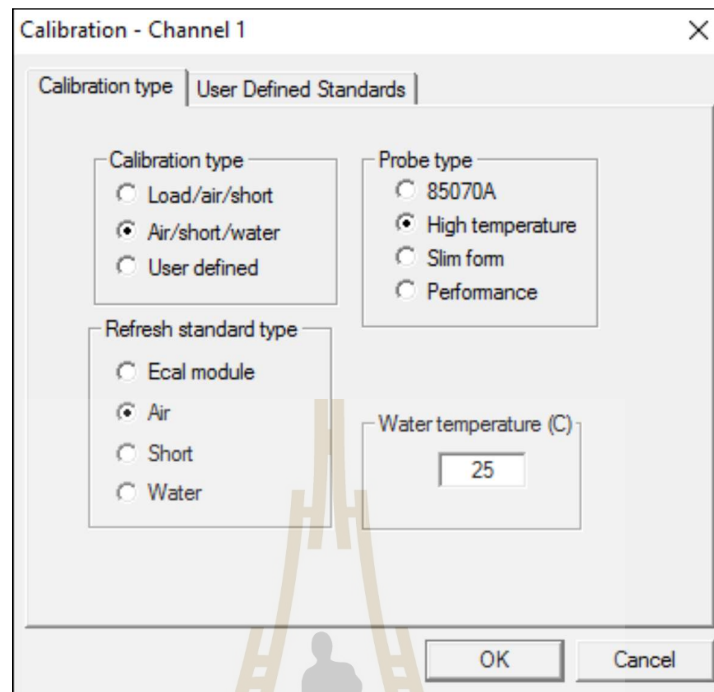




รูปที่ 3.6 ตัวเลือกในหัวข้อ Calibration



รูปที่ 3.7 หน้าจอกำหนดช่วงความถี่ กำลังส่ง และจำนวนจุดที่วัด



รูปที่ 3.8 หน้าจอกำหนดวิธีการสอบเทียบ



รูปที่ 3.9 การสอบเทียบหัววัด Open-end coaxial probe ชนิด High temperature

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

การเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยหัววัด Open-end coaxial probe แบบ High temperature นั้นจะต้องทำการบดให้ละเอียดก่อนเนื่องจากว่าเมล็ดข้าวมีลักษณะเป็นทรงเรียวยาวทำให้เมื่อนำมากองรวมกันจะเกิดเป็นช่องว่างอากาศแทรกกระหว่างเมล็ดได้ และเป็นผลให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องค่าการสะท้อนกลับที่ได้จะมาจากคลื่นสะท้อนกลับจะเป็นคลื่นที่สะท้อนในข้าวผ่านโพรงอากาศ การบดข้าวในงานวิจัยนี้ได้ทำการบดข้าวด้วยเครื่องบดสมุนไพรตั้งรูปที่ 3.10 จากนั้นจึงนำมาร้อนผ่านฟิลเตอร์ (Filter) เพื่อให้ได้ผงละเอียดขนาดใกล้เคียงกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการบดข้าวชนิดพันธุ์ต่าง ๆ ที่จะใช้ในการทดลองไว้ และเก็บใส่บรรจุภัณฑ์ปิดแน่นตั้งรูปที่ 3.11 เพื่อให้คงสภาพใช้งาน และกันแมลงต่าง ๆ หรือสิ่งแปลกปลอมที่ไม่พึงประสงค์เข้าไป เช่น ฝุ่น หรือความชื้น

การเตรียมน้ำเกลือเพื่อมาผสมกับข้าวในงานวิจัยเล่มนี้จะใช้น้ำ DI มาผสมกับเกลือบริสุทธิ์ (NaCl) ในอัตราส่วนของน้ำต่อเกลือ 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์ หรือในอัตราส่วน 4 ต่อ 1 ส่วนตามรูปที่ 3.12 โดยจะใช้การผสม และคนไปโดยตรงเนื่องจากเกลือมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ง่ายมากไม่จำเป็นต้องผ่านความร้อนซึ่งอาจทำให้เกิดการระเหยของน้ำได้ และทำให้ความเข้มข้นของน้ำเกลือเปลี่ยนแปลงไป

ในส่วนของการผสมน้ำเกลือลงไปในการผสมข้าวจะทำการผสมข้าวต่อน้ำเกลือในอัตราส่วน 1 ต่อ 1.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่พอดีไม่น้อยเกินไป และไม่แฉะเกินไปจนเนื้อละเอียดเป็นน้ำ หลังจากทำการผสมตัวอย่างที่จะทำการวัดทั้งหมดแล้วให้นำมาตั้งเพื่อปรับอุณหภูมิตัวอย่างข้าวทั้งหมดให้เท่ากันก่อนแล้วจึงค่อยนำมาตรวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกควรใช้ภาชนะใส่วัสดุที่มีขนาดพอดี หรือใกล้เคียงกับหัวโพรบเพื่อให้หน้าสัมผัสระหว่างโพรบกับวัสดุเมื่อกดให้แนบชิดกันไม่เกิดการล้นออก และสามารถกดให้แน่นได้ สามารถดูรูปตัวอย่างการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวได้ตามรูปที่ 3.13 ซึ่งการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวสามารถวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำ DI ที่ทำการสอบเทียบก่อนหน้าได้เพื่อยืนยันความถูกต้องของการสอบเทียบเนื่องจากว่าน้ำมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สามารถหาดูเพื่อเปรียบเทียบได้ทั่วไปตามเว็บไซต์ต่าง ๆ และมีอ้างอิงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่หลากหลายอุณหภูมิ ดังเช่น Debye (1962) ได้อธิบายค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำจากสมการที่ 3.2 โดยที่ ϵ_{∞} คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง ϵ_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำ และ τ คือค่า Relaxation time โดย Debye ได้แทนค่าเหล่านี้ที่น้ำอุณหภูมิ 30 °C ด้วย $\epsilon_{\infty} = 4.6$ $\epsilon_s = 78.3$ และ $\tau = 8.07$ ps ทำให้ได้กราฟออกมาตั้งรูปที่ 3.14 จากรูปดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ได้ว่าแนวโน้มค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำจะมีลักษณะคล้าย

กับในภาพ ถ้าค่าที่วัดออกมาไม่ใกล้เคียงกันอาจสรุปได้ว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นระหว่างการสอบเทียบอุปกรณ์ไม่ว่าจะมาจากตัวอุปกรณ์เอง หรือแม้แต่ความผิดพลาดจากตัวผู้ใช้งาน (Human error)

$$\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (3.2)$$



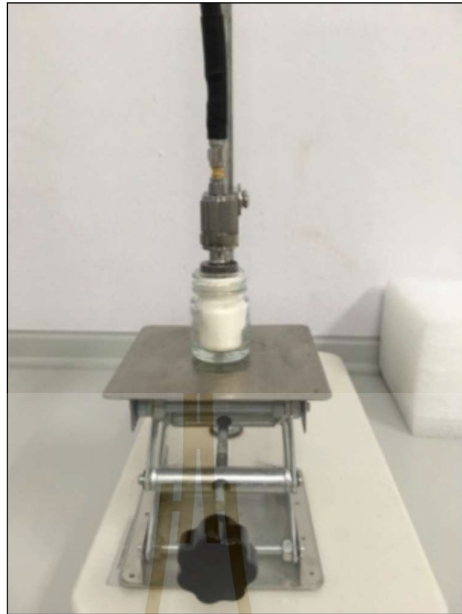
รูปที่ 3.10 เครื่องบดสมุนไพรกำลังสูง



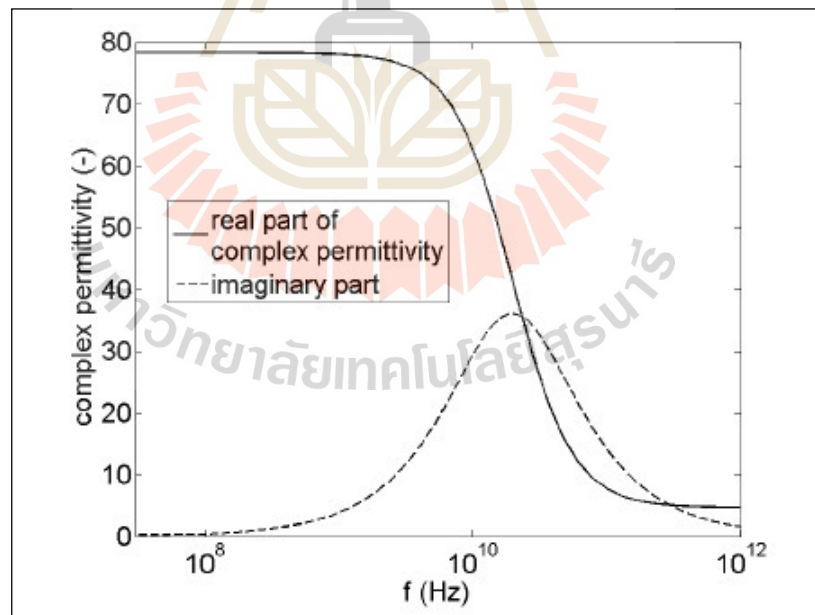
รูปที่ 3.11 ข้าวบดละเอียดหลังจากร่อนผ่านฟیلเตอร์แล้ว



รูปที่ 3.12 ปริมาณการผสมน้ำ และเกลือในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.13 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวด้วย Open-end coaxial probe



รูปที่ 3.14 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอุณหภูมิ 30 องศาจากสมการของ Debye (Zajicek, Oppl, and Vrba, 2008)

3.3 สรุป

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกชนิด Open-end coaxial probe และเป็นหัววัดประเภท High temperature โดยอุปกรณ์สำคัญในการติดตั้งคือ หัวโพรบสำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก เครื่อง Network analyzer เครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สำหรับใช้สอบเทียบ และในบทนี้ยังกล่าวถึงการการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ N1500A materials measurement suite เพื่อการสอบเทียบอุปกรณ์โดยอ้างอิงกับน้ำอีกด้วย น้ำที่ใช้ในการอ้างอิงคือน้ำ DI (Deionized water) เนื่องจากเป็นน้ำที่ปราศจากประจุ ในส่วนของตัวอย่างข้าวที่จะนำมาวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก จะนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพรกำลังสูงแล้วนำมากรองด้วยฟิลเตอร์ (Filter) ให้ได้ขนาดผงเท่ากันก่อนนำมาวัดเนื่องจากการจะวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยหัวโพรบแบบ Open-end จะต้องทำให้ตัวอย่างวัสดุไดอิเล็กตริกที่จะนำมาวัดมีโพรงอากาศน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนของคลื่นสะท้อนกลับที่จะนำมาคำนวณค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจากตัววัสดุ และอากาศ ตัวอย่างข้าวที่ผสมกับน้ำเกลือจะผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1.5 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่พอดีไม่ทำให้ข้าวแห้งเกินไป หรือมีความแฉะมากเกินไปแต่ยังให้ผลความต่างของค่าไดอิเล็กตริกในข้าวแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดอยู่ และน้ำเกลือที่นำมาผสมกับข้าว ทำมาจากน้ำ DI ผสมกับเกลือในอัตราส่วน 4 ต่อ 1 หรือผสมเกลือลงไป 20 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 4

การทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด ข้าวบดละเอียดผสมน้ำเกลือ และข้าวปลอมปนบดละเอียดผสมน้ำเกลือ พร้อมเปรียบเทียบผลการวัด

4.1 กล่าวนำ

การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัด และตั้งค่าโปรแกรมอุปกรณ์รวมถึงการสอบเทียบอุปกรณ์ (Calibration) และวิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องมือวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ Open-end coaxial probe ชนิดหัววัด High temperature รุ่น Keysight N1501A ในบทความก่อนหน้านี้จะถูกนำมาใช้วัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าว และข้าวปลอมปนในบทนี้ โดยตัวอย่างของข้าวที่นำมาวัดจะถูกนำมาบดให้ละเอียดก่อนเพื่อให้เหมาะสมกับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยหัววัดแบบ Open-end coaxial probe การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อได้แก่การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด และการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนบดละเอียดด้วยเทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือจะเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวให้สูงขึ้นได้ ซึ่งจากทฤษฎีในบทที่ 2 ทำให้เห็นว่าน้ำเกลือจะทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวในแต่ละสายพันธุ์นั้นไม่เท่ากัน ซึ่งจะก่อให้เกิดเห็นความแตกต่างกันได้ ข้าวที่นำมาใช้ในการทดลองจะเป็นสายพันธุ์หอมมะลิ 105 เป็นตัวหลักที่จะใช้เป็นข้าวที่ถูกปลอมปนด้วยการนำข้าวสายพันธุ์อื่นมาผสม โดยข้าวที่นำมาผสมจะมี 4 สายพันธุ์ได้แก่ ข้าวหอมปทุม ข้าวกข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเสาไห้ ซึ่งข้าวทั้ง 4 สายพันธุ์จะเป็นข้าวที่นิยมนำมาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิ 105 เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ เช่นราคาที่ถูก ความนุ่มคล้ายข้าวหอมมะลิ หรือมีรูปร่าง และขนาดที่ใกล้เคียงกันกับข้าวหอมมะลิ ซึ่งจะแบ่งเป็นข้าวที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม 2 พันธุ์ ได้แก่ข้าวหอมปทุม และข้าวกข 79 ข้าวที่มีลักษณะแข็ง 2 พันธุ์ ได้แก่ข้าวพิษณุโลก และข้าวเสาไห้

การเพิ่มน้ำเกลือใช้เพิ่มเทคนิคในการตรวจสอบจะให้เห็นความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมากขึ้นตามความเข้มข้นตามทฤษฎี แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เข้มข้นสูงแต่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวของการทำละลาย และยังสามารถผสมกับข้าวบดละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Homogeneous) โดยอัตราส่วนของข้าวบดละเอียดต่อน้ำเกลือ คือ 1 ต่อ 1.5 ซึ่งจะช่วยให้ตัวอย่างข้าวผสมออกมาแล้วมีลักษณะเป็นเจลซึ่งเหมาะสมกับ

การใช้งานกับเครื่องมือวัดแบบ Open-end coaxial probe ชนิดหัววัด High temperature ที่ไม่ต้องการให้มีช่องว่างของอากาศที่ตัวอย่างเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดจากการวัด

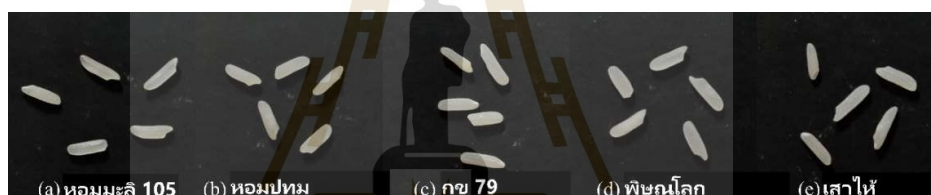
การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด และข้าวปloomปนบดละเอียดผสมน้ำเกลือ จะดำเนินการผ่านโปรแกรม Keysight Materials Measurement Suite 2016 ตัวอย่างทดลองจะทำการพักไว้ในอุณหภูมิห้องก่อนประมาณ 30 นาที เพื่อให้ตัวอย่างทดลองได้ปรับอุณหภูมิให้เท่ากัน ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C) เพื่อป้องกันความผิดพลาดของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้จากการวัดต่างอุณหภูมิ เนื่องจากคุณสมบัตินี้เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก อัตราส่วนของข้าวปloomปนในการทดลองนี้จะอยู่ที่ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ และในการวัดจะทำการเก็บค่าที่ได้จากการวัด 10 ครั้งแล้วเฉลี่ยเป็นค่าสุดท้าย

