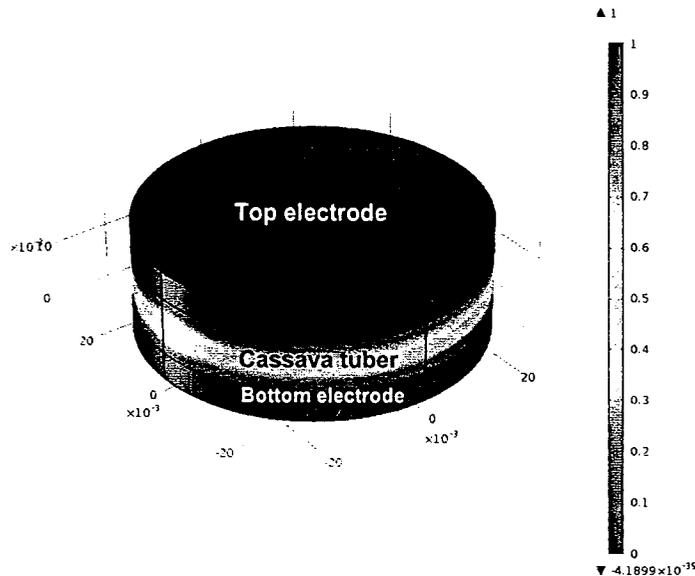


บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 ออกแบบโพรบ

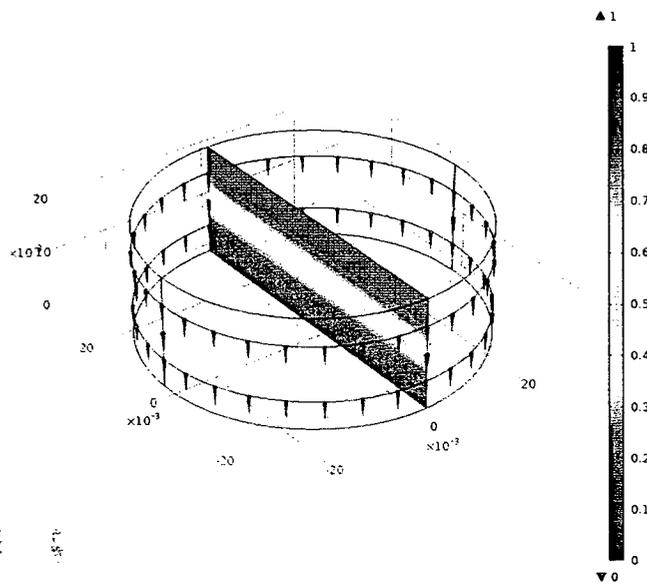
โพรบแบบแผ่นขนานวงกลม

โพรบแบบแผ่นขนานวงกลมใช้ลুমินีเยมเป็นวัสดุในการออกแบบ โดยมีความหนาเท่ากับ 1 เซนติเมตร และ 0.5 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของ Parallel Circle plate แบบ 2 ชั้น

จากการจำลองด้วยกระบวนการไฟลีนเอลิเมนต์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 1 V ให้กับอิเล็กโทรดด้านบนที่คั่นด้วยน้ำมันสำปะหลัง ซึ่งกำหนดให้มีค่าสภาพความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) เท่ากับ 1 mS/m สนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายจากอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยแถบสีจะแสดงถึงระดับของศักย์ไฟฟ้าจากมาก (สีแดง) ไปหาน้อย (สีน้ำเงิน) โดยทิศทางของสนามไฟฟ้าจะพุ่งจากอิเล็กโทรดด้านบนไปยังอิเล็กโทรดด้านล่างโดยจะเห็นได้จากลูกศรที่แสดงในภาพที่ 4.2 เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้า ความหนา และรัศมีของหัวมันสำปะหลังจะพบว่าความต้านทานจะแปรผันตรงกับความหนา และจะแปรผกผันกับรัศมีของหัวมันสำปะหลัง ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และ 4.4



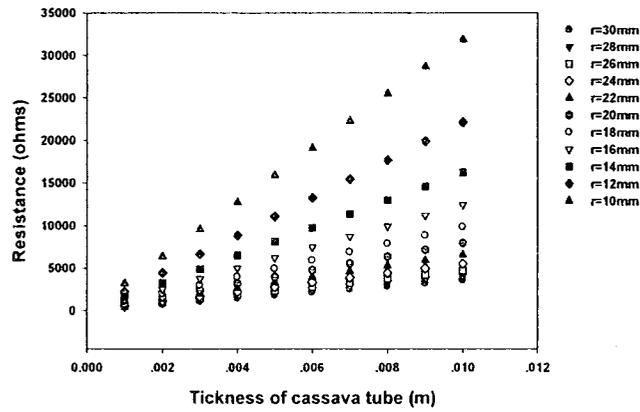
ภาพที่ 4.2 ทิศทางของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างแบบแผ่นขนานกลม

เมื่อความหนาของหัวมันสำปะหลังสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานรวมของหัวมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น และในทางกลับกันเมื่อรัศมีของหัวมันสำปะหลังมีขนาดที่ยาวขึ้นก็จะทำให้ความต้านทานรวมของหัวมันสำปะหลังมีค่าลดลง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้จากสมการต่อไปนี้

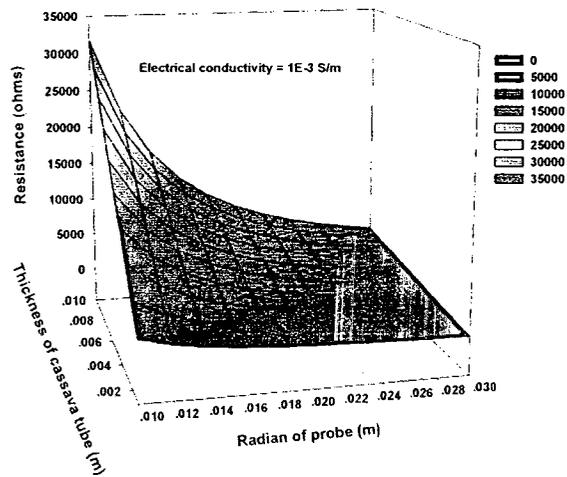
$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (4.1)$$

เมื่อ	R	คือค่าความต้านทาน (Ω)
	ρ	คือ สภาพความต้านทาน ($\Omega \cdot m$)
	L	คือความหนาของหัวมันสำปะหลังที่ทดสอบ (m)
	A	คือพื้นที่หน้าตัดของหัวมันสำปะหลังที่ทดสอบ (m^2)

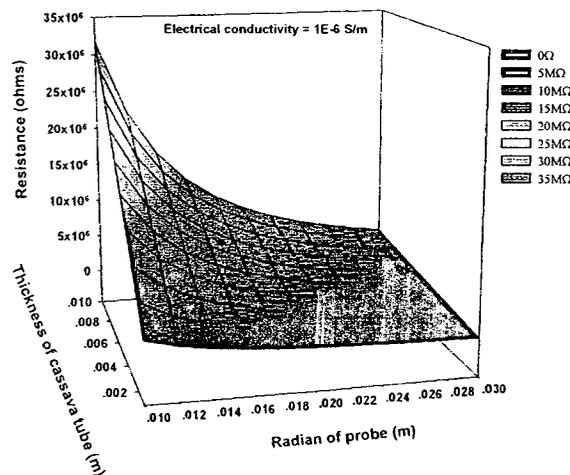
จากสมการจะเห็นได้ว่าความต้านทานแปรผันตรงกับความหนาของหัวมันสำปะหลัง และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของหัวมันสำปะหลัง ดังแสดงในภาพที่ 4.3 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปแบบสามมิติจะพบว่ายิ่งหัวมันสำปะหลังมีความหนามากและมีรัศมีน้อยหรือหัวมันสำปะหลังมีขนาดเล็กและยาวจะยังมีความต้านทานมาก นอกจากนั้นถ้าหัวมันสำปะหลังมีสภาพความต้านทานมาก หรือมีความชื้นต่ำจะยังทำให้ความต้านทานรวมมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วยดังจะเป็นได้จากภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของหัวมันสำปะหลังกับความหนาและรัศมีของหัว



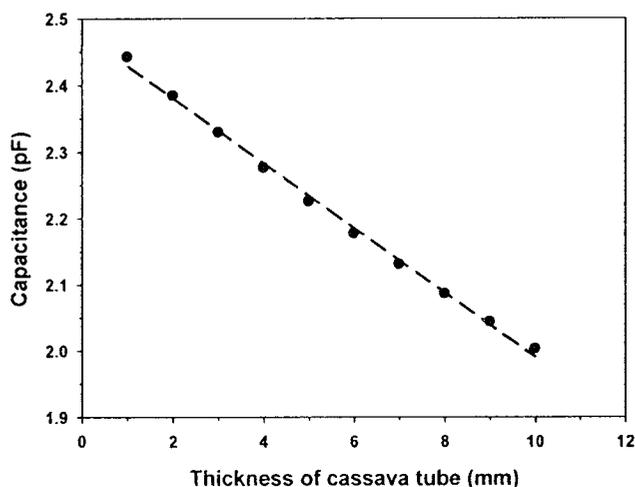
(ก)



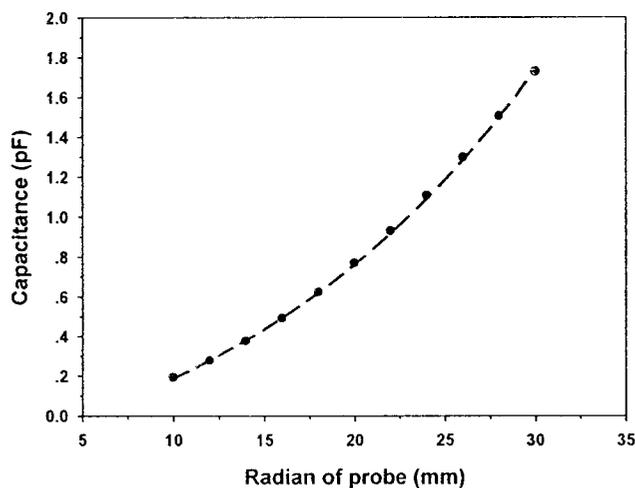
(ข)

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของหัวมันสำปะหลังกับความหนาและรัศมีของหัวมันสำปะหลังในรูปแบบสามมิติ (ก) สภาพความนำไฟฟ้า 1 mS/m (ข) สภาพความนำไฟฟ้า 1 μ S/m

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของหัวมันสำปะหลังกับค่าความจุไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าคงที่พบว่าเมื่อมันสำปะหลังหนามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลงในลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 4.5 และในขณะเดียวกันเมื่อรัศมีของหัวมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแบบแผ่นขนานวงกลมเมื่อกำหนดให้ Dielectric constant เท่ากับ 4 และค่าสภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m

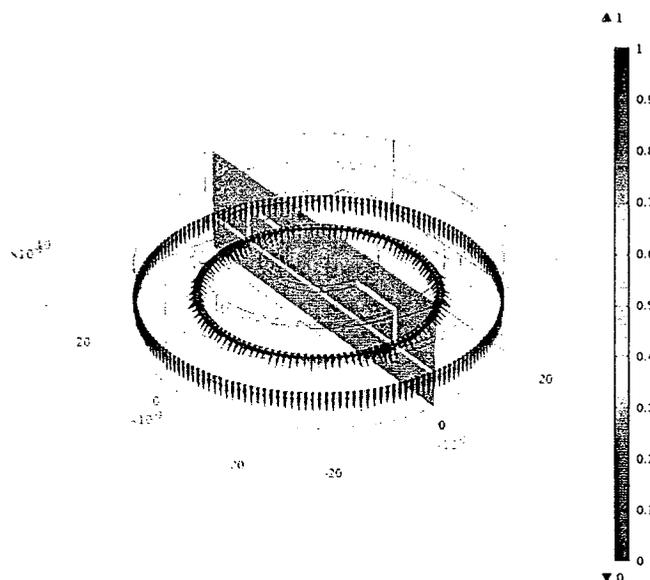


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีกับค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแบบแผ่นขนานวงกลมเมื่อกำหนดให้ Dielectric constant เท่ากับ 4 และค่าสภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m

โพรบแบบแผ่นขนานวงแหวน

จากการศึกษาโพรบแบบแผ่นขนานวงแหวน พบว่ามีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับโพรบแบบขนานวงกลม แต่จะมีลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันเล็กน้อยบริเวณช่องว่างของวงแหวน โดยโครงสร้างแบบแผ่นขนานวงแหวนจะมีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่หนาแน่นบริเวณวงแหวนซึ่งเป็น

ช่องว่างของโพรบ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และโครงสร้างแบบแผ่นขนานวงแหวนนี้จะมีปริมาณ Fringing field น้อยกว่าโครงสร้างแบบแผ่นขนานวงกลม

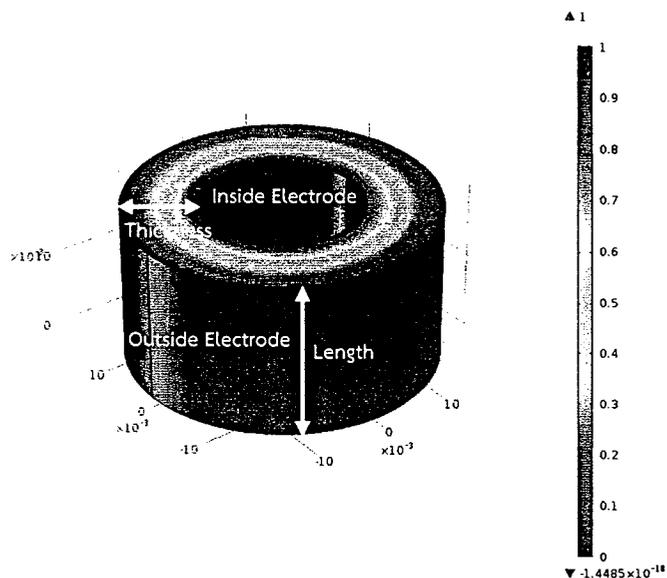


ภาพที่ 4.7 ทิศทางของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างแบบแผ่นขนานวงแหวน

โพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลม

โพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลมใช้ลুমินีเยมเป็นวัสดุในการออกแบบ โดยมีความหนาเท่ากับ

- 1 มิลลิเมตร ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในโพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลม ชนิด 2 ขั้ว ที่ศึกษาและพัฒนาแสดงดังภาพที่ 4.8

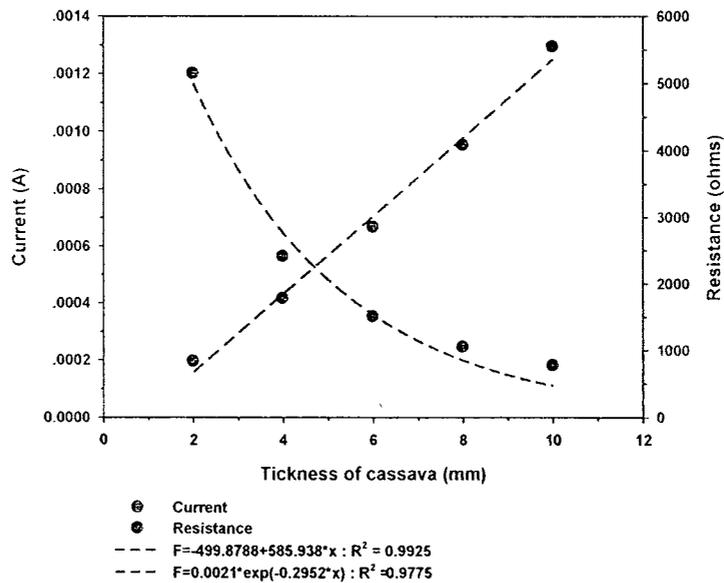


ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลม ชนิด 2 ขั้ว

จากภาพที่ 4.8 กำหนดให้โพรบมีความสูง 2 เซนติเมตร รัศมีด้านนอกวัดจากจุดศูนย์กลางเท่ากับ 2.8 เซนติเมตร รัศมีด้านในเท่ากับ 2.2 เซนติเมตร และความหนาของฉนวนสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 6 มิลลิเมตร