4.2 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด

4.2.1 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด

ถ้าเปรียบเทียบลักษณะของเม็ดข้าวที่ใช้ในการทดลอง จะเห็นว่าขนาด สี และรูปร่างจะมีความใกล้เคียงกันมากจนแยกตัวตามรูปที่ 4.1 ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีตรวจสอบด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ในส่วนเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นประเภทที่ต้องใช้ตัวอย่างที่เป็นผง ของที่มีผิวเรียบ หรือของเหลว ดังนั้นจึงต้องนำข้าวมาบดให้ละเอียดก่อน การทดลองวัดครั้งแรกจะเป็นการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ของข้าวทั้ง 5 สายพันธุ์ได้แก่ข้าวหอมมะลิ 105 ข้าวหอมปทุม ข้าวกข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าไห้ โดยเป็นการตรวจสอบดูว่าข้าวแต่ละสายพันธุ์จะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งก่อนทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ได้ทดลองทำการวัดค่าความชื้นในข้าวได้ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าปริมาณความชื้นในข้าวจะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ประมาณ 8.4 เปอร์เซ็นต์โดยจะมีเพียงข้าวหอมปทุมที่มีความชื้นอยู่ที่ 8.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความแตกต่างกันน้อยมากเนื่องมาจากการบดข้าวจะเป็นการปรับให้ความชื้นในเมล็ดข้าวระเหยออกไปจนเหลือน้อยมาก (Cheng, You, Lee, Abbas, Rahim, Khor, Zakaria, and Lee, 2017) และมีความใกล้เคียงกัน ทำให้ตัดปัญหาเรื่องความชื้นไม่เท่ากันของตัวอย่างที่จะนำมาวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกได้ หลังจากวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแล้วจะได้ผลตามรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดเฉลี่ยทั้งหมด 10 ครั้งจะเห็นว่าทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (เส้นต่อเนื่อง) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (เส้นประ) ของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ จะมีความใกล้เคียงกันอย่างมาก และมีค่าที่ค่อนข้างน้อย โดยค่าคงที่

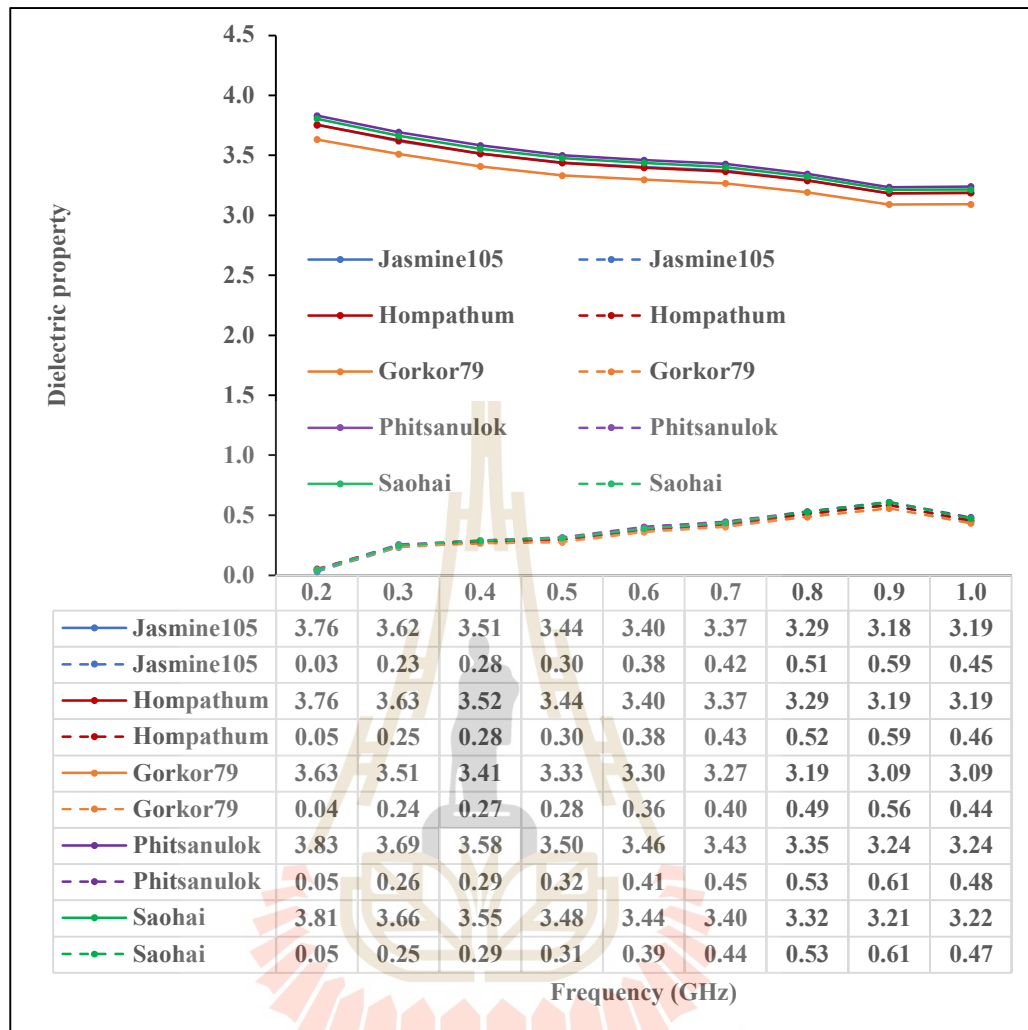
ไดอิเล็กตริกของข้าวจะอยู่ในช่วง 3.09-3.83 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวจะอยู่ในช่วง 0.03-0.61 เท่านั้น ในช่วงของความถี่ 200 MHz – 1 GHz สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะสังเกตเห็นว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นจะมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าสังเกตกราฟของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าข้าว กข 79 จะมีความแตกต่างจากข้าวชนิดอื่นมากที่สุดโดยจะมีค่าน้อยที่สุด แต่ถ้าจะใช้ความแตกต่างนี้ในการตรวจสอบสายพันธุ์ข้าวจะทำได้ยากมากในเชิงนวัตกรรมเพราะค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของข้าวในแต่ละพันธุ์มีความต่างกันเพียงในหลักทศนิยมเท่านั้น ในส่วนของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกนั้นดูเหมือนจะมีความแตกต่างที่น้อยมากจะแทบจะเท่ากันเลย ดังนั้นถ้าจะตรวจสอบความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในการทดลองแรกจะพอมองเห็นว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละสายพันธุ์นั้นมีความต่างแต่จะสังเกตได้ยากเนื่องจากมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 4.1 รูปถ่ายเปรียบเทียบลักษณะของเมล็ดข้าวทั้งขนาด สี และรูปทรงของข้าวที่นำมาทดลอง

ตารางที่ 4.1 ความชื้นของข้าวบดละเอียดแต่ละชนิดพันธุ์

ชนิดพันธุ์ข้าว	ความชื้น
ข้าวหอมมะลิ 105	8.4%
ข้าวหอมปทุม	8.2%
ข้าว กข 79	8.4%
ข้าวพิษณุโลก	8.4%
ข้าวเสาวไห้	8.4%



รูปที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวบดละเอียด โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

4.2.2 วิเคราะห์ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียด

ถ้าจะวิเคราะห์ความแตกต่างในรูปของอัตราส่วนโดยกำหนดให้ข้าวหอมมะลิเป็นตัวอ้างอิง จะได้ผลออกมาตามตารางที่ 4.2 จากตารางจะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ของข้าวที่ความถี่ตั้งแต่ 200 MHz จนถึง 1000 MHz โดยเมื่อจะทำการเปรียบเทียบเส้นกราฟ จะเพื่อ

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เอาไว้ที่ 1 เพอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าเหยิงที่อาจเกิดขึ้นได้จากหัวโพรบแบบ Open-end coaxial Keysight N1501A ชนิด High temperature ที่จะทำให้มีการคลาดเคลื่อนจากกว่าวัดได้ ในตารางจะใช้ขั้วหอมมะลิ 105 เป็นตัวอ้างอิงเนื่องจากในการทดลองต่อไปจะใช้ขั้วหอมมะลิ 105 เป็นขั้วหลักในการทำขั้วปลอมปน และขั้วอ้างอิง

เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของขั้วหอมมะลิ 105 ต่อขั้วพันธุ์อื่น ๆ จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของขั้วหอมมะลิ 105 มีค่าเท่ากับขั้วหอมปทุมที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz โดยขั้ว กข 79 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน้อยกว่าขั้วหอมมะลิ 105 ประมาณ 3.46 และ 3.16 เพอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz ตามลำดับ ในขณะที่ขั้วพิณโลก และขั้วเสาให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มากกว่าขั้วหอมมะลิ 105 โดยขั้วพิณโลกมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1.86 และ 1.57 เพอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz ตามลำดับ ส่วนขั้วเสาให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1.33 และ 0.94 เพอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของขั้ว กข 79 เมื่อเทียบกับขั้วหอมมะลิ 105 จะมีความต่างกันมากที่สุดที่มากกว่า 3 เพอร์เซ็นต์ในขณะที่ขั้วพันธุ์อื่นจะต่างกันไม่เกิน 2 เพอร์เซ็นต์

แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของขั้วหอมมะลิ 105 ต่อขั้วพันธุ์อื่น ๆ จะเห็นว่าที่ความถี่ 200 MHz มีความแตกต่างของค่าการสูญเสียอย่างมากเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยขั้วหอมปทุม ขั้วพิณโลก และขั้วเสาให้มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมากกว่าขั้วหอมมะลิ 105 ประมาณ 66.67 เพอร์เซ็นต์ และขั้ว กข 79 มีค่ามากกว่า 33.33 เพอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความถี่ 1000 MHz ขั้วหอมปทุม ขั้วพิณโลก และขั้วเสาให้มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมากกว่าขั้วหอมมะลิ 105 อยู่ที่ 2.22 6.67 และ 4.44 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนขั้ว กข 79 มีค่าน้อยกว่าขั้วหอมมะลิ 105 2.22 เพอร์เซ็นต์ จากผลการเปรียบเทียบทำให้เห็นว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะสามารถนำมาพิจารณาเพื่อใช้ตรวจสอบสายพันธุ์ขั้วได้ดีกว่าที่ความถี่ต่ำ แต่เมื่อดูถึงค่าตัวเลขจะเห็นว่าความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าแค่ประมาณ 0.01-0.02 เท่านั้น

ดังนั้นเมื่อสรุปได้ว่าขั้วแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก จึงคาดการณ์ได้ว่าขั้วหอมมะลิที่มีการปลอมปนก็ควรจะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างออกไปจากขั้วหอมมะลิปกติด้วย และในการทดลองถัดไปจะมีการใช้เทคนิคเพิ่มเข้าไป ซึ่งก็คือการเติมน้ำเกลือเข้าไปก่อนการทดลองเพื่อไปเพิ่มค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างขั้วให้มากขึ้น และเพิ่มความต่างของค่าไดอิเล็กตริกของขั้วหอมมะลิ 105 ปลอมปนเมื่อเทียบกับขั้วหอมมะลิ 105 ที่ใช้

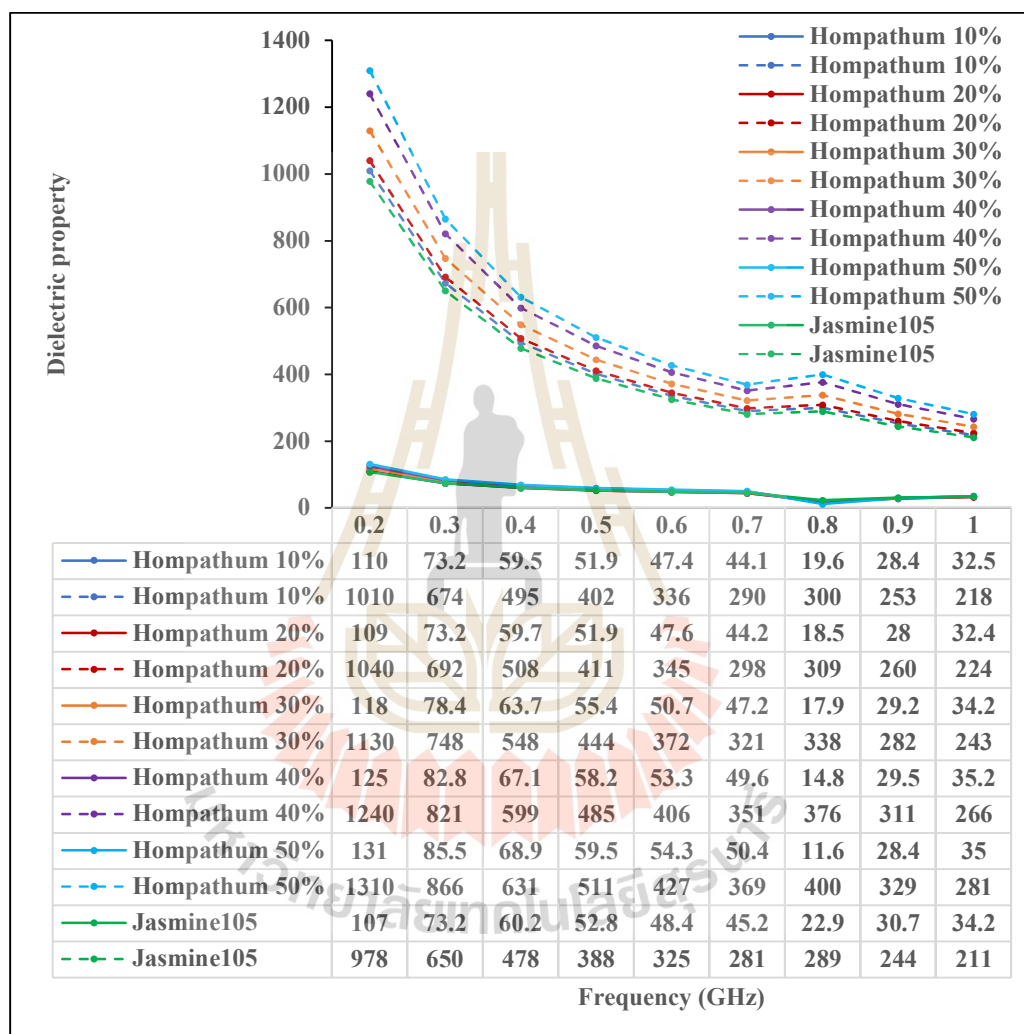
อ้างอิง โดยคาดการณ์ว่าจะเห็นผลต่างที่ชัดเจนของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเมื่อทำการเปรียบเทียบ โดยเฉพาะค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวบดละเอียดสำหรับการทดลอง

Mean \pm SD	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss factor)	
	ความถี่ (MHz)			
	200	1000	200	1000
ข้าวหอมมะลิ 105 บดละเอียด (A)	3.76 \pm 0.0376	3.19 \pm 0.0319	0.03 \pm 0.0003	0.45 \pm 0.0045
ข้าวหอมปทุม บดละเอียด (B)	3.76 \pm 0.0376	3.19 \pm 0.0319	0.05 \pm 0.0005	0.46 \pm 0.0046
ข้าว กข 79 บดละเอียด (C)	3.63 \pm 0.0363	3.09 \pm 0.0309	0.04 \pm 0.0004	0.44 \pm 0.0044
ข้าวพิษณุโลก บดละเอียด (D)	3.83 \pm 0.0383	3.24 \pm 0.0324	0.05 \pm 0.0005	0.48 \pm 0.0048
ข้าวเสาไห้ บดละเอียด (E)	3.81 \pm 0.0381	3.22 \pm 0.0322	0.05 \pm 0.0005	0.47 \pm 0.0047
เปรียบเทียบ (B) กับ (A) (%)	-	-	มากกว่า \approx 66.67	มากกว่า \approx 2.22
เปรียบเทียบ (C) กับ (A) (%)	น้อยกว่า \approx 3.46	น้อยกว่า \approx 3.13	มากกว่า \approx 33.33	น้อยกว่า \approx 2.22
เปรียบเทียบ (D) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 1.86	มากกว่า \approx 1.57	มากกว่า \approx 66.67	มากกว่า \approx 6.67
เปรียบเทียบ (E) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 1.33	มากกว่า \approx 0.94	มากกว่า \approx 66.67	มากกว่า \approx 4.44

4.3 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนบดละเอียดผสมน้ำเกลือ

4.3.1 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมในอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมเมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

จากการทดลองก่อนหน้านี้จะเห็นว่าข้าวแต่ละสายพันธุ์นั้นมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกันแม้จะเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะเห็นว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะดูมีค่าต่างกันมากที่สุดที่ความถี่ 200 MHz ดังนั้นเมื่อจะตรวจสอบข้าวปลอมปนโดยการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจึงต้องใช้เทคนิคเพิ่มเติม โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือเข้าไป น้ำเกลือจะไปผสมกับข้าวบดละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่น้ำจะเป็นตัวทำละลายให้เกลือสามารถผสมกับข้าวได้ และไปรวมกับพันธะโมเลกุลของสารอาหารต่าง ๆ ในข้าวจนเกิดเป็นพันธะใหม่ที่มีการโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนไป

ในการทดลองครั้งนี้จะเป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้าวหอมมะลิ 105 ที่เป็นตัวอ้างอิง จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมนั้นมีค่าสูงที่สุดที่ความถี่ 200 MHz และมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้นจึงขอการเปรียบเทียบที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz

ถ้าพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมที่สัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 200 MHz จะได้ค่า 110 109 118 125 และ 131 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่า 107 จะเห็นว่าข้าวปลอมปนในสัดส่วน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์นั้นมีความใกล้เคียงกันแต่จะเริ่มเห็นความแตกต่างเมื่อมีการปลอมปนที่ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความถี่ 1000 MHz จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมที่สัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ที่ 32.5 32.4 34.2 35.2 และ 35 จะเห็นว่ามีความแตกต่างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่า 34.2

ถ้าพิจารณาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก จะเห็นได้ชัดว่ามีความแตกต่างระหว่างข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ โดยที่ความถี่ 200 MHz จะได้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมที่สัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ 1010 1040 1130 1240 และ 1310 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก 978 จะเห็นได้ชัดว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการปลอมปนมากขึ้น โดยที่สัดส่วนการปลอมปนมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์จะมีความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมากกว่า 100 ในส่วนของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุมที่ความถี่ 1000 MHz จะเห็นได้ว่ามีความ

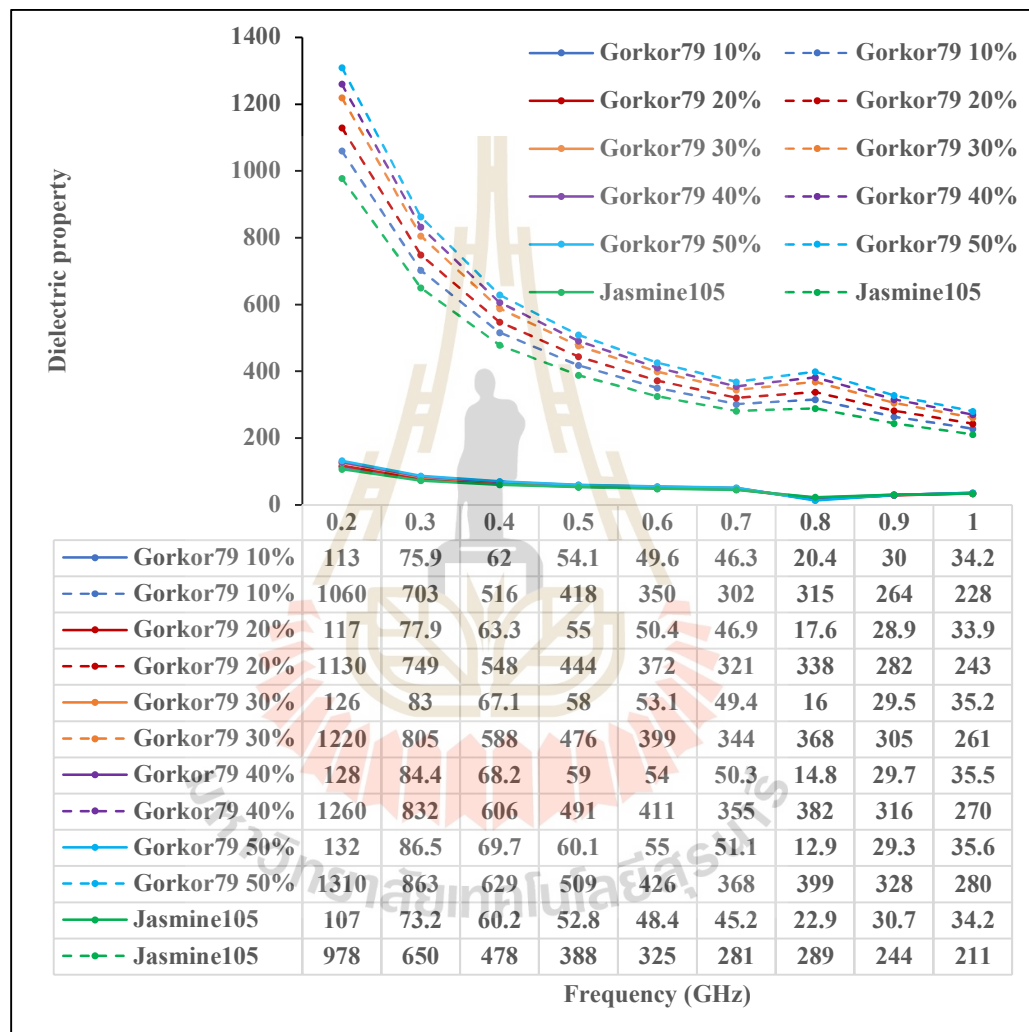
แตกต่างกันประมาณหนึ่งแต่ไม่เยอะเท่ากับความถี่ต่ำ โดยมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก 218 224 243 266 และ 281 ที่สัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่า 211 จะเห็นว่ามีความแตกต่างกันในหลักสิบที่การปลอมปนมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

4.3.2 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 ในอัตราส่วนต่าง ๆ

จากการทดลองก่อนหน้านี้ซึ่งปลอมปนด้วยข้าวหอมปทุมซึ่งเป็นข้าวที่มีความนุ่ม การทดลองครั้งนี้เป็นการปลอมปนข้าวที่อยู่ในกลุ่มของข้าวนุ่มด้วยเช่นกันซึ่งก็คือข้าว กข 79 โดยแนวโน้มของกราฟจากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลง และแตกต่างกันน้อยลงเมื่อความถี่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยเปรียบเทียบค่าของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 และ ข้าวหอมมะลิ 105 สำหรับอ้างอิง ที่สัดส่วนการปลอมปน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์จะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 113 117 126 128 และ 132 ตามลำดับ ที่ความถี่ 200 MHz โดยค่าอ้างอิงเท่ากับ 107 สังเกตได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างกันเกินสิบที่การปลอมปนมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1000 MHz ข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 มีค่า 34.2 33.9 35.2 35.5 และ 35.6 ที่สัดส่วนการปลอมปน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่ความถี่สูงนั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันมากทำให้ยากต่อการใช้ตรวจสอบ

เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 ในสัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ และข้าวหอมมะลิ 105 สำหรับอ้างอิง จากรูปที่ 4.4 จะได้ว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนมีค่า 1060 1130 1220 1260 และ 1310 ตามลำดับ ที่ความถี่ 200 MHz โดยของข้าวอ้างอิงมีค่า 978 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันในหลักร้อยตั้งแต่สัดส่วนการปลอมปน 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ในขณะที่การเปรียบเทียบที่ความถี่ 1000 MHz นั้นเห็นความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกไม่มากนักโดยที่สัดส่วนการปลอมปน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก 228 243 261 270 และ 280 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับ 211 ที่เป็นของข้าวอ้างอิง

ซึ่งจากการทดลองมาทั้งสองครั้งจากการปลอมปนข้าวชนิดนี้ลงไปจะทำให้พอทราบได้ว่าการตรวจสอบข้าวปลอมปนสามารถทำได้วิธีเทียบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกได้ โดยการเปรียบเทียบจะเห็นผลชัดเจนมากที่สุดที่ความถี่ต่ำ และพิจารณาด้วยค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก

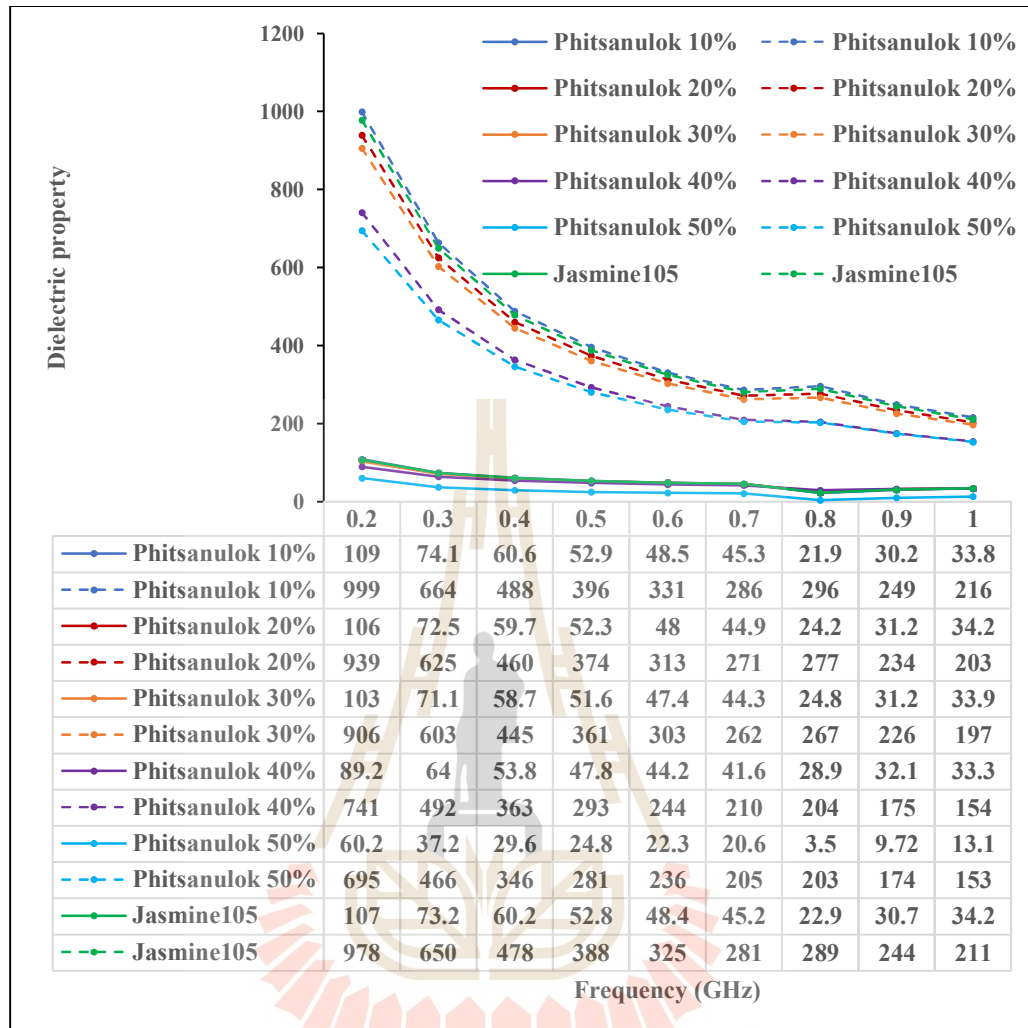


รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 เมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

4.3.3 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกในอัตราส่วนต่าง ๆ

หลังจากทดลองเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวชนิดนี้ไปแล้ว การทดลองครั้งนี้จะเป็นการปลอมปนข้าวชนิดแข็งลงไปซึ่งก็คือข้าวพิษณุโลก จากผลการทดลองตามกราฟในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกส่วนใหญ่ของข้าวปลอมปนจะมีค่าน้อยลงจากค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวอ้างอิงซึ่งต่างจากการปลอมปนข้าวสองชนิดในการทดลองก่อนหน้านี้ที่มีค่ามากขึ้นจากของข้าวอ้างอิง เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลก เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่ความถี่ 200 MHz จะได้ 109 106 103 89.2 และ 60.2 เมื่อข้าวปลอมปนในสัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงมีค่า 107 จะเห็นว่าที่การปลอมปนมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์จะมีผลต่างกับข้าวอ้างอิงค่อนข้างชัดเจนในขณะที่การปลอมปนน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์จะมีผลต่างกับข้าวอ้างอิงไม่ถึงหลักสิบ และที่ความถี่ 1000 MHz จะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกในสัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ 33.8 34.2 33.9 33.3 และ 13.1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงคือ 34.2 จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนักแต่จะมีที่การปลอมปน 40 เปอร์เซ็นต์ที่จะมีการลดลงอย่างมาก

ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่ความถี่ 200 MHz จะได้ 999 939 906 741 และ 695 ตามลำดับ โดยข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงเท่ากับ 978 จะเห็นว่าที่สัดส่วนการปลอมปนมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์จะมีผลต่างที่เกินหนึ่งร้อย แต่ที่สัดส่วนอื่น ๆ ก็ยังเห็นความแตกต่างกันได้ประมาณหนึ่ง ส่วนที่ 1000 MHz จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกเท่ากับ 216 203 197 154 และ 153 ตามลำดับ โดยข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก 211 จะเห็นว่าที่การปลอมปน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์นั้นจะมีความต่างกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงไม่ถึงหลักสิบ แต่ที่การปลอมปน 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปจะมีความแตกต่างประมาณหนึ่งที่สามารถใช้ตรวจสอบได้ จากการทดลองทำให้เห็นว่านอกจากข้าวสายพันธุ์นุ่มที่สามารถตรวจสอบได้แล้วข้าวสายพันธุ์ที่มีความแข็งก็สามารถใช้เทคนิคนี้ตรวจสอบการปลอมปนได้โดยจะเห็นผลชัดเจนมากที่สุดที่ความถี่ต่ำ และพิจารณาด้วยค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกเช่นเดียวกันกับการตรวจสอบข้าวปลอมปนที่เป็นข้าวสายพันธุ์นุ่ม