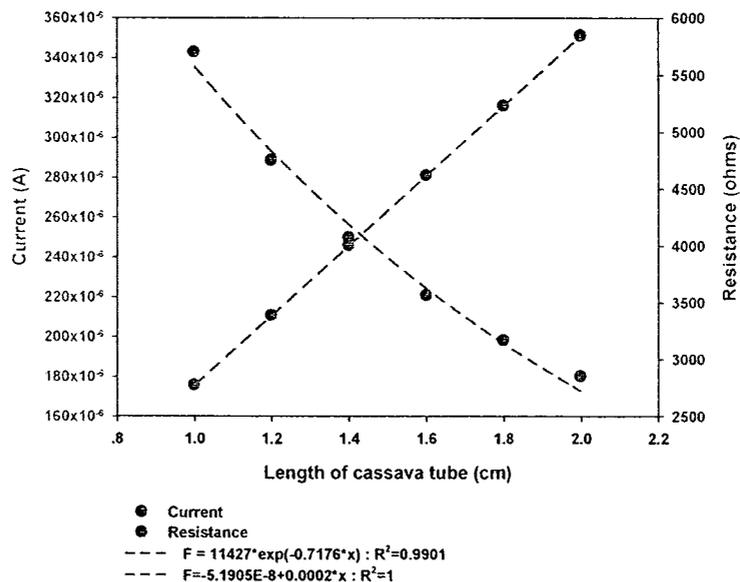
จากการจำลองด้วยกระบวนการไฟล์ในเอลิเมนแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 V ให้กับอิเล็กทรอนิกส์ที่คั่นด้วยเนื้อฉนวนสำปะหลัง ซึ่งกำหนดให้มีค่าสภาพความนำไฟฟ้า เท่ากับ

1 mS/m สนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายจากอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำ และจะมีระดับความเข้มข้นน้อยไปเรื่อยๆ จากจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง (สีแดง) ไหลลงไปที่จุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ (สีน้ำเงิน) ซึ่งอยู่อีกฝั่งหนึ่งของอิเล็กโทรดดังแสดงในภาพที่ 4.8 โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และความหนาของมันสำปะหลังที่ทดสอบโดยใช้โพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลม แสดงได้ดังภาพที่ 4.9



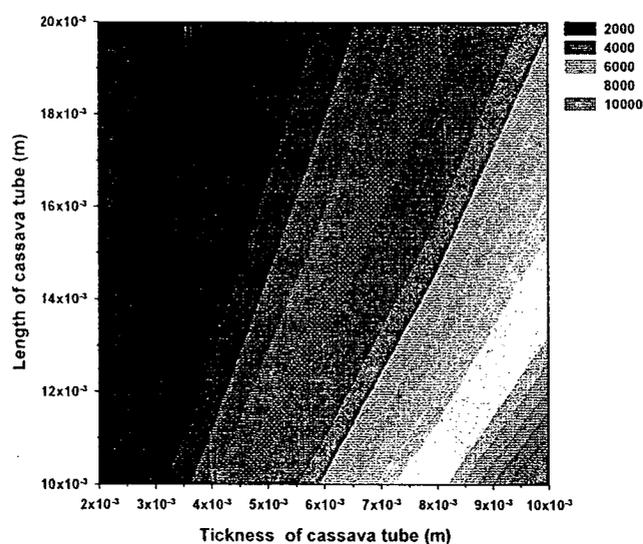
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของมันสำปะหลัง กับกระแสไฟฟ้าและความต้านทาน (กำหนดให้โพรบมีความยาวเท่ากับ 2 เซนติเมตร)

เมื่อพิจารณารูปในภาพที่ 4.9 จะพบว่าเมื่อมันสำปะหลังมีความหนามากขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงแบบเอกโพเนนเชียล

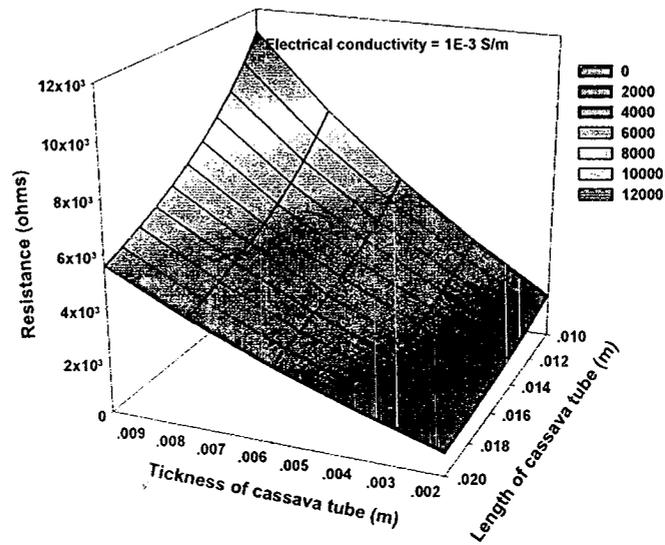


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของหัวมันสำปะหลัง กระแสไฟฟ้า และความต้านทาน (เมื่อกำหนดให้มันสำปะหลังมีความหนาเท่ากับ 6 มิลลิเมตร)

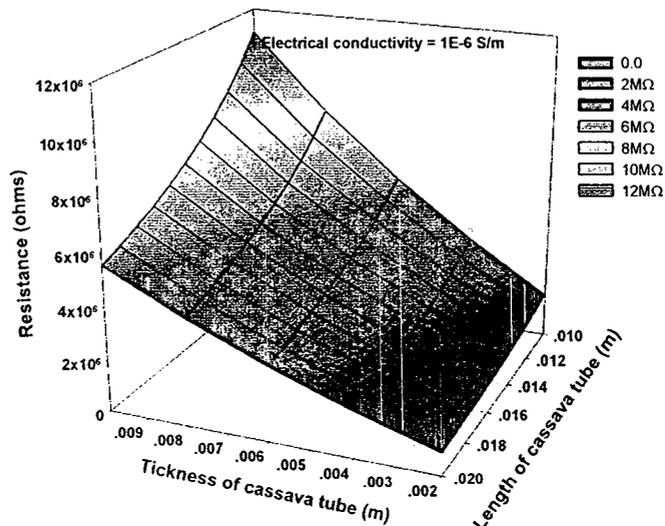
เมื่อพิจารณากราฟในภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าความยาวของหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของหัวมันสำปะหลัง ซึ่งจะมีค่าลดลงแบบเอกโพเนนเชียล ในขณะที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ง่ายขึ้น โดยมีอัตราการเพิ่มเป็นแบบเชิงเส้น เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ระหว่างความหนา ความยาว และความต้านทานไฟฟ้าของหัวมันสำปะหลังในรูปแบบ contour ดังแสดงในภาพที่ 4.11 จะพบว่าความต้านทานจะมีค่าสูงที่มุมล่างขวาของกราฟ นั้นแสดงว่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น และความต้านทานจะเพิ่มขึ้นไปอีกเมื่อความยาวของหัวมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดสั้นลง ทั้งนี้เพราะเมื่อความยาวของหัวมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดสั้นลงจะส่งผลให้พื้นที่ในการวัดของหัวมันสำปะหลังมีค่าลดลง ส่งผลให้ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4.1 อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการจำลองดังกล่าวยังไม่ได้ออกถึงผลกระทบของน้ำที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของหัวมันสำปะหลัง แต่เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการออกแบบผู้วิจัยจึงกำหนดให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ สำหรับภาพที่ 4.12 เป็นการขยายข้อมูลจากภาพที่ 4.11 ให้เห็นองค์ประกอบของกราฟเพิ่มมากขึ้นโดยเพิ่มมิติที่สามของภาพขึ้น ดังภาพที่ 4.12 (ก) กำหนดให้สภาพความนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 mS/m และภาพที่ 4.12 (ข) กำหนดให้สภาพความนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1 \text{ }\mu\text{S/m}$.