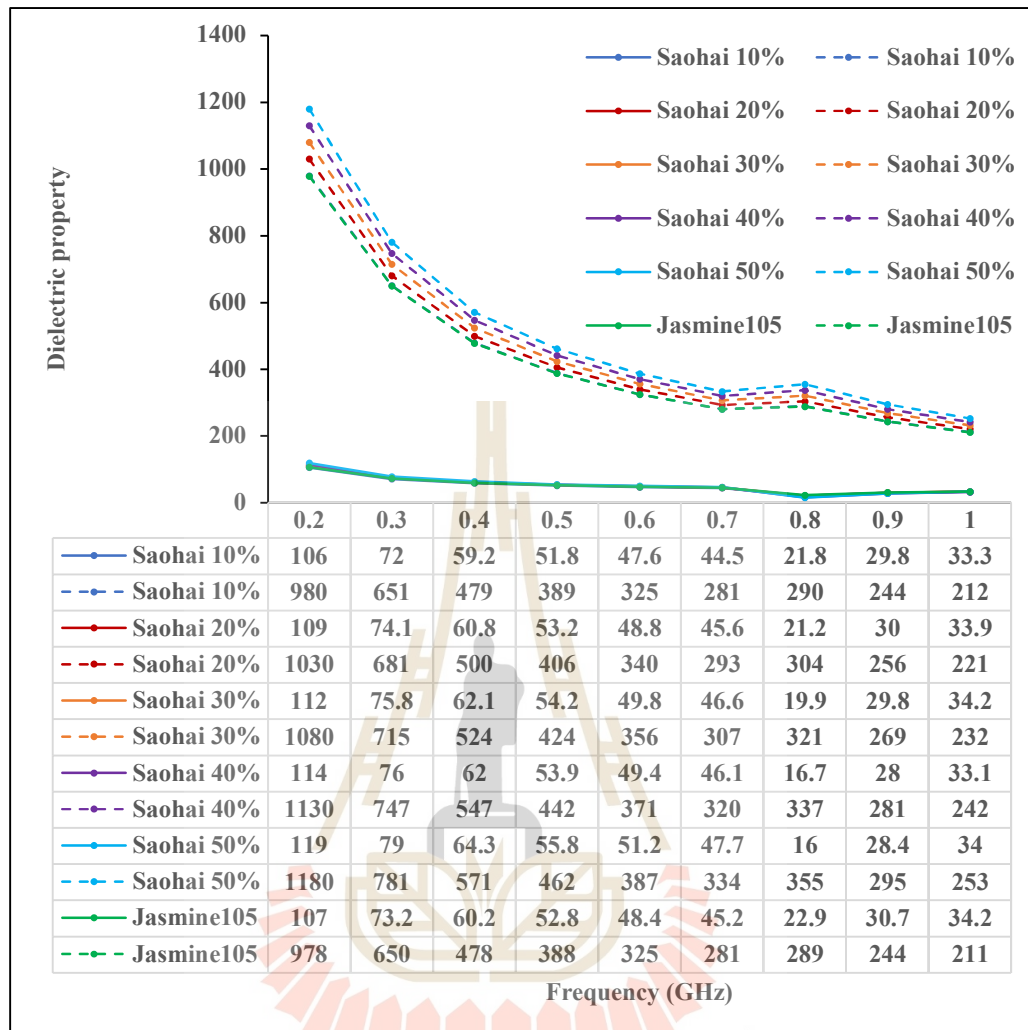
รูปที่ 4.5 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกเมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

4.3.4 ค่าคุณสมบัติไดโอดีเล็กทริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวเสาไห้ในอัตราส่วนต่าง ๆ

ในการทดลองครั้งสุดท้ายได้ใช้ข้าวเสาไห้มาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งข้าวเสาไห้เป็นสายพันธุ์ข้าวที่มีความแข็งแรงจะปริมาณของอะมิโลสที่มากในเมล็ดข้าว การทดลองในครั้งนี้ก็ยังคงดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกับทั้งสามการทดลองก่อนหน้านี้โดยเปรียบเทียบที่ค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริกก่อนโดยที่นำข้าวเสาไห้มาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิ 105 ในสัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งข้าวเสาไห้มาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิ 105 มีค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริกที่ความถี่ 200 MHz 106 109 112 114 และ 119 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริกกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่า 107 จะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยมาก และที่ความถี่ 1000 MHz เองก็มีความแตกต่างของค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริกข้าวเสาไห้มาปลอมปนกับข้าวหอมมะลิ 105 ตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงน้อยมากเช่นกัน สามารถดูกราฟได้ตามรูปที่ 4.6

แต่เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กทริกจะได้ว่าที่ 200 MHz ข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวเสาไห้ ในสัดส่วน 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่า 980 1030 1080 1130 และ 1180 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่า 978 จะเห็นว่ามีค่าแตกต่างของค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กทริกเกินหนึ่งร้อยที่การปลอมปนสัดส่วนมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กทริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวเสาไห้ที่ความถี่ 1000 MHz มีค่าเท่ากับ 212 221 232 242 และ 253 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ 211 กับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงที่มีค่า 211 จะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกันค่อนข้างน้อย

จากผลการทดลองทั้งหมดทำให้บอกได้ว่าการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยค่าคุณสมบัติไดโอดีเล็กทริกสามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคการเติมน้ำเกลือเข้าไปเพื่อเพิ่มความต่างของค่าคุณสมบัติไดโอดีเล็กทริกของข้าวแต่ละพันธุ์ แต่การตรวจสอบจะเห็นผลชัดเจนมากที่สุดถ้าพิจารณาที่ความถี่ต่ำ และพิจารณาด้วยค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กทริกจะมีประสิทธิภาพมากกว่าค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริก อีกทั้งข้าวปลอมปน เมื่อมีการปนในปริมาณที่มากจะทำให้ความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดโอดีเล็กทริกมีค่าต่างกันมากเข้าไปอีก



รูปที่ 4.6 ผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวเสาไห้เมื่อใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือ โดยเส้นต่อเนื่องแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเส้นประแทนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

4.3.5 วิเคราะห์ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปน

จากการทดลองก่อนหน้านี้ทำให้ทราบประสิทธิภาพการตรวจสอบข้าวปลอมปนโดยใช้การเปรียบเทียบค่าไดอิเล็กตริกโดยจะเห็นว่าที่ความถี่ 200 MHz นั้นจะเห็นความแตกต่างจากค่า

การสูญเสียไดโอดีเล็กตริกมากที่สุด และที่ความถี่ 1000 MHz จะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ค่าความต่างของค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริกที่ความถี่ 200 MHz และ 1000 MHz โดยแสดงในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์ โดยจะแบ่งวิเคราะห์เป็น 5 ตารางซึ่งแบ่งตามค่าเปอร์เซ็นต์ของการปลอมปน

ตารางที่ 4.3 จะเป็นผลของความต่างค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ จากตารางจะเห็นว่าได้ใช้ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นตัวอ้างอิง จากตารางจะเห็นว่าเมื่อมีการปลอมปนในข้าวหอมมะลิ 105 ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ผลการเปรียบเทียบค่าความต่างของค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริกจะน้อยมาก ซึ่งตัวอย่างที่มีความต่างมากที่สุดคือข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 ซึ่งมีความมากกว่า 5.61 เปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 200 MHz และเมื่อดูที่ค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริกจะเห็นว่าข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม กข 79 และ พิษณุโลก ที่ต่างกันเกิน 2 เปอร์เซ็นต์ โดยข้าวที่ปลอมปนกับข้าว กข 79 จะมีความต่างมากที่สุดคือ 8.38 และ 8.06 เปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz ตามลำดับ ซึ่งถ้าจะให้การตรวจสอบข้าวปลอมปนมีความผิดพลาดน้อยที่สุดก็ควรพิจารณาจากความต่างที่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากว่าในตัวเครื่องมีวัดเองก็มีการเผื่อค่าผิดพลาดไว้ที่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสามารถตรวจสอบข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยการพิจารณาจากค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริกได้โดยที่ 200 MHz จะมีข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับ ข้าวหอมปทุม และ ข้าว กข 79 ส่วนที่ 1000 MHz จะมีข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้สำหรับการพิจารณาจากค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริกจะสามารถตรวจสอบข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ได้เมื่อมีการปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 และ ข้าวพิษณุโลก มีเพียงการปลอมปนกับข้าวเส้าให้ที่ตรวจสอบไม่ได้

ในตารางที่ 4.4 จะเป็นการเปรียบเทียบความต่างค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าถ้าพิจารณาจากค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริกที่ความถี่ 200 MHz จะมีเพียงข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 เท่านั้นที่สามารถตรวจสอบได้จากความต่าง 9.34 เปอร์เซ็นต์ และที่ 1000 MHz จะมีเพียงการปลอมปนกับข้าวหอมปทุมที่มีความต่าง 5.26 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาจากค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริก จะเห็นว่าสามารถตรวจสอบข้าวปลอมปนได้เมื่อมีการปลอมปนข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 และข้าวพิษณุโลก เนื่องจากว่าเห็นความแตกต่างมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้าวหอมมะลิ 105

ปลอมปนกับ ข้าว กข 79 จะมีความแตกต่างมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิงโดยมีความต่างมากถึง 15.54 และ 5.17 ที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนในอัตราส่วน 30 เปอร์เซ็นต์ที่แสดงในตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าถ้าพิจารณาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ 200 MHz จะสามารถตรวจสอบข้าวปลอมปนได้ทั้งหมดจากการทดลองโดยที่ความแตกต่างระหว่างข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม และข้าว กข 79 เทียบกับข้าวอ้างอิงจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนมากที่สุดที่ 10.28 และ 17.76 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่ถ้าดูที่ความถี่ 1000 MHz จะเห็นว่ามีความถี่เพียงข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าว กข 79 เท่านั้นที่สามารถตรวจสอบได้จากความแตกต่าง 2.92 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาจากค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเห็นว่าสามารถตรวจสอบข้าวปลอมปนได้ทุกตัวอย่างที่นำมาทดลอง โดยที่ 200 MHz จะมีความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าให้เปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิงอยู่ที่ 15.54 24.74 7.34 และ 10.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ความถี่ 1000 MHz จะมีความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าให้เปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิงอยู่ที่ 15.17 23.70 6.64 และ 9.95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำจะมีความแตกต่างที่ชัดเจนกว่าความถี่สูง

ตารางที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนในอัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์ จากตารางจะเห็นว่าทุกตัวอย่างการทดลองทั้งที่ความถี่ 200 และ 1000 MHz มีความแตกต่างของทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าในอัตราส่วนปลอมปน 40 เปอร์เซ็นต์สามารถตรวจสอบได้ทั้งหมด โดยเมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 200 MHz จะมีตัวอย่างทดลองที่มีความแตกต่างกับข้าวอ้างอิงเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ 3 ตัวอย่างคือ ข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 และ ข้าวพิษณุโลก ซึ่งมีความแตกต่างอยู่ 16.82 19.63 และ 16.64 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นความแตกต่างที่ค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณาที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก จะเห็นว่ามีความแตกต่างจากการเปรียบเทียบเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด โดยที่ความถี่ 200 MHz จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าให้เปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิงอยู่ที่ 26.79 28.83 24.23 และ 15.54 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ 1000 MHz มีความแตกต่างจากการเปรียบเทียบอยู่ที่ 26.07

27.96 27.01 และ 14.69 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากความแตกต่างที่มากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อมีปริมาณการปลอมปนข้าวเพิ่มขึ้นทำให้สามารถสรุปได้ว่ายิ่งมีการปลอมปนข้าวมากขึ้นก็ยิ่งตรวจสอบเจอได้ง่ายขึ้นจากการใช้วิธีการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยหลักการนี้

จากการวิเคราะห์ในตารางที่ผ่านมาทำให้คาดการณ์ได้ว่าตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ควรจะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อดูจากตารางแล้วก็เห็นว่าแนวโน้มที่เป็นไปตามที่คาด โดยเมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 200 MHz จะเห็นว่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากการเปรียบเทียบข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าไห้ กับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงอยู่ที่ 22.43 23.36 43.74 และ 11.21 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ความถี่ 1000 MHz มีความต่างจากการเปรียบเทียบอยู่ที่ 2.34 4.09 61.7 และ 0.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ 200 MHz จะมีความแตกต่างจากการเปรียบเทียบอย่างมากโดยเฉพาะข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกที่มีความแตกต่างมากที่สุดที่ 43.74 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความถี่ 1000 MHz นั้นกลับมีความแตกต่างที่ต่ำมาก ยกเว้นเพียงข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพิษณุโลกที่มีความต่างมากถึง 61.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเห็นว่าที่ความถี่ 200 MHz จะมีความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจากการเปรียบเทียบข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเส้าไห้ กับข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิงอยู่ที่ 33.95 33.95 28.94 และ 20.65 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ทุกตัวอย่าง และที่ความถี่ 1000 MHz มีความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจากการเปรียบเทียบอยู่ที่ 33.18 32.70 27.49 และ 19.90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่ค่อนข้างมากพอสมควรแต่ไม่มากเท่าที่ความถี่ 200 MHz

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบจากตารางที่ 4.3-4.7 จะสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในการตรวจสอบข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนได้ แต่ต้องมีการใช้เทคนิคเพิ่มเติมเพื่อให้มีความแตกต่างของข้าวแต่ละสายพันธุ์มากขึ้น และงานวิจัยนี้ได้ใช้การเติมน้ำเกลือ จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนั้น ที่ความถี่ต่ำจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าความถี่สูงทั้งการเปรียบเทียบด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก แต่ถ้าเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองค่า จะเห็นว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่มากกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และการตรวจสอบ

ข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนจะมีความชัดเจนมากขึ้นถ้ามีการปลอมปนของข้าวสายพันธุ์อื่นลงไปในส่วนที่มากขึ้น (สามารถดูกราฟแบบ Scatter plot ในรูปแบบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ของข้าวหอมมะลิ105 กับข้าวหอมมะลิ105 ปลอมปนตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มเติมได้ในรูปที่ 4.7-4.11)

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์

Mean \pm SD	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss factor)	
	ความถี่ (MHz)			
	200	1000	200	1000
ข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิง (A)	107 \pm 1.07	34.2 \pm 0.342	978 \pm 9.78	211 \pm 2.11
ปลอมปนกับข้าวหอม ปทุม (B)	110 \pm 1.10	32.5 \pm 0.325	1010 \pm 10.10	218 \pm 2.18
ปลอมปนกับข้าว กข 79 (C)	113 \pm 1.13	34.2 \pm 0.342	1060 \pm 10.60	228 \pm 2.28
ปลอมปนกับข้าว พิษณุโลก (D)	109 \pm 1.09	33.8 \pm 0.338	999 \pm 9.99	216 \pm 2.16
ปลอมปนกับข้าวเสา ไห้ (E)	106 \pm 1.06	33.3 \pm 0.333	980 \pm 9.80	212 \pm 2.12
เปรียบเทียบ (B) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 2.80	น้อยกว่า \approx 4.97	มากกว่า \approx 3.27	มากกว่า \approx 3.32
เปรียบเทียบ (C) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 5.61	-	มากกว่า \approx 8.38	มากกว่า \approx 8.06
เปรียบเทียบ (D) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 1.87	น้อยกว่า \approx 1.17	มากกว่า \approx 2.15	มากกว่า \approx 2.37
เปรียบเทียบ (E) กับ (A) (%)	น้อยกว่า \approx 0.93	น้อยกว่า \approx 2.63	มากกว่า \approx 0.20	มากกว่า \approx 0.47

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์

Mean \pm SD	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss factor)	
	ความถี่ (MHz)			
	200	1000	200	1000
ข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิง (A)	107 \pm 1.07	34.2 \pm 0.342	978 \pm 9.78	211 \pm 2.11
ปลอมปนกับข้าวหอม ปทุม (B)	109 \pm 1.09	32.4 \pm 0.324	1040 \pm 10.40	224 \pm 2.24
ปลอมปนกับข้าว กข 79 (C)	117 \pm 1.17	33.9 \pm 0.339	1130 \pm 11.30	243 \pm 2.43
ปลอมปนกับข้าว พิษณุโลก (D)	106 \pm 1.06	34.2 \pm 0.342	939 \pm 9.39	203 \pm 2.03
ปลอมปนกับข้าวเสา ไห้ (E)	109 \pm 1.09	33.9 \pm 0.339	1030 \pm 10.30	221 \pm 2.21
เปรียบเทียบ (B) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 1.87	น้อยกว่า \approx 5.26	มากกว่า \approx 6.34	มากกว่า \approx 6.16
เปรียบเทียบ (C) กับ (A) (%)	เพิ่มขึ้น \approx 9.34	น้อยกว่า \approx 0.88	เพิ่มขึ้น \approx 15.54	เพิ่มขึ้น \approx 15.17
เปรียบเทียบ (D) กับ (A) (%)	น้อยกว่า \approx 0.93	-	น้อยกว่า \approx 3.99	น้อยกว่า \approx 3.79
เปรียบเทียบ (E) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 1.87	น้อยกว่า \approx 0.88	มากกว่า \approx 5.32	มากกว่า \approx 4.74

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 30 เปอร์เซ็นต์

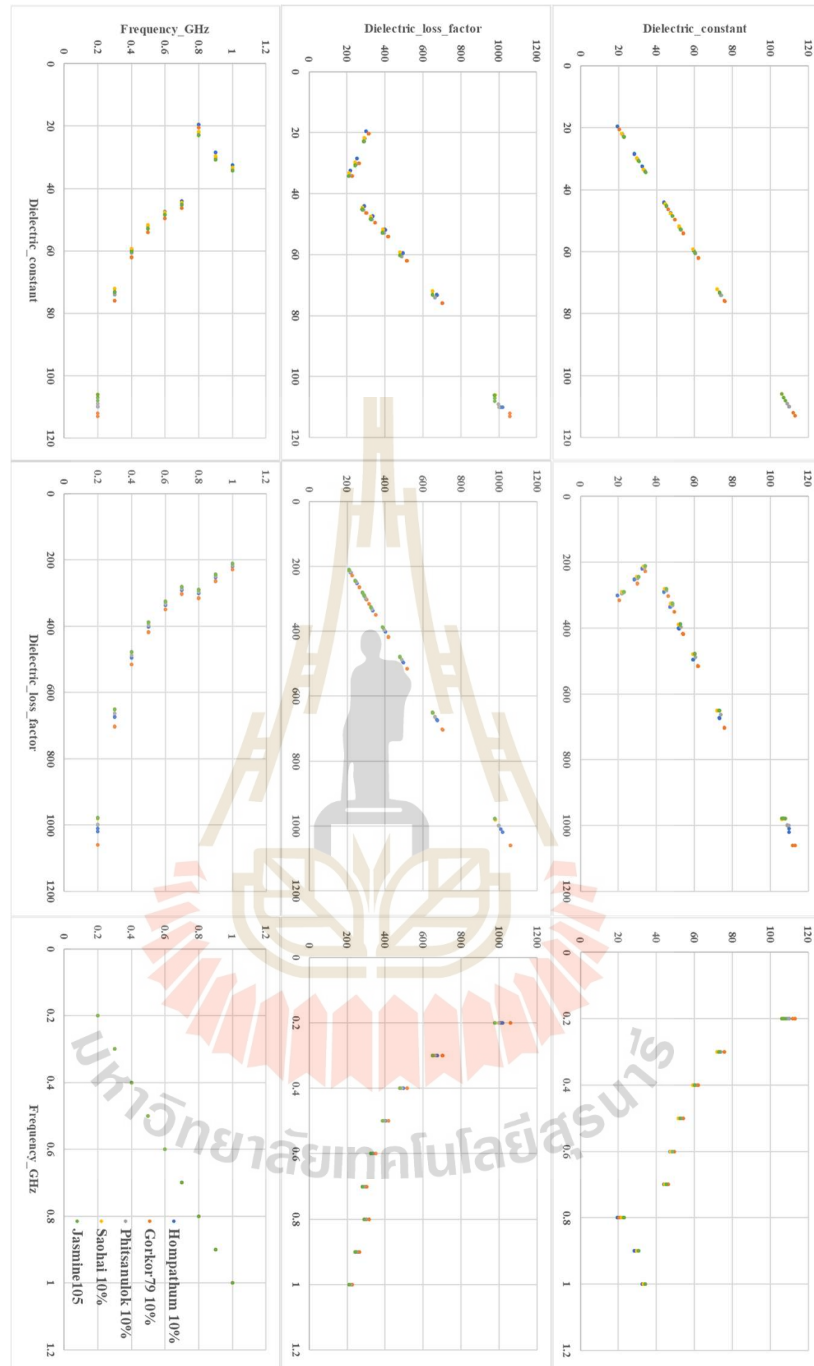
Mean \pm SD	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss factor)	
	ความถี่ (MHz)			
	200	1000	200	1000
ข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิง (A)	107 \pm 1.07	34.2 \pm 0.342	978 \pm 9.78	211 \pm 2.11
ปลอมปนกับข้าวหอม ปทุม (B)	118 \pm 1.18	34.2 \pm 0.342	1130 \pm 11.30	243 \pm 2.43
ปลอมปนกับข้าว กข 79 (C)	126 \pm 1.26	35.2 \pm 0.352	1220 \pm 12.20	261 \pm 2.61
ปลอมปนกับข้าว พิษณุโลก (D)	103 \pm 1.03	33.9 \pm 0.339	906 \pm 9.06	197 \pm 1.97
ปลอมปนกับข้าวเสา ไห้ (E)	112 \pm 1.12	34.2 \pm 0.342	1080 \pm 10.80	232 \pm 2.32
เปรียบเทียบ (B) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 10.28	-	มากกว่า \approx 15.54	มากกว่า \approx 15.17
เปรียบเทียบ (C) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 17.76	มากกว่า \approx 2.92	มากกว่า \approx 24.74	มากกว่า \approx 23.70
เปรียบเทียบ (D) กับ (A) (%)	น้อยกว่า \approx 3.74	น้อยกว่า \approx 0.88	น้อยกว่า \approx 7.39	น้อยกว่า \approx 6.64
เปรียบเทียบ (E) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 4.67	-	มากกว่า \approx 10.43	มากกว่า \approx 9.95

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์

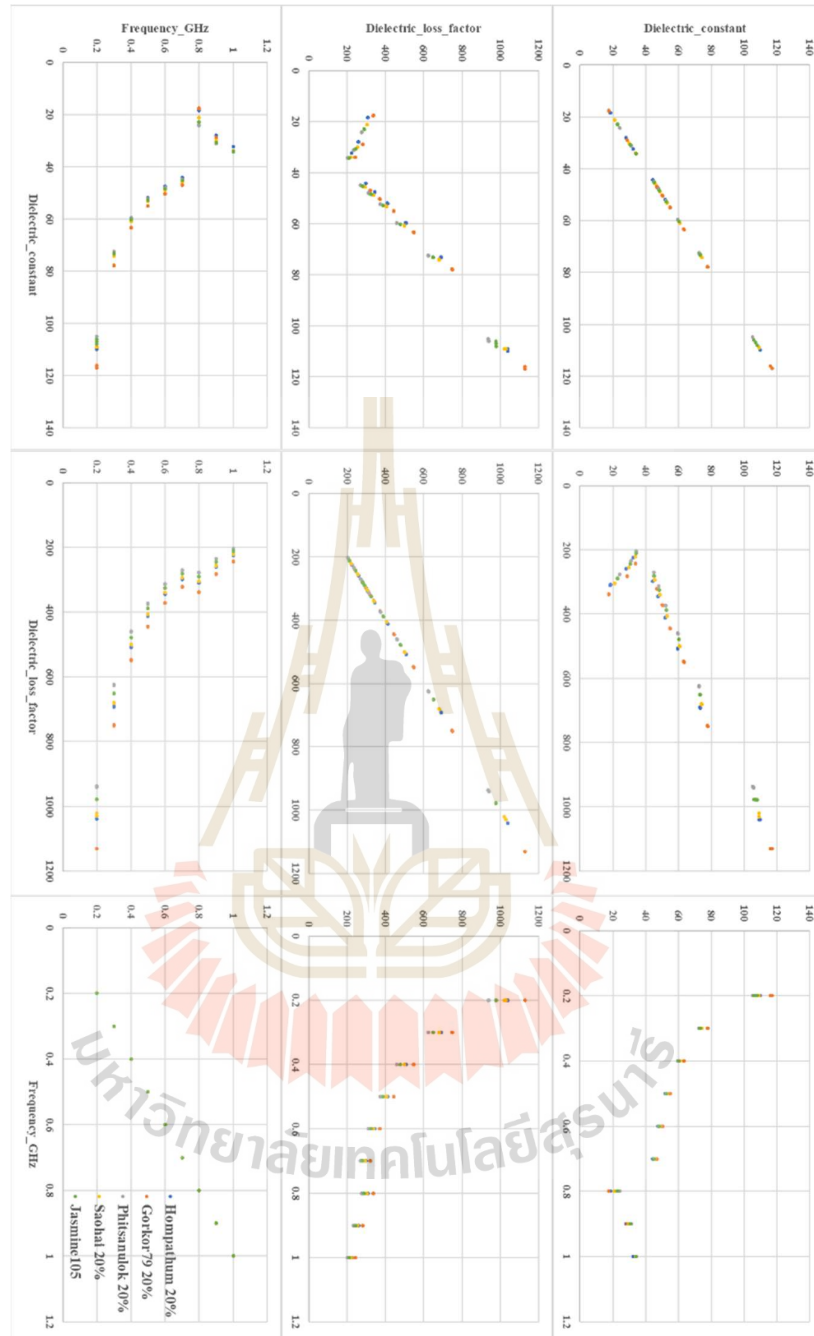
Mean \pm SD	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss factor)	
	ความถี่ (MHz)			
	200	1000	200	1000
ข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิง (A)	107 \pm 1.07	34.2 \pm 0.342	978 \pm 9.78	211 \pm 2.11
ปลอมปนกับข้าวหอม ปทุม (B)	125 \pm 1.25	35.2 \pm 0.352	1240 \pm 12.40	266 \pm 2.66
ปลอมปนกับข้าว กข 79 (C)	128 \pm 1.28	35.5 \pm 0.355	1260 \pm 12.60	270 \pm 2.70
ปลอมปนกับข้าว พิษณุโลก (D)	89.2 \pm 0.892	33.3 \pm 0.333	741 \pm 7.41	154 \pm 1.54
ปลอมปนกับข้าวเสา ไห้ (E)	114 \pm 1.14	33.1 \pm 0.331	1130 \pm 11.30	242 \pm 2.42
เปรียบเทียบ (B) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 16.82	มากกว่า \approx 2.92	มากกว่า \approx 26.79	มากกว่า \approx 26.07
เปรียบเทียบ (C) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 19.63	มากกว่า \approx 3.80	มากกว่า \approx 28.83	มากกว่า \approx 27.96
เปรียบเทียบ (D) กับ (A) (%)	น้อยกว่า \approx 16.64	น้อยกว่า \approx 2.63	น้อยกว่า \approx 24.23	น้อยกว่า \approx 27.01
เปรียบเทียบ (E) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 6.54	น้อยกว่า \approx 3.21	มากกว่า \approx 15.54	มากกว่า \approx 14.69

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบสัดส่วนค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์

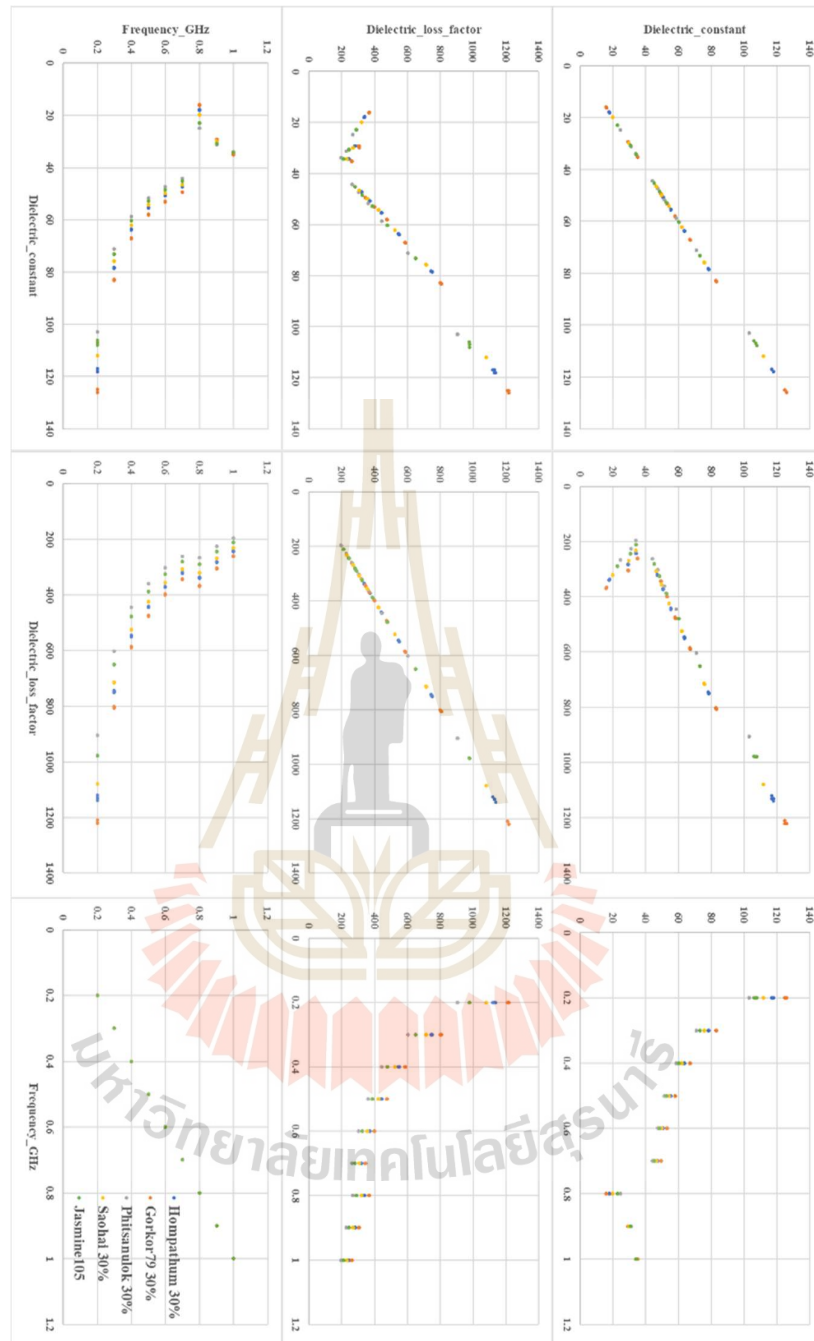
Mean \pm SD	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss factor)	
	ความถี่ (MHz)			
	200	1000	200	1000
ข้าวหอมมะลิ 105 อ้างอิง (A)	107 \pm 1.07	34.2 \pm 0.342	978 \pm 9.78	211 \pm 2.11
ปลอมปนกับข้าวหอม ปทุม (B)	131 \pm 1.31	35 \pm 0.350	1310 \pm 13.10	281 \pm 2.81
ปลอมปนกับข้าว กข 79 (C)	132 \pm 1.32	35.6 \pm 0.356	1310 \pm 13.10	280 \pm 2.80
ปลอมปนกับข้าว พิษณุโลก (D)	60.2 \pm 0.602	13.1 \pm 0.131	695 \pm 6.95	153 \pm 1.53
ปลอมปนกับข้าวเสา ไห้ (E)	119 \pm 1.19	34 \pm 0.340	1180 \pm 11.80	253 \pm 2.53
เปรียบเทียบ (B) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 22.43	มากกว่า \approx 2.34	มากกว่า \approx 33.95	มากกว่า \approx 33.18
เปรียบเทียบ (C) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 23.36	มากกว่า \approx 4.09	มากกว่า \approx 33.95	มากกว่า \approx 32.70
เปรียบเทียบ (D) กับ (A) (%)	น้อยกว่า \approx 43.74	น้อยกว่า \approx 61.7	น้อยกว่า \approx 28.94	น้อยกว่า \approx 27.49
เปรียบเทียบ (E) กับ (A) (%)	มากกว่า \approx 11.21	น้อยกว่า \approx 0.58	มากกว่า \approx 20.65	มากกว่า \approx 19.90