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของหัวมันสำปะหลัง และความหนาของหัวมันสำปะหลังที่มีต่อความต้านทาน (เมื่อกำหนดให้สภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m)



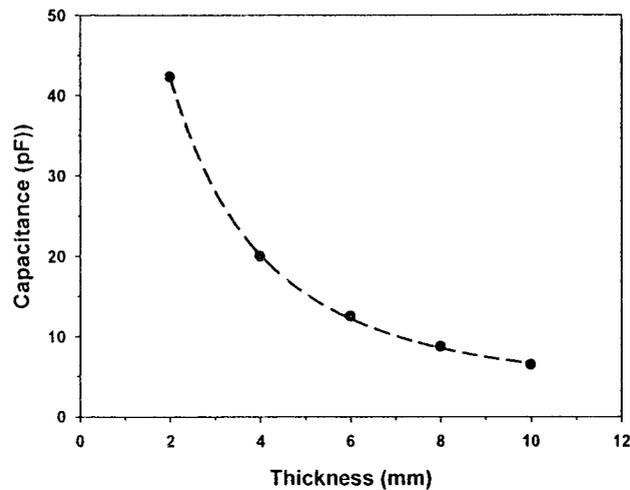
(ก)



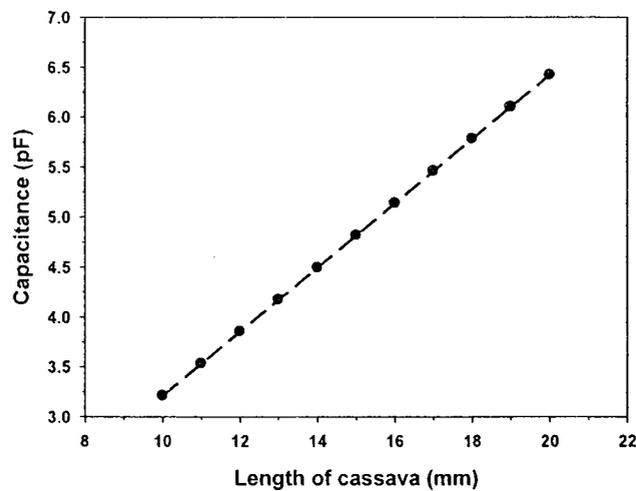
(ข)

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของหัวมันสำปะหลัง และความหนาของมันสำปะหลังที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้า (3 มิติ) (ก) สภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m (ข) สภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ $1 \text{ } \mu\text{S/m}$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของหัวมันสำปะหลังกับค่าความจุไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าคงที่พบว่าเมื่อมันสำปะหลังหนาขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟาลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลดังแสดงในภาพที่ 4.13 และในขณะเดียวกันเมื่อความยาวของมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นในลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลมเมื่อกำหนดให้ Dielectric constant เท่ากับ 4 และค่าสภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกับความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแบบแผ่นขนานทรงกระบอกกลมเมื่อกำหนดให้ Dielectric constant เท่ากับ 4 และค่าสภาพความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m

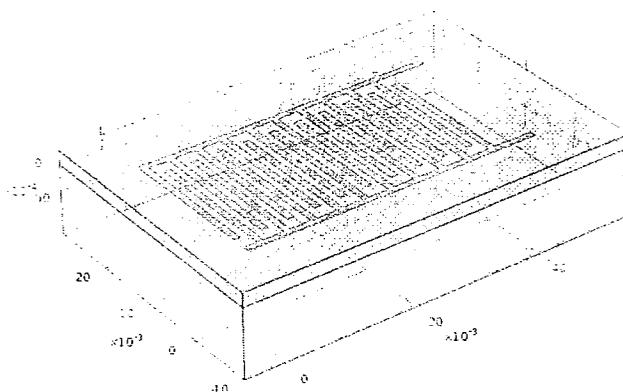
โพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

จากการศึกษาโพรบแบบแผ่นขนานทรงกระบอกสี่เหลี่ยม พบว่ามีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับโพรบแบบทรงกระบอกกลม

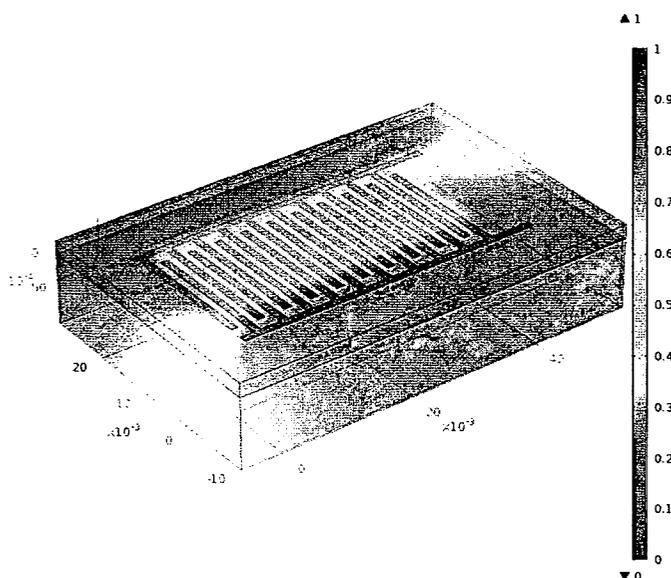
โพรบแบบอินเตอร์ดิจิตอล

จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัวมันสำปะหลังแห้งในเบื้องต้นพบว่าหัวมันสำปะหลังแห้งมีค่า Dielectric constant ประมาณ 3.5 – 5 ดังนั้นการออกแบบโพรบแบบอินเตอร์ดิจิตอล ในเบื้องต้นผู้วิจัยจะเริ่มทดสอบโดยกำหนดให้ Dielectric constant ของหัวมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 4 และกำหนดให้สภาพ

ความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 mS/m เป็นค่าเริ่มต้นของการศึกษา โครงสร้างของโพรบแบบอินเทอร์ดิจิตอลแสดงได้ดังภาพที่ 4.15

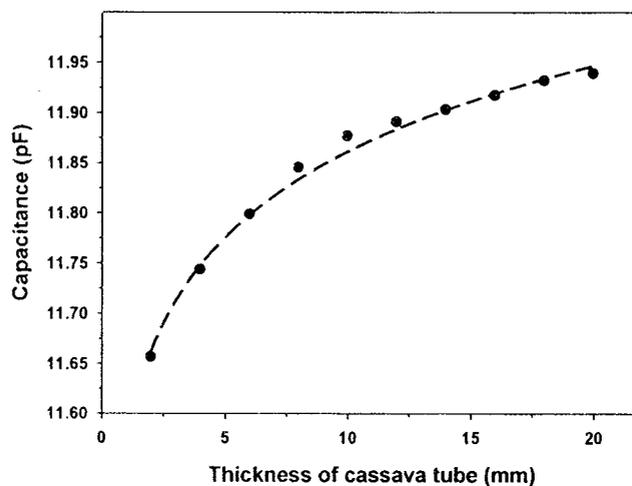


ภาพที่ 4.15 โครงสร้างโพรบแบบอินเทอร์ดิจิตอล



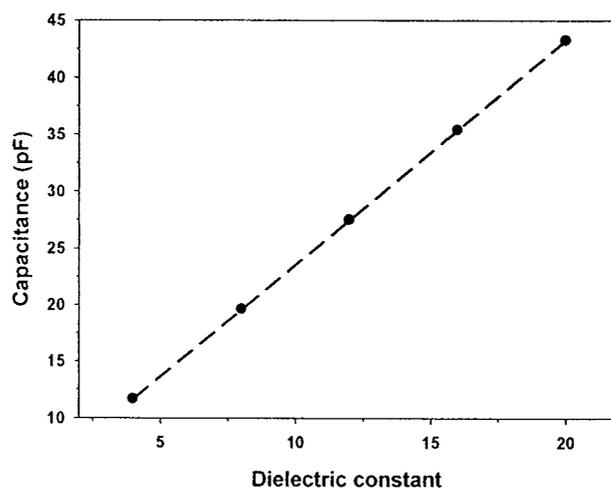
ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโพรบแบบอินเทอร์ดิจิตอล
โพรบแบบอินเทอร์ดิจิตอล