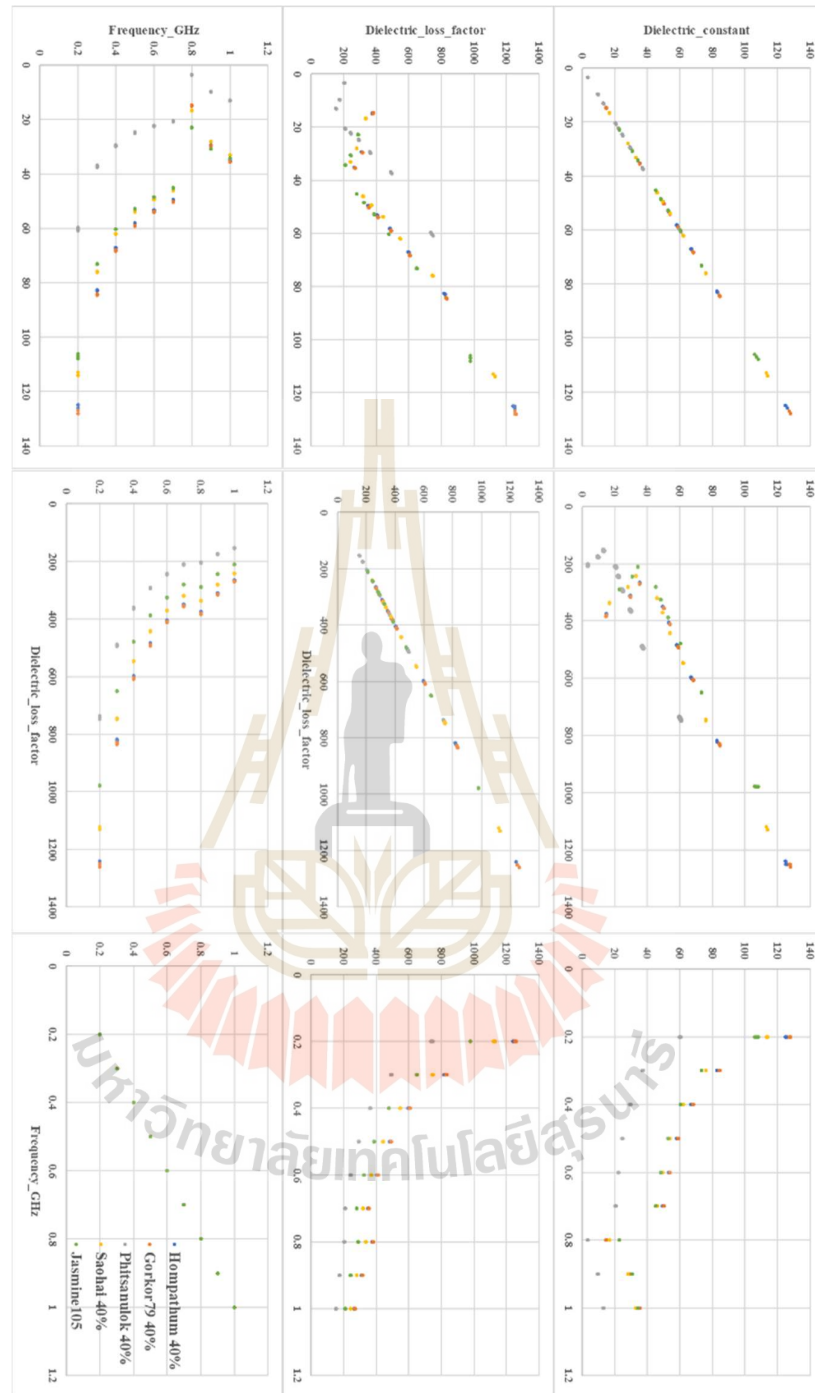
รูปที่ 4.7 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์



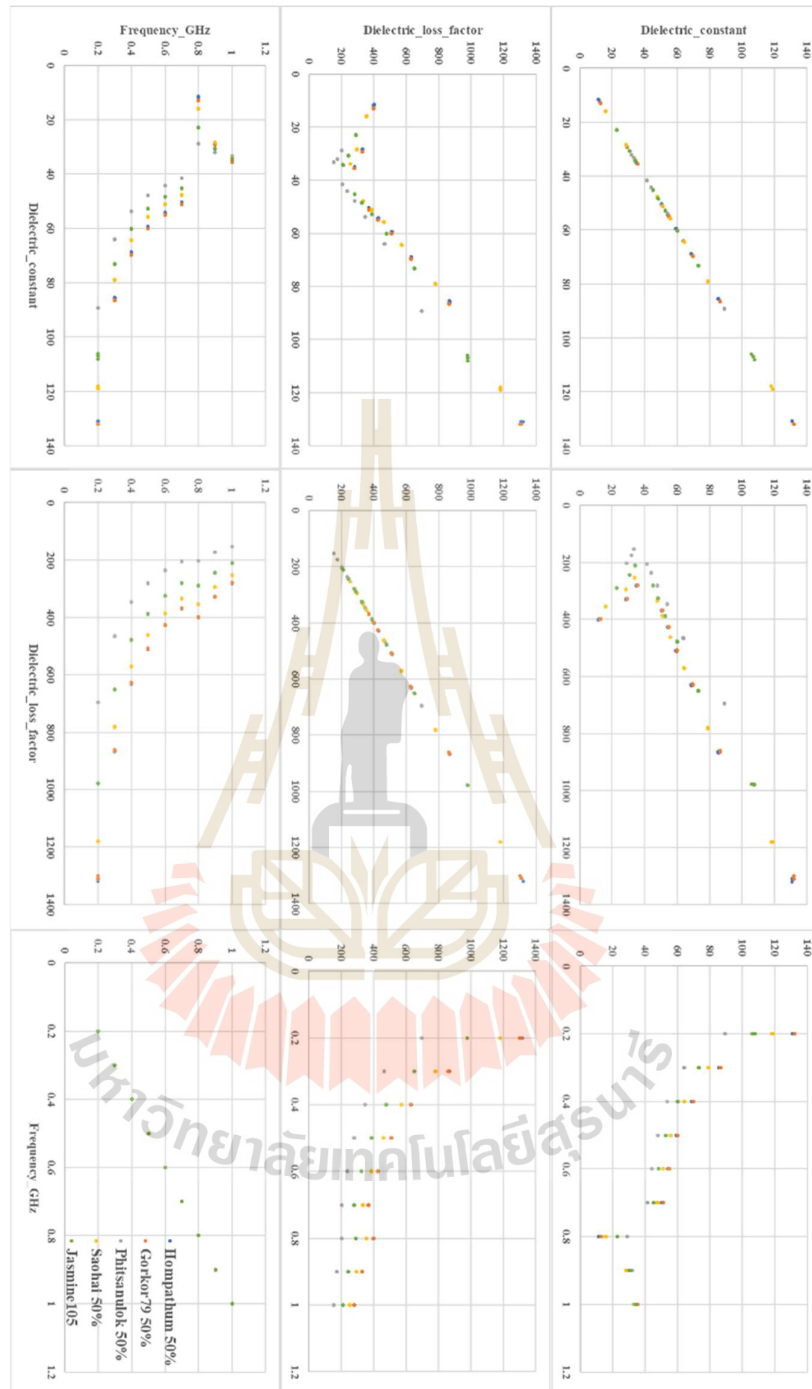
รูปที่ 4.8 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.9 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.10 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.11 กราฟ Scatter plot เปรียบเทียบแกนความถี่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 กับข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวพันธุ์อื่นในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ ส่วนแรกจะเป็นการกล่าวถึงการทดลองวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวบดละเอียดเพื่อเป็นการวิเคราะห์ดูความเป็นไปได้ถึงความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งผลของการวัดที่ได้แสดงให้เห็นว่าข้าวแต่ละสายพันธุ์จะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่ไม่เหมือนกัน ทำให้มีความแตกต่างกันของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเล็กน้อย ดังนั้นถ้าจะทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อมาเปรียบเทียบหาความแตกต่างของข้าวปลอมปนกับข้าวที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง จะต้องมีการใช้เทคนิคเพิ่มน้ำเกลือเข้าไปเพื่อให้ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของข้าวแต่ละสายพันธุ์นั้นมีความแตกต่างอย่างชัดเจนมากขึ้น และในส่วนถัดมาจึงเป็นการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวหอมมะลิ 105 เปรียบเทียบกับ ข้าวหอมมะลิ 105 ปลอมปนกับข้าวสายพันธุ์อื่น ๆ ได้แก่ ข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเสาไห้ ซึ่งได้นำมาปลอมปนในสัดส่วน 10-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะนำมาผสมกับน้ำเกลือความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ก่อนนำไปทดลองวัด ผลที่ได้จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถใช้ตรวจสอบข้าวปลอมปนได้จริงโดยความแตกต่างจะเห็นผลชัดเจนมากที่สุดถ้าเลือกวิเคราะห์ที่ความถี่ต่ำ และใช้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกในการตรวจสอบก็จะมีประสิทธิภาพมากกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งถ้ามีการปลอมปนของข้าวมากขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าต่างกันมากเข้า



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวคิดของการตรวจสอบข้าวปลอมปนซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในขณะนี้ โดยจะใช้วิธีการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนในสัดส่วนการปนที่ต่างกันแล้วเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวที่เป็นปัญหา ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้เทคนิคการเพิ่มน้ำเกลือลงไปในตัวอย่างทดลองก่อนทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อทำให้พันธะโมเลกุลน้ำเกลือเข้าไปจับพันธะโมเลกุลกับสารอาหารบางชนิดในข้าว ซึ่งในข้าวแต่ละสายพันธุ์ก็จะมีสารอาหารไม่เท่ากันทำให้พันธะโมเลกุลใหม่ที่ได้มีการเกิดโพลาริซซ์ที่ไม่เหมือนกันแล้วเกิดเป็นความแตกต่างที่วัดได้ของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยการเริ่มต้นของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เริ่มจากการศึกษาเนื้อหา ปรัชญาบรรณกรรม และความสำคัญของปัญหา แล้วจึงตั้งเป้าวัตถุประสงค์ ข้อตกลง และขอบเขตของงานวิจัยเพื่อใช้ในการจำกัดปริมาณงาน

จากการที่วิธีการตรวจสอบข้าวแบบดั้งเดิมนั้นมีประสิทธิภาพที่ไม่ค่อยดีนักดังเช่น การตรวจสอบด้วยไอโอดีน หรือใช้เครื่องคัดสี และขนาด แต่ยังมีวิธีการตรวจสอบทาง DNA ที่มีประสิทธิภาพที่สุดแต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่าย และระยะเวลา ซึ่งปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้า และทำวิจัยหาแนวทางใหม่ที่จะนำมาช่วยแก้ไขปัญหานี้อยู่หลากหลายดังเช่น การใช้ระบบ Image processing หรือการพัฒนาชุดน้ำยาไอโอดีนให้ดีขึ้น แต่ก็ยังอยู่ในระดับการทำวิจัยอยู่ ไม่ได้นำมาใช้ในทางพาณิชย์จริง ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เองก็เล็งเห็นปัญหา และความต้องการในเชิงพาณิชย์จึงได้ศึกษา และค้นคว้าวิธีการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยวิธีใหม่ที่ยังไม่ได้มีการวิจัยที่ไหนมาก่อนซึ่งก็คือการใช้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในการตรวจสอบข้าวปลอมปน โดยรายละเอียดของทฤษฎีที่ได้ศึกษา และค้นคว้าจนได้แนวทางใหม่ได้ถูกกล่าวเอาไว้ในบทที่ 2 ของของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในส่วนของการทดลองจะใช้ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นตัวทดลองหลักโดยนำข้าวที่นิยมนำมาปลอมปนที่เป็นปัญหาในประเทศไทยทั้ง 4 ชนิดมาผสมได้แก่ ข้าวหอมปทุม ข้าว กข 79 ข้าวพิษณุโลก และข้าวเสาไห้ โดยนำข้าวทั้งหมดมาบดละเอียดเพื่อให้มีสถานะเหมาะสมที่จะใช้งานกับอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริก และได้ใช้การเพิ่มน้ำเกลือเข้ามาช่วงเพิ่มประสิทธิภาพการวัดให้มากขึ้น จากผลการ

ทดลองได้ยืนยันแล้วว่าวิธีการตรวจสอบข้าวปลอมปนด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนี้สามารถทำได้จริง และมีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อความถี่ต่ำ และพิจารณาด้วยค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ และพัฒนาต่อยอดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นไปอีกหากต้องการพัฒนาเพื่อใช้งานในระดับนวัตกรรม

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนั้นจำเป็นต้องควบคุมสภาพแวดล้อมในห้องให้คงที่มากที่สุดไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความชื้น หรือคลื่นรบกวน เนื่องจากว่าสิ่งที่กล่าวมาจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจนทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัดได้ และการวัดผลควรทำให้ได้จำนวนครั้งมาก ๆ แล้วเฉลี่ย ในส่วนของข้าวที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้ใช้เพียง 4 สายพันธุ์หลัก ๆ ที่นิยมนำมาปลอมปน แต่ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้าวชนิดอื่นที่นำมาปลอมปนได้ด้วย ซึ่งถ้าหากมีผู้ต้องการนำไปพัฒนาเพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์มากขึ้นก็สามารถนำข้าวหลากหลายชนิดมาเก็บข้อมูลลงเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้พัฒนาต่อไปได้

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเป็นต้นแบบเพื่อนำไปพัฒนาทำนวัตกรรมเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ โดยค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของข้าวปลอมปนเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิงที่ต่างกันเป็นหลักร้อยละนั้นทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับหลักการของ Microwave engineering ได้หรือแม้แต่หลักการในระบบเรดาร์ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นเพียงต้นแบบที่ใช้หลักการของค่าไดอิเล็กตริกมาใช้ ทำให้นอกจากจะใช้ออกแบบระบบตรวจสอบข้าวปลอมปนที่เป็นปัญหาของประเทศไทยในปัจจุบันแล้วยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้หลักการกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่น ๆ ได้อีกด้วย



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- จรรยา แสงเขียว และ คงศักดิ์ ศรีแก้ว. (2554). ชุดตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิ. ในเอกสารการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 (หน้า 468-474). นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- Juliano, B. O. (1971). A simplified assay for milled-rice amylose. *Cereal science today.*, 16(11), 334-340.
- ศิริธร ศิริอมรพรรณ. (2548). รายงานการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์การปลอมปนของข้าวชนิดอื่นในข้าวหอมมะลิโดยใช้เทคนิคแคลปีลลารีอิเล็กโตรโพรีซีสและการยอมรับทางประสาทสัมผัส. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์, รพีพัฒน์ ลาดศรีทา และ โกเมน อาสนาทิพย์. (2557). เครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากข้าวสาร. *วารสารวิจัย* 7, 1-6.
- Bodakian, B. (1994). The dielectric properties of meat. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation.*, 1(2), 181-187.
- Trabelsi, S. (2012). Frequency and temperature dependence of dielectric properties of chicken meat. *IEEE instrumentation and measurement technology conference.*
- Nelson, S. O. (2003). Frequency and Temperature permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz. *Transactions of the ASAE.*, 46(2), 567-574.
- Nelson, S. O. (2004). Dielectric Spectroscopy for Agricultural Applications. *IEEE instrumentation and measurement technology conference.*, 752-754.
- Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *RES. AGR. ENG.*, 54(2), 104-112.
- Noh, S. H., & Nelson, S. O. (1989). Dielectric properties of rice at frequencies from 50 HZ to 12 GHZ. *Transactions of the ASAE.*, 32(3), 991-998.

- Cheng, E. M., You, K. Y., Lee, K. Y., Abbas, Z., Rahim, H. A., Khor, S. F., Zakaria, Z., & Lee, Y. S. (2017). Dielectric spectroscopy technique for carbohydrate characterization of fragrant rice, brown rice and white rice. *Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, 205-209.
- Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the ASAE*, 39, 1475-1484.
- Gadani, D. H., Rana, V. A., Bhatnagar, S. P., Prajapati, A. N., & Vyas, A. D. (2012). Effect of salinity on the dielectric properties of water. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 50, 405-410.
- Ahmed, J., Ramaswamy, H. S., & Raghavan, V. G. S. (2007). Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature. *Journal of food engineering*, 82, 351-358.
- Wongpornchai, S., Sriseadka, T., & Choonvisase S. (2003). Identification and quantitation of the rice aroma compound, 2-Acetyl-1-pyrroline, in bread flowers (*Vallisneria spiralis* L.). *J. Agric. Food Chem.*, 50(2), 457-462.
- Nelson, S. O. (1973). Electrical properties of agricultural products-a critical review. *Transactions of the ASAE*, 16(2), 384-400.
- Kaatze, U. (1989). Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature. *J. Chem. Eng. Data*, 34(4), 371-374.
- Kleawphaipan, T., Somprasong, S., Srahongthong T., & Pattanasiri, B. (2019). Thai Hom Mali rice purity test by using digital image analysis. *Journal of physics: conference series*.
- Kasap, S. O. (2006). *Principles of electronic materials and devices*. (3rd ed.). McGraw-Hill.
- กรกฏ วัฒนวิเชียร. (2007). *วัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้า*.
- Zajicek, R., Oppl, L., Vrba, J., (2008). Broadband measurement of complex permittivity using reflection method and coaxial probes. *Radioengineering*, 17(1), 14-19

ภาคผนวก
รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัดไดอิเล็กตริก และบทความที่ได้ตีพิมพ์
ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ชนิดของหัววัดไดอิเล็กตริก Keysight N1501A

ชนิดหัววัด	High temperature
ย่านความถี่ใช้งาน	200 MHz ถึง 20GHz
อุณหภูมิ	-40 ถึง 200 C
วัสดุ	ของแข็ง ผงอัดแน่น ของเหลว

ตารางที่ ก.2 ความหนาของชิ้นงานที่ควรใช้โดยประมาณเมื่อเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)

Dielectric constant	ความหนา (mm)
1	20
2	14.1421
3	11.5470
4	10
5	8.9443
6	8.1650
7	7.5593
8	7.0711
9	6.6667
10	6.3246

Dielectric constant	ความหนา (mm)
15	5.1640
20	4.4721
25	4
30	3.6515
35	3.3806
40	3.1623
45	2.9814
50	2.8284
55	2.6968
60	2.5820
65	2.4807
70	2.3905
78	2.3094
80	2.2361
90	2.1082
100	2

ภาคผนวก ข

Wasusathien, W., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C. (2020). **Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique.** Conference Proceedings of ISEIM 2020, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials.

Wasusathien, W., Thongsopa, C., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Santalunai, N. (2023). **Measurement of Dielectric Properties in Mixtures of Various Rice Cultivars for Purpose of Detecting Contamination in Industry.** Przegląd Elektrotechniczny



Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique

Wittawat Wasusathien^{1*}, Samran Santalunai¹, Thanaset Thosdeekoraphat², and Chanchai Thongsopa³

¹E-mail: samran.sa@sut.ac.th

²E-mail: thanaset@sut.ac.th

³E-mail: chan@sut.ac.th

*E-mail: wittawat_wasusathien@hotmail.com

Abstract– This paper presents the implementation of dielectric properties measurement with Saline water for classifying rice types. Open-ended coaxial probe at frequency of 20-200 MHz was applied for measuring rice properties. The rice used for this experiment included Jasmine rice 105, Hompathum rice, Chinart rice, Phitsanulok rice and Gorkor 43 rice with humidity of 8.4%, 8.2%, 8.4%, 8% and 8.4% respectively. The experiment was divided into two parts at the 25° C. The first experiment was conducted with finely ground rice. The result showed rice types cannot be classified since the dielectric properties of the rice in the experiment were very identical. The second experiment was the measurement of dielectric properties of finely ground rice mixed with saline water (water 80% : NaCl 20%) at the ratio 2:1. The results of the experiments showed that dielectric properties of rice significantly increased at low frequency. In addition, the difference could be obviously seen at the frequency of around 50 MHz, especially for the dielectric loss found in different types of rice. According to the experiment, it can be summarized that types of rice can be classified by using dielectric properties measurement along with saline water increasing techniques which can increase the dielectric constants and help blend saline water and rice well together and saline water would considerably increase dielectric loss. And then, different types of rice can be obviously identified. Consequently, both dielectric constant and dielectric loss can be used for classifying types of rice at the frequency of lower than 50 MHz. However, dielectric loss could perform better than dielectric constant for classifying types of rice.

Keywords: dielectric properties, rice dielectric, classification, rice types

I. INTRODUCTION

Dielectric properties comprise complex permittivity consisting real number (dielectric constant, ϵ') and imaginary number (dielectric loss factor, ϵ''). Dielectric constant indicates the amount of energy able to be stored by electric field and dielectric loss factor indicates the dissipation or loss of electromagnetic field in material [1-2]. Materials Dielectric properties are valuable parameters for microwave, RF (radio-frequency) and food engineering since different dielectric materials have uniquely different electrical characteristics. It has been applied in food production for many years. Therefore, dielectric properties are significantly related to electromagnetic wave [3]. Microwave and RF have been studied and applied for food processing. In the other hand, microwave and RF are used to classify the quality and type of food due the unique dielectric properties of food caused by freshness, salinity and moisture [4-7].

Rice is one of the most importantly exported products in Asia [8-10]. Thailand, Vietnam, Cambodia and Myanmar are the major Asian rice exporters. Rice can be classified into 4

types including Jasmine rice, glutinous rice, white rice and brown rice. Quantity of amylose content defines the softness of rice. With low amylose content, rice will be soft and sticky whereas rice with high amylose content will be tough and hard. In Thailand, Jasmine rice is very popular since it is soft with smooth texture and good taste that dominate the uniqueness of Thailand. Jasmine rice is a good source of carbohydrate and various kinds of vitamins.

Numbers of research works regarding dielectric measurement of agricultural products, including white rice, brown rice and unmilled rice. According to the results of the research, moisture is the main factor to define the value of dielectric constant since water has high dielectric constant [6][11] as well as temperature, mass density and homogeneous of materials [2]. In addition, the factor affecting dielectric loss is salinity [5][7] because sodium chloride (NaCl) will increase conductivity of materials. Therefore, agricultural product with dry and low salinity, such as rice, will have low dielectric properties causing the difficulty for rice dielectric measurement. There are a lot of papers investigating rice dielectric properties, such as Stuart. O. Nelson research [12-14]. Rice dielectric constant and dielectric loss factors are approximately 3-5 and 0.2-0.9 respectively depended on frequency, moisture and salinity. However, none of papers or research regarding the dielectric properties of Thai rice has been conducted. Consequently, this paper is aimed to present dielectric properties of Thai rice and classification of the types by implementing moisture and salinity increasing technique. This technique finely ground rice will be mixed with saline water (water 80% : NaCl 20%). Dielectric properties are measured using open-end coaxial technique (Keysight N1500A), therefore rice needs to be perfectly grinded in order to reduce gaps for accuracy of measurement.

For this experiment, the measurement process was conducted in a room at 25°C and the frequency ranged from 20-200 MHz. There were 5 types of rice for the experiment (Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice). Finely ground rice was used for the first experiment. The results of dielectric property measurement at the frequencies ranging between 20-200 MHz showed that dielectric constant and loss factor were about 3.8-5 and 0.35-0.6 respectively. The second measurement was conducted with finely ground rice mixed with saline water. It was found that dielectric constant and loss factor extremely increased extremely, dielectric constant and loss factor were about 40-280 and 200-2600 respectively depending on frequencies. Each type of rice has unique dielectric property. Consequently, types of rice can be classified by the difference of dielectric properties. Additionally, for each type of rice, the difference of dielectric

constant can be obviously found when the frequency is lower than 50 MHz whereas the different of dielectric loss can be found when the frequency is lower than 100 MHz.

II. THEORY

A. Open-end Coaxial Probe

In this paper, open-end coaxial line technique is applied since it is suitable for agricultural materials with wide frequency and it is easy to use. Open-end coaxial probe technique is one of the most widely used techniques for measuring dielectric properties. Coaxial probe technique is widely used for measuring dielectric properties due to its advantages including simple material preparation, high accuracy, high temperature measurement and non-destructive to material. However, gaps must be as least as possible in order to provide accuracy result of the measurement.

For this method, open-end probe and network analyzer are the main measuring tools used for examining the waves reflected from the materials contracted with the probe for processing the dielectric properties. This method consists of open-end coaxial line, vector network analyzer and software (Keysight materials measurement suit). For the measurement, Vector network analyzer will generate various frequency waves to coaxial, waves are propagated in coaxial line to material and reflected on the interface of material to coaxial line. Computer will receive the reflection waves and store the data of reflection coefficient. Then, reflection coefficient reflected on the interface of material to open-end coaxial probe will be utilized by software to calculate the receive reflection wave and convert to complex permittivity.

Coaxial probe technique is mainly advantageous for measuring dielectric properties due to simple material preparation, high accuracy and non-destructive to material, with least air gaps [15].

The thickness of the sample material is a significant factor for measuring dielectric properties. If the work piece is not thick enough, the reflection coefficient reflected from the material surface and ground floor can cause error of the measurement. The thickness of sampling material can be approximated by (1).

$$t = \frac{20}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

Where t is the sample thickness (mm)
 ϵ is the dielectric constant

B. Dielectric Properties

Dielectrics indicate the ability of each type of materials to perform as conductor. In addition, dielectrics are also the principal parameters to determine the distribution of electromagnetic wave during heating by using dielectric technique.

Dielectric properties of materials are interested in microwave engineering, especially in food application in forms of complex permittivity defining the amount of energy stored from electric field, dissipation or loss in material. Complex permittivity is represented as (2).

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2)$$

Where ϵ' is the dielectric constant
 ϵ'' is the dielectric loss factor

C. Frequency Dependence

Dielectric properties of materials significantly change by the frequency in electric fields. Polarization will be occurred at different frequencies. The molecules will be arranged in the direction of the electric field [16]. Debye developed the formula for pure polar materials as shown in (3).

$$\epsilon = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (3)$$

Where ϵ_s is the static dielectric constant
 ϵ_∞ is the dielectric constant at high frequency
 ω is the angular frequency
 τ is the relaxation time

According to formula (3), constant and imaginary numbers (loss factor) can be divided as formulas (4) and (5).

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (4)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (5)$$

D. Moisture Contents

There are factors influencing dielectric properties, including frequency, temperature, moisture and salt content. Dielectric material, just like food, is consisted of water as an important component. For agricultural materials, water is the key factor for dielectric measurement. Water is the very high dielectric material at RF and microwave frequency (dielectric constant 34-78). Therefore, dielectric property of materials increased by moisture content, and moisture content will determine energy absorption rate of RF or microwave in electric fields. For example, high water content dielectric materials, such as fruits and juice, have very high dielectric property, and low water content or dry materials, such as flour, grain and wheat, will have very low dielectric property [5-6].

E. Temperature Dependence

Temperature is one of the effective factors influencing dielectric properties of materials. When temperature increases, the relaxation time will decrease, loss factor will shift higher frequencies. Therefore, dielectric constant will increase when temperature increases as being affected by relaxation. At the same time, increasing or decreasing loss factors depends on operating frequencies which are higher or

lower than relaxation frequency. However, dielectric properties of agricultural materials may cause other mechanical effects that cause the dielectric constant to decrease when the temperature increases. In order to keep the stability, the temperature is controlled at 25°C for this experiment [6].

F. Salt Contents

Loss factor can be divided into dipole and ionic depending on RF frequencies (1-50 MHz) and microwave frequencies (0.3-300 GHz). Dipole polarization is polarization phenomenon in polar molecules of materials call dipole rotation and dipole rotation is energy-loss mechanisms. Ionic polarization is polarization phenomenon caused by relative displacements between opposite pole ions in ionic crystal. For example, increasing or decreasing of conductivity (NaCl) [5][7]. Can cause dielectric loss factor as illustrated in (6).

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \epsilon_\sigma'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (6)$$

Where ϵ_d'' is dielectric loss factor due to dipole rotation
 ϵ_σ'' is dielectric loss factor due to ionic conduction
 σ is ionic conductivity (Sm^{-1})
 ϵ_0 is free space permittivity ($8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)
 ω is angular frequency (Hz)

III. MEASUREMENT SETUP

For the preparation of measurement setup, vector network analyzer (Keysight E5071C), open-end coaxial probe and computer desktop with Keysight materials measurement suit software are used. Coaxial probe for measurement is high temperature probe kit which can be used for solid, liquid and powder materials, and measured by pressing with the surface of flat skin material. For the setup, the cable must be straight and the material interface should be flat with appropriate thickness. Fig.1 shows the measurement setup of open-end coaxial probe with the container filled with ground rice.