ภาพที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างของโพรบแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่มีมันสำปะหลังแปะติดอยู่ด้านบน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าแผ่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง (สีแดง) ไปยังขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ (สีน้ำเงิน) โดยจะมีเส้นสนามไฟฟ้าพุ่งคล่องผ่านบริเวณที่เป็นหัวมันสำปะหลังไปมาระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งไม่ได้แสดงให้เห็นในรูป



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของหัวมันสำปะหลังกับค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิตอล เมื่อกำหนดให้ Dielectric constant เท่ากับ 4

จากภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าความหนาของหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดโดยใช้โพรบแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นไปเรื่อยค่าความจุไฟฟ้าจะเริ่มคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 11 pF – 12 pF ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก นั้นแสดงให้เห็นว่าความหนาของหัวมันสำปะหลังที่วัดโดยใช้โพรบแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีผลต่อค่าความจุน้อยกว่าโพรบในลักษณะต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

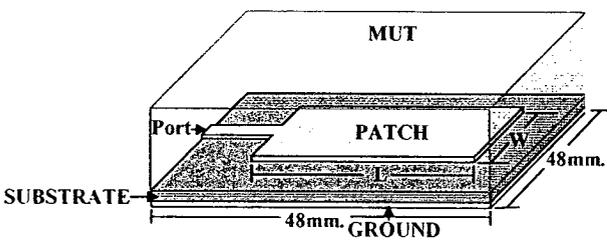


ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิตอล เมื่อกำหนดให้มันสำปะหลังมีความหนาเท่ากับ 6 มิลลิเมตร

เมื่อความหนาของมันสำปะหลังมีค่าคงที่ จะพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของหัวมันสำปะหลังที่เปลี่ยนไปในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในภาพที่ 4.18 แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการจำลองในครั้งนี้ไม่ได้นำผลของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นภายในระบบมาคิดด้วย จึงทำให้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาได้เพียงแค่อุณหภูมิเท่านั้น

โพรบแบบแผ่นไมโครสตริป

โครงสร้างและขนาดของโพรบแบบแผ่นไมโครสตริปแสดงได้ดังภาพที่ 4.19 สร้างมาจากแผ่นปรีนวงจรรูปสองหน้าที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 2.2 (DiClad 880) แผ่นฐานหนา 1.6 มิลลิเมตร ออกแบบให้สายนำสัญญาณ (feed line) มีค่าความต้านทานเท่ากับ 50 โอห์ม วางอยู่ตรงกลางของโครงสร้าง โดยสายนำสัญญาณนี้จะเชื่อมต่อกับแผ่นแผ่นสี่เหลี่ยม (patch) ขนาด 40 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร มีความถี่กำหนด (f_0) ที่ 2.4 GHz โดยคำนวณมาจากสมการที่ 4.2 - 4.4



ภาพที่ 4.19 โครงสร้างโพรบแบบไมโครสตริปสี่เหลี่ยม

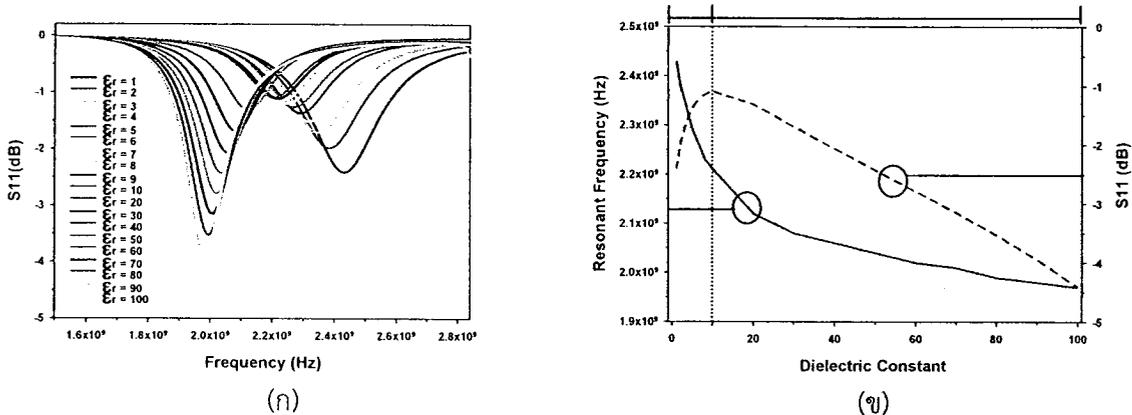
$$W = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (4.2)$$

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_c}} - 2\Delta L \quad (4.3)$$

$$\Delta L = 0.412t \frac{(\epsilon_c + 0.3)\left(\frac{W}{t} + 0.264\right)}{(\epsilon_c - 0.258)\left(\frac{W}{t} + 0.8\right)} \quad (4.4)$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{t}{W}}} \quad (4.5)$$

เมื่อนำวัสดุทดสอบ (MUT) ซึ่งไม่ใช่อากาศวางไว้ด้านบนของแผ่นแผ่นสี่เหลี่ยมของโพรบ จะพบว่าขนาดและความถี่กำหนดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อทำการปรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุทดสอบจาก 1 - 100 จะพบว่าขนาดและความถี่กำหนดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในภาพที่ 4.20 (ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลกระทบของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่ได้มีแค่เพียงต่อขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านหากแต่ส่งผลกระทบต่อความถี่กำหนดของสัญญาณด้วย



ภาพที่ 4.20 การตอบสนองต่อความถี่กับ (ก) ขนาด S_{11} และ (ข) ขนาด S_{11} และความถี่กำหนดที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่าง ๆ

ภาพที่ 4.20 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กำหนด (เส้นสีแดง) และขนาด S_{11} (เส้นสีน้ำเงิน) ที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นจะทำ

ให้ความถี่ก่าทอนลดลง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าไดอิเล็กทริกจะทำให้ขนาด S_{11} เพิ่มขึ้นและลดลง โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 10 จะเป็นค่าที่ทำให้ขนาด S_{11} มีค่าสูงสุดเมื่อทำการวัดโดยใช้โพรบแบบไมโครสตริป และเมื่อนำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ก่าทอนมาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4.21