The calibration is conducted with air, shot probe and water with frequencies from 20-200 MHz. Calibration and measurement were conducted in a room at 25 °C. Finely ground Rice used for this measurement is classified into 5 types (Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice).

Finely ground rice will be separated into two sample groups; pure finely ground rice and rice mixed with saline water with 2:1 ratio. These were equally compressed in glass bottles and leave under room temperature for about 30 minutes in order that the materials are at the same temperature before measuring to obtain the measuring result from the same condition of temperature.



Figure 1. Measurement setup of open-end coaxial technique.

IV. MEASUREMENT RESULT

Normally, the moisture of rice available for sale in the market will specified at 8-12%. Therefore, the humidity of all types of rice used for this measurement is limited not higher than 12%. There are results obtained from measuring rice dielectric properties at RF and microwave frequency such as Stuart. O. Nelson research [13][17]. It can be seen that the at the frequency higher than 1 MHz, the dielectric properties are very similar at the humidity about 11-16%. However, at lower than 1 MHz of frequency, the dielectrics become obviously different. The humidity for this experiment was measured by grain moisture meter as shown in Table 1. At the humidity between 8.0-8.4%, the measurement results of rice dielectric properties from 20-200 MHz are represented. Therefore, there is no need to examine the humidity of rice before the measurement process since the humidity of each type of rice is very low and very similar.

TABLE I. MOISTURE DATA RECEIVE FROM GRAIN METER

Rice	Moisture
Jasmine 105	8.4%
Hompathum	8.2%
Phitsanulok	8.4%
Chinart	8.0%
Gorkor 43	8.4%

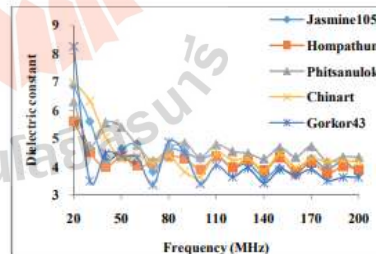


Figure 2. Dielectric constant measurement result of finely ground rice from frequencies between 20-200 MHz.

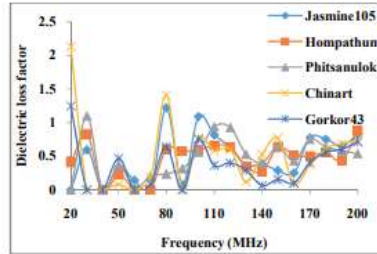


Figure 3. Dielectric loss factor measurement result of finely ground rice from frequencies between 20-200 MHz.

Fig.2 and Fig.3 illustrate the dielectric properties measurement results of 5 types of finely ground rice including Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice, at the frequencies between 20 MHz to 200 MHz. All dielectric constants for rice measurement are very similar, approximately 3.8-5. Loss factor for all types of rice is at very low rate, not exceed than 0.6, from frequencies between 20 MHz to 200 MHz. It was found that dielectric properties of rice was very low and similar to both dielectric constant and loss factor which were too dry and consisted of low sodium that it was unable to classify the types of rice. Consequently, other techniques are to be added to obtain clearer difference since most materials in this world have own unique dielectric properties but the certain technique is needed for proving. The technique used in this paper is increasing saline water technique. This technique will increase conductivity of rice higher and water will mix the rice and salt to homogeneous, because the coaxial probe technique want flat sample and homogeneously.

Fig.4 represents the dielectric constant measurement results of finely ground rice mixed with saline water with 2:1 ratio by using the same types of rice as in the previous measurement. Dielectric constant increased higher from dry rice. At the frequencies higher than 100 MHz, dielectric constant of each type of rice was about 40-70 and dielectric constant at the lower than 100 MHz began to increase extremely high. In addition, at the frequency of 20 MHz, the dielectric constant of rice was about 242-321 depending on rice types, which were different from dielectric constant at the frequencies higher than 100 MHz. However, the difference of dielectric constant of rice is clearly different at the frequencies lower than 50 MHz. Fig.5 presents the cutting of frequencies ranged from 20-50 MHz. At the frequency of 50 MHz, the dielectric constants of all rice Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice were 85.90, 84.60, 81.70, 94.90 and 90.70 respectively. The 3 types of rice including Jasmine rice 105, Hompathum and Phitsanulok were found with similar values of dielectric constants even at the 20 MHz, which were 259, 253 and 242 respectively. It can be seen that these numbers are not obviously different.

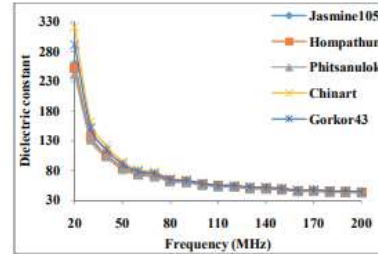


Figure 4. Dielectric constant measurement result of finely ground rice that mixed with saline water from frequencies between 20-200 MHz.

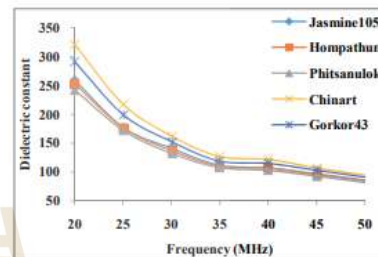


Figure 5. Dielectric constant measurement result of finely ground rice that mixed with saline water from frequencies between 20-50 MHz.

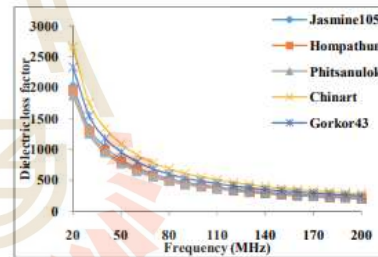


Figure 6. Dielectric loss factor measurement result of finely ground rice that mixed with saline water from frequencies between 20-200 MHz.

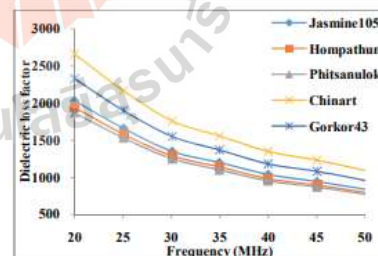


Figure 7. Dielectric loss factor measurement result of finely ground rice that mixed with saline water from frequencies between 20-50 MHz.

TABLE II. DIELECTRIC CONSTANT AT 20, 25, 30, 35, 40, 45 AND 50 MHz

Frequency (MHz) \ Type	20	25	30	35	40	45	50
Jasmine 105	259	177	141	112	107	97.1	85.9
Hompathum	253	176	137	110	107	95.7	84.6
Phitsanulok	242	172	132	108	103	93	81.7
Chinart	321	217	162	127	122	107	94.9
Gorkor 43	291	199	152	119	115	103	90.7

TABLE III. DIELECTRIC LOSS FACTOR AT 20, 25, 30, 35, 40, 45 AND 50 MHz

Frequency (MHz) \ Type	20	25	30	35	40	45	50
Jasmine 105	2030	1660	1350	1200	1040	943	838
Hompathum	1940	1580	1290	1140	982	895	796
Phitsanulok	1870	1530	1250	1100	952	869	771
Chinart	2660	2170	1760	1560	1350	1230	1090
Gorkor 43	2330	1900	1550	1370	1180	1080	957

Fig.6 illustrates the loss factor of rice sample as in Fig.4 that it extremely increases same as dielectric constant. They are very different at frequencies between 20-200 MHz and the difference began to be obviously seen at the frequencies below 100 MHz. At the frequency 100 MHz, the loss factors of Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice are about 430.92, 408.07, 396.51, 557.25 and 491.06 respectively; and this is not enough to classify the types of rice. At the frequency of 20 MHz, the loss factors are different, in thousands. Therefore, the classification of blended rice is suitable at low frequencies. If the graph is considered at frequency 50 MHz as same as dielectric constant, the loss factor of Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice are about 838, 796, 771, 1090 and 957 respectively, which are considered very different among all types of rice. Considering the graph ranging from 20-50 MHz as shown in Fig. 7, it can be seen that the dielectric properties of rice mixed with saline water will extremely increase higher and clearly different until it can classify the types of rice. According to Fig. 4 and Fig. 5, the types of rice can also be defined at the frequencies lower than 50 MHz for dielectric constant and 100 MHz for loss factor. Therefore, the dielectric loss factor for classifying the type of rice should be specified at the frequencies lower than 50 MHz since it is better than considering the dielectric constant for classification.

V. CONCLUSION

The measurement of dielectric property of rice and rice mixed with saline water over the frequencies ranged from 20 MHz to 200 MHz in a room at 25° C was conducted with 5 types of rice including Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice and Gorkor 43 rice. Dielectric constant and loss factor of rice were very low and not so different that it was hard to classify the types of rice. The dielectric constants for each of rice were 3.8-5 and loss factors for each of rice are not more than 0.6. On the other hand, the dielectric constant and loss factor of rice mixed with saline water increased higher with significant difference which is capable of classifying the types from high-level

difference of dielectric properties. The dielectric constants for each type of rice were 40-70 at the frequencies higher than 100 MHz and begun to be able to classify when the frequency became lower. The difference was obviously seen at 50 MHz. The loss factors for type of rice are 200-2600 at the frequencies between 20-200 MHz and the difference was clearly noticed at the frequencies lower than 100 MHz. Consequently, the frequencies of 50 MHz or lower are suitable for classification of rice types when considering dielectric constant together with loss factor. However, the dielectric loss factor is more effective than dielectric constant for classifying types of rice.

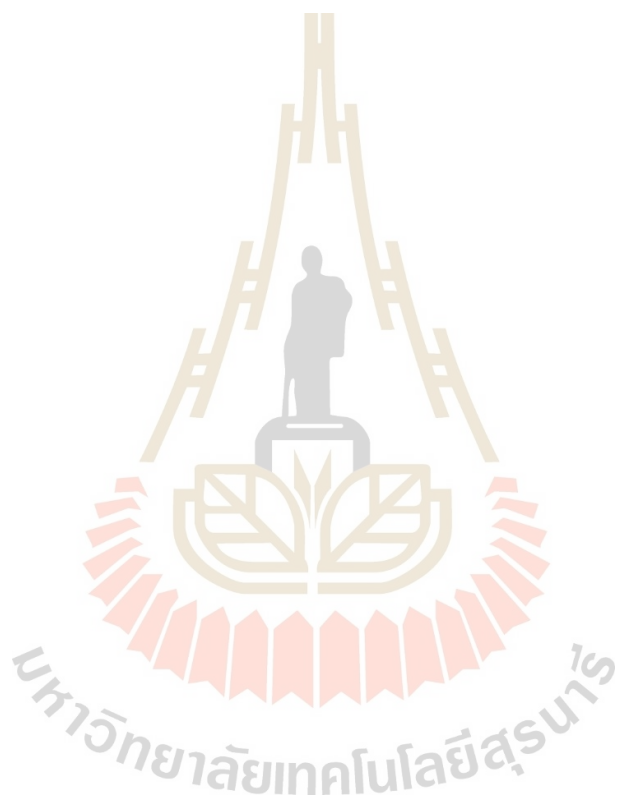
ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT).

REFERENCES

- [1] Y. Wang, T. D. Wig, J. Tang and Linnea M. Hallberg "Dielectric Properties of Foods Relevant to RF and Microwave Pasteurization and Sterilization" *Journal of Food Engineering*, 57, pp. 257-268, 2003.
- [2] X. Zhu, W. Guo, Y. Jia and F. Kang "Dielectric Properties of Raw Milk as Functions of Protein Content and Temperature" *Food Bioprocess Technol.*, pp. 670-680, 2015.
- [3] A. A. Barba and M. d'Amore "Relevance of Dielectric Properties in Microwave Assisted Processes" *INTECH*, pp. 91-118.
- [4] S. Trabelsi and S. O. Nelson "Effect of Nonequilibrium Moisture on Microwave Dielectric Properties of Wheat" *IMTC 2005 - Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 369-371, 2005.
- [5] Y. Lasne, P. Pailou, G. Ruffié, C. Serradilla, F. Demontoux, A. Freeman, T. Farr, K. McDonald, B. Chapman and J. M. Malczieux "Effect of Salinity on The Dielectric Properties of Geological Materials : Implication For Soil moisture detection By Means Of Remote Sensing" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers., 46 (6), pp.1674-1688, 2008.
- [6] W. Guo, G. Tiwarib, J. Tangb and S. Wang "Frequency, Moisture and Temperature-dependent Dielectric Properties of Chickpea Flour" *bio systems engineering IOL*, pp. 217-224, 2008.
- [7] D. H. Gadani, V. A. Rana, S. P. Bhatnagar, A. N. Prajapati and A. D. Vyas "Effect of Salinity on The Dielectric Properties of Water" *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, Vol. 50, pp. 405-410, June 2012.
- [8] T. Auksomsria, J. Tangb, Z. Tangb, H. Linb and S. Songsermpong "Dielectric Properties of Rice Model Food Systems Relevant to Microwave Sterilization Process" *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, pp. 98-105, 2018.
- [9] W. Srichamrong, P. Thiyajai and S. Charoenkiatkul "Conventional steaming retains tocotols and γ -oryzanol better than boiling and frying in the jasmine rice variety Khao Dok Mali 105". *Food Chemistry*, 191, pp. 113-119, 2016.
- [10] P. Leelayuthsoontom and A. Thipayarat "Textural and Morphological Changes of Jasmine Rice under Various Elevated Cooking Conditions". *Food Chemistry*, 96, pp. 606-613, 2006.
- [11] A. P. Gregory and R. N. Clarke "A Review of RF and Microwave Techniques for Dielectric Measurements on Polar Liquids" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, pp. 727-743, 2006.
- [12] S. O. Nelson "Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications" *RES. AGR. ENG.*, pp. 104-112, 2008.
- [13] S. O. Nelson "Dielectric Properties of Agricultural Products" *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26 No. 5, pp. 845-869, October 1991.
- [14] S. O. Nelson and S. Trabelsi "Factors Influencing the Dielectric Properties of Agricultural and Food Products" *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 46 (2), pp. 93-107, 2012.
- [15] B. O. Riera "Permittivity Measurements using Coaxial Probes" A Degree Thesis Submitted to the Faculty of the Escola Técnica

-
- d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya., May 2016.
- [16] P. Debye " Polar Molecules" The Chemical Catalog Co., New York, 1929.
- [17] S. H. Noh and S. O. Nelson "Dielectric Properties of Rice at Frequencies from 50 HZ to 12 GHZ" Transactions of the ASAE Vol.32, No. 3 pp. 991-998. 1989.



ประวัติผู้เขียน

นายวิทวัส วสุเสถียร เกิดเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2555 และ พ.ศ. 2558 ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต เมื่อ พ.ศ. 2561 สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาเอก ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ โดยในปี พ.ศ. 2563 มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 1 ฉบับในงานการประชุมวิชาการนานาชาติ 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020) จัดโดย Waseda University, Tokyo, Japan ในหัวข้อ “Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique” และในปี พ.ศ. 2566 กำลังอยู่ระหว่างรอการตีพิมพ์อีก 1 ฉบับ ซึ่งเป็นวารสารนานาชาติ Przeglad Elektrotechniczny ในหัวข้อ “Measurement of Dielectric Properties in Mixtures of Various Rice Cultivars for Purpose of Detecting Contamination in Industry”