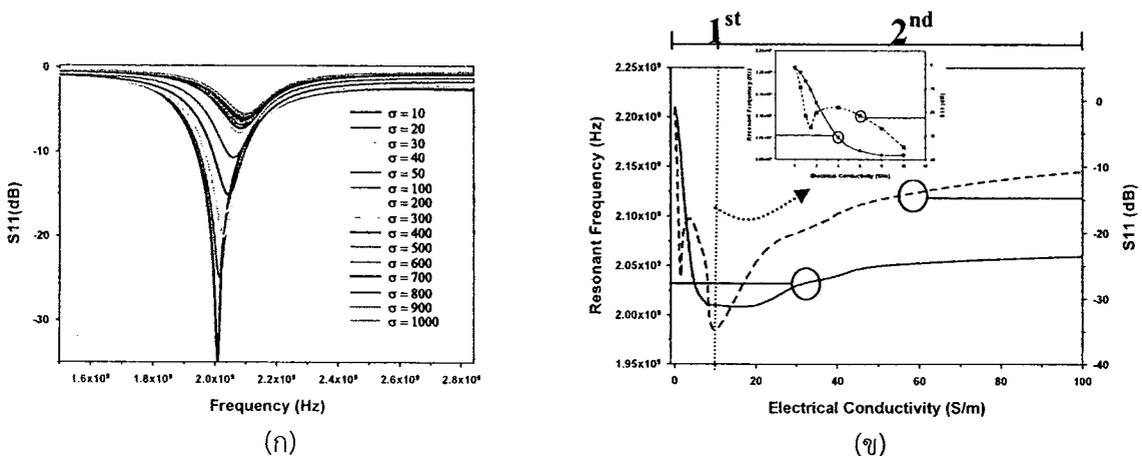
$$\text{Resonant frequency } (f_0) = -1 \times 10^8 \ln(\epsilon_r) + 2 \times 10^9 \tag{4.6}$$

สมการข้างต้นสามารถนำไปใช้ในการวัดและคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุโดยอาศัยความถี่ก่าทอนได้ โดยอาศัยโพรบแบบไมโครสตริป นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับขนาด S_{11} ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.7 - 4.8

$$\text{Magnitude of } S_{11} \text{ (dB)} = 0.593 \ln(\epsilon_r) - 2.374 \quad (1 \leq \epsilon_r \leq 10) \quad 1^{\text{st}} \text{ part} \tag{4.7}$$

$$\text{Magnitude of } S_{11} \text{ (dB)} = -0.038 \epsilon_r - 0.536 \quad (10 < \epsilon_r \leq 100) \quad 2^{\text{nd}} \text{ part} \tag{4.8}$$

ผลของสภาพนำไฟฟ้าที่มีต่อวัสดุทดสอบเมื่อทำการวัดโดยใช้โพรบแบบไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.16 โดยในการศึกษากำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าคงที่อยู่ที่ 10 และปรับค่าสภาพนำไฟฟ้าจาก 0 ถึง 1000 S/cm จากกราฟแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุทดสอบเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ความถี่ก่าทอนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังจะเห็นได้จากกราฟในภาพที่ 4.16 (ก)



ภาพที่ 4.21 การตอบสนองต่อความถี่ (ก) ขนาด S_{11} และ (ข) ขนาด S_{11} และความถี่ก่าทอนที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าต่าง ๆ

ภาพที่ 4.21 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ก่าทอน (เส้นสีแดง) และขนาด S_{11} (เส้นสีน้ำเงิน) ที่มีต่อค่าสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ กราฟเล็กที่ซ้อนอยู่เป็นการขยายเส้นกราฟในช่วงที่ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า 10 เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงที่ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า 10 ความถี่ก่าทอนจะมีค่าลดลงเมื่อค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และจะค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า 10 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่ก่าทอนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.9 และ 4.10

$$\text{Resonant frequency} = 3 \times 10^6 \sigma^2 - 5 \times 10^7 \sigma + 2 \times 10^9 \quad (1 \leq \sigma \leq 10) \quad 1^{\text{st}} \text{ part} \tag{4.9}$$

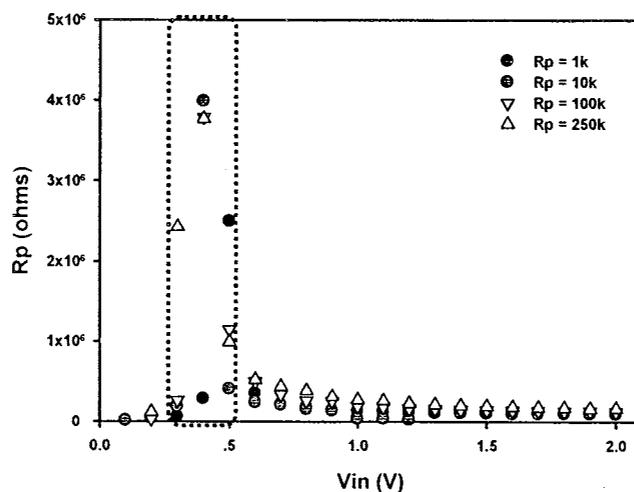
$$\text{Resonant frequency} = 2 \times 10^7 \ln(\sigma) + 2 \times 10^9 \quad (10 < \sigma \leq 1000) \quad 2^{\text{nd}} \text{ part} \quad (4.10)$$

ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับขนาด S_{11} ที่แสดงในภาพที่ 4.16 (ข) นั้นเป็นความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างยากในการหาสมการที่เหมาะสมเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟจะพบว่าเมื่อค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 10 ขนาด S_{11} จะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล

จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถแบ่งหัวโพรบออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มแผ่นขนานแบนราบ กลุ่มแผ่นขนานทรงกระบอก และกลุ่มพลาเนา โดยโครงสร้างของหัวโพรบที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีลักษณะคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เช่น แผ่นขนานกลมจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแผ่นขนานวงแหวน และแผ่นขนานทรงกระบอกกลมจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแผ่นขนานทรงกระบอกสี่เหลี่ยม เป็นต้น สำหรับโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิตอลกับแบบไมโครสตริป ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อยู่ในกลุ่มพลาเนา นับว่าเป็นโครงสร้างที่น่าสนใจ เพราะสามารถออกแบบง่าย ต้นทุนต่ำ สามารถสร้างให้ขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร และมีความยืดหยุ่นสามารถสร้างในรูปแบบที่หลากหลายได้ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยลักษณะสัณฐานของหัวมันสำปะหลังที่เป็นทรงกระบอกแข็ง และมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้วิจัยเลือกที่จะทำการศึกษาและสร้างโพรบเพื่อใช้ในการทดสอบจากความง่ายและความสะดวกในการควบคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เป็นหลัก นั่นก็เป็นเหตุผลที่ผู้วิจัยเลือกที่จะสร้างโพรบแบบแผ่นขนานวงกลมสำหรับใช้ทดสอบในครั้งนี้

4.2 ออกแบบวงจรและระบบวัด

การหาค่าความต้านทานโหลด ขนาดสัญญาณอินพุต และความถี่ที่เหมาะสมสำหรับวงจรและระบบวัดเป็นเงื่อนไขแรกที่ได้ทำการศึกษา โดยผลของความต้านทานโหลดแสดงได้ดังภาพที่ 4.17

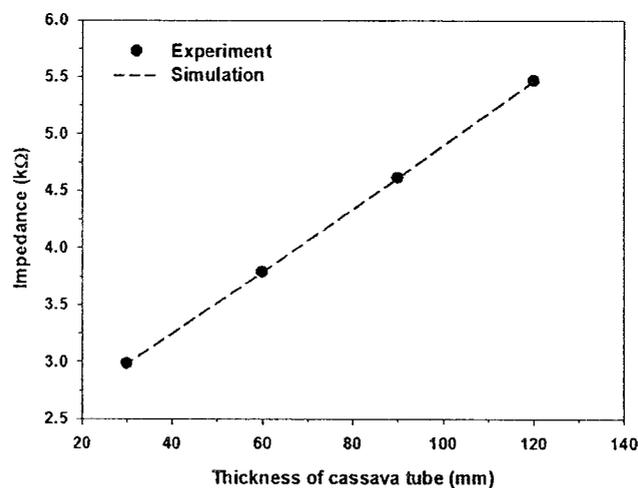


ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับความต้านทานของน้ำที่ค่าความต้านทานโหลดต่าง ๆ

ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับความต้านทานของน้ำ DI ที่ใช้ในการทดสอบในการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานโหลดเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบการวัด จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อย ๆ ค่าความต้านทานของน้ำ DI จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยมีระดับความต้านทานสูงสุดอยู่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 0.4 V ที่ค่าความต้านทานโหลด 10 k Ω , 100 k Ω และ 250 k Ω สำหรับค่าความต้านทานโหลด 1 k Ω จะมีระดับค่าความต้านทานของน้ำ DI สูงสุดอยู่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 0.5 V เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อย ๆ ความต้านทานของน้ำ DI จะค่อยๆ ลดลงอันเนื่องมาจากน้ำ

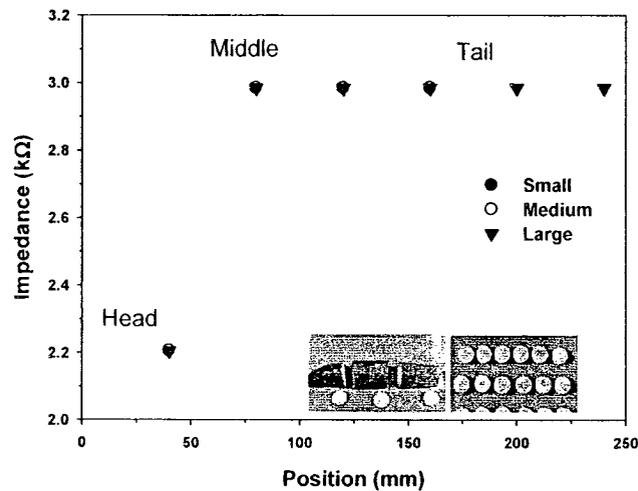
DI เริ่มเกิดการแตกตัวทำให้มีไอออนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตขึ้นไปเรื่อย ๆ ความต้านทานจะค่อย ๆ ลดลงโดยจะเริ่มคงที่ที่ระดับแรงดันอินพุต 2 V และจะมีค่าอิมิตัวที่ระดับแรงดัน 10 V จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นเป็นการทดสอบการแตกตัวของน้ำ โดยในระบบที่ทำการทดสอบ อิเล็กโทรดจะอยู่ใกล้กันมากทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่าสูง แต่สำหรับระบบที่ได้ออกแบบในการวัดห้วมันสำปะหลังในครั้งนี้ ได้วางอิเล็กโทรดอยู่ห่างกันพอสมควร ดังนั้นในการทดสอบจึงเลือกใช้แรงดันที่ระดับ 5 Vp ที่ความถี่ 100 Hz ทั้งนี้เพราะเป็นแรงดันที่น้ำยังไม่เกิดการแตกตัว และเลือกใช้ความต้านทานโหลดที่ 10 k Ω สำหรับสร้างกระแสคงที่ให้กับระบบ

4.3 ทดสอบวัดความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง และความหนาของห้วมันสำปะหลังสดที่มีต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของห้วมันสำปะหลังสดสายพันธุ์เกษตรกรศาสตร์อายุ 1 ปี กับค่าความต้านทานไฟฟ้า

จากผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของห้วมันสำปะหลังสดที่ความหนาต่างๆ พบว่าเมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานก็จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.23 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของหัวมันสำปะหลังสดสายพันธุ์เกษตรกรศาสตร์อายุ 1 ปี กับค่าความต้านทานไฟฟ้า

หัวมันสำปะหลังสดที่นำมาใช้ในการทดสอบจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรบ (2 เซนติเมตร) โดยจะแยกหัวมันออกเป็น 3 ขนาด คือ หัวขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หัวขนาดกลางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 25 มิลลิเมตร ถึง 50 มิลลิเมตร และหัวขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 มิลลิเมตร ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของหัวมันสำปะหลังสดสายพันธุ์เกษตรกรศาสตร์อายุ 1 ปีกับค่าความต้านทานไฟฟ้า จากภาพแสดงให้เห็นว่าบริเวณส่วนหัวของหัวมันสำปะหลังจะมีความต้านทานน้อยกว่าบริเวณตรงกลางและหางโดยมีค่าต่างกันประมาณ 1 kΩ โดยที่ขนาดของหัวไม่มีผลต่อค่าความต้านในแต่ละบริเวณ การที่บริเวณส่วนหัวมีค่าความต้านทานต่ำกว่าบริเวณตรงกลางและหางน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่บริเวณส่วนหัวจะมีท่อน้ำและท่ออาหารหนาแน่นทำให้ประจุสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้สะดวกกว่าบริเวณตรงกลางและหางจึงส่งผลให้ส่วนหัวมีค่าความต้านทานต่ำ

4.4 ทดสอบวัดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งในหัวมันสำปะหลังสดกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งในหัวมันสำปะหลังสดกับค่าไดอิเล็กทริกนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นฐานของหัวมันสำปะหลังสดกับปริมาณแป้ง ปริมาณน้ำ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการดูดกลืนแสงของแป้งมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

4.4.1 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นฐานของหัวมันสำปะหลังสดกับปริมาณแป้ง ปริมาณน้ำ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

คุณสมบัติของดินในแปลงทดลอง

แปลงมันสำปะหลังที่นำมาทดสอบ ตั้งอยู่ที่ ตำบลบ่อใหญ่ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม เป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีความเป็นกรดเล็กน้อย โดยมีค่าคุณสมบัติของธาตุฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) บริเวณหน้าดินชั้นบนดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของดินในแปลงทดลอง

ระดับความลึกของดิน (cm)	สูงจาก ระดับน้ำทะเล (m)	ชนิดของดิน	pH	ฟอสฟอรัส (ug/g)	โพแทสเซียม (cmol/kg)
หน้าดินด้านบน (0 - 45)	168.03	ดินร่วนปนทราย	5.25	10.00	40.08

หัวมันสำปะหลังที่นำมาทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขนาดโดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณตรงกลางหัวเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง โดยหัวขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หัวขนาดกลางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 25 มิลลิเมตร ถึง 50 มิลลิเมตร และหัวขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างของหัวมันสำปะหลังขนาดเล็กที่นำมาทดสอบมีความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 21.6 เซนติเมตร หัวขนาดกลางยาวเฉลี่ย 25.5 เซนติเมตร และหัวขนาดใหญ่ยาวเฉลี่ย 33.3 เซนติเมตร ส่วนน้ำหนักของหัวขนาดเล็กเฉลี่ยอยู่ที่ 78.5 กรัม หัวขนาดกลางหนักเฉลี่ย 280 กรัม และหัวขนาดใหญ่หนักเฉลี่ย 689 กรัม แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกับน้ำหนักแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 เส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาว และน้ำหนักของมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50

สายพันธุ์	ขนาด								
	เล็ก			กลาง			ใหญ่		
	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (g)
KU50	23.1±0.02	21.6±0.42	78.5±31.4	41.5±0.05	25.5±0.37	280±55.8	59.6±0.04	33.3±0.67	689±136.4

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ทางสถิติของขนาดและน้ำหนักของมันสำปะหลัง

อัตราของสถิติ (เส้นผ่าศูนย์กลาง/ความยาว) น้ำหนัก	
เล็ก	-0.519*
กลาง	-0.185
ใหญ่	-0.530

* นัยสำคัญที่ระดับ 0.01

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและพารามิเตอร์ของมันสำปะหลังสด

	ความยาว	น้ำหนัก	ปริมาณแป้ง			ปริมาณน้ำ		
			หัว	กลาง	หาง	หัว	กลาง	หาง
เล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง)	0.919***	0.943***	0.948***	0.638	0.885**	0.969***	0.628	0.923***
กลาง (เส้นผ่าศูนย์กลาง)	-0.023	0.893**	-0.738*	-0.391	-0.903**	0.475	0.294	0.723
ใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลาง)	0.522	-0.401	0.215	-0.376	-0.711	-0.258	-0.975***	0.241

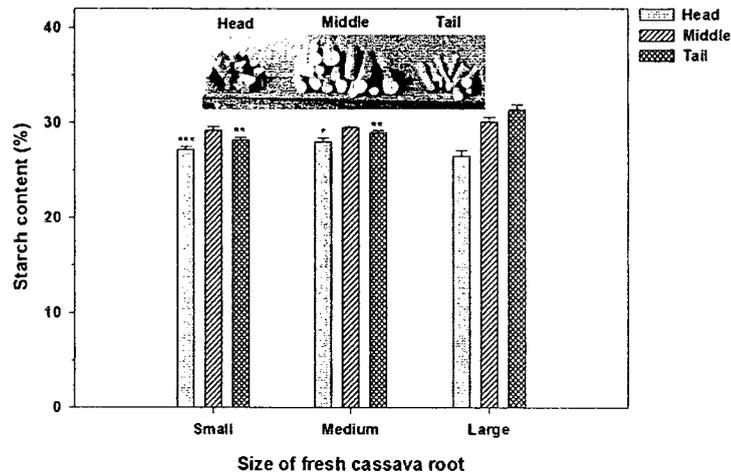
*, **, *** นัยสำคัญที่ระดับ 0.05, 0.01 และ 0.005 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับค่าพารามิเตอร์สัญญาณของมันสำปะหลังสดพบว่ามีความสัมพันธ์อยู่ในระดับสูงปานกลางถึงสูงมาก ($r = 0.6 - 0.99$) ทั้ง 3 ขนาดที่ทำการทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งกับหัวมันสำปะหลังขนาดเล็กที่ตำแหน่งหัวและหางมีความสัมพันธ์ในระดับสูง ($r = 0.948$ และ 0.885) และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งกับหัวมันสำปะหลังขนาดกลางที่ตำแหน่งหางมีความสัมพันธ์ในระดับสูงเช่นกัน ($r = 0.903$) สำหรับตำแหน่งหัวของมันสำปะหลังขนาดกลางมีความสัมพันธ์ในระดับสูงปานกลาง ($r = -0.738$) เช่นเดียวกับส่วนหางของหัวขนาดใหญ่ และส่วนตรงกลางของหัวขนาดเล็กที่มีความสัมพันธ์ในระดับสูงปานกลาง ($r = -0.711$ และ $r = 0.638$ ตามลำดับ) โดยมีความสัมพันธ์ในระดับต่ำที่ตำแหน่งตรงกลางของหัวขนาดเล็ก ($r = -0.391$) และตำแหน่งหัวและกลางของหัวขนาดใหญ่ ($r = 0.215$ and -0.376) จากข้อมูลแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าหัวขนาดเล็กและกลางบริเวณหัวและหางจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณแป้งมากกว่าหัวขนาดใหญ่ในทุกๆ ตำแหน่ง และบริเวณกึ่งกลางของหัวขนาดกลาง

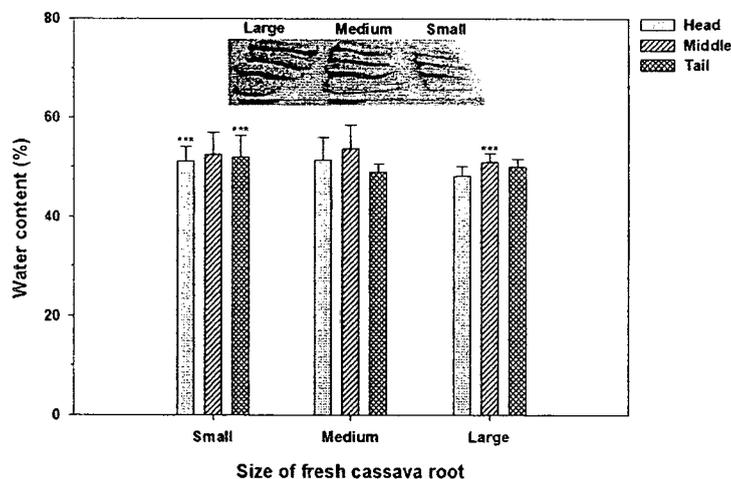
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมีค่าอยู่ในระดับสูงกับมันสำปะหลังขนาดเล็กที่ตำแหน่งหัวและหาง ($r = 0.969$ และ 0.923) และบริเวณตรงกลางของหัวขนาดใหญ่ ($r = -0.975$); และมีความสัมพันธ์ในระดับสูงปานกลางกับมันสำปะหลังขนาดเล็กที่ตำแหน่งตรงกลาง ($r = 0.628$) และส่วนหางของหัวขนาดกลาง ($r = -0.723$); และมีความสัมพันธ์ในระดับต่ำกับมันสำปะหลังขนาดกลางที่ตำแหน่งหัวและกึ่งกลางของหัว ($r = 0.475$ และ 0.294) นอกจากนี้มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำกับส่วนหัวและหางของมันสำปะหลังขนาดใหญ่ ($r = -0.258$ และ 0.241) จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งและปริมาณน้ำที่มีต่อหัวมันสำปะหลังขนาดเล็กที่ตำแหน่งหัวและหางจะมีระดับความสัมพันธ์ที่สูงเหมือนกัน ความสัมพันธ์ดังกล่าวมาข้างต้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ภาพที่ 4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์ของปริมาณแป้งที่ตำแหน่งต่างๆ ของหัวมันสำปะหลังสดที่มีขนาดหัวเล็ก กลาง และใหญ่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณแป้งของหัวมันสำปะหลังสดขนาดเล็ก กลาง และใหญ่มีปริมาณแป้งประมาณ $28.21 \pm 0.99\%$ $28.84 \pm 0.74\%$ และ $29.36 \pm 2.53\%$ ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหัวมันขนาดใหญ่จะมีปริมาณแป้งโดยเฉลี่ยมากกว่าหัวมันขนาดกลางและเล็ก มากไปกว่านั้นเรายังพบอีกว่าปริมาณแป้งจะมีปริมาณมากที่สุดบริเวณตรงกลางของหัวขนาดเล็กและกลาง ในขณะที่หัวมันขนาดใหญ่จะมีปริมาณแป้งมากที่สุดบริเวณส่วนหางของหัว เมื่อพิจารณาบริเวณส่วนหัวของหัวมันขนาดต่างๆ สามารถที่จะลำดับปริมาณแป้งตามขนาดของหัวได้ดังนี้ หัวขนาดกลาง ($28.03 \pm 0.35\%$) > หัวขนาดเล็ก ($27.23 \pm 0.30\%$) > หัวขนาดใหญ่ ($26.53 \pm 0.54\%$) สำหรับบริเวณตรงกลางของหัวสามารถลำดับได้ดังนี้ หัวขนาดใหญ่ ($30.15 \pm 0.44\%$) > หัวขนาดกลาง ($29.48 \pm 0.17\%$) > หัวขนาดเล็ก ($29.20 \pm 0.41\%$) และบริเวณหางของหัวสามารถลำดับได้ดังนี้ หัวขนาดใหญ่ ($31.40 \pm 0.47\%$) > หัวขนาดกลาง ($29.03 \pm 0.22\%$) > หัวขนาดเล็ก ($28.20 \pm 0.29\%$).

ปริมาณน้ำเฉลี่ยรวมบริเวณส่วนหัว กลาง และหางของหัวมันสำปะหลังขนาดเล็กที่นำมาทดสอบพบว่ามีค่าประมาณ $51.95 \pm 0.63\%$ หัวขนาดกลางมีค่าประมาณ $51.33 \pm 2.36\%$ และหัวขนาดใหญ่มีค่าประมาณ $49.76 \pm 1.40\%$ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าปริมาณน้ำในหัวมันสำปะหลังจะมีปริมาณมากบริเวณตรงกลางของหัว ดังแสดงในภาพที่ 4.26 เมื่อทำการลำดับปริมาณที่มีในตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวทั้ง 3 ขนาดสามารถลำดับได้ดังนี้ ในกรณีหัวมันขนาดเล็ก : กลาง ($52.56 \pm 4.44\%$) > หาง ($51.99 \pm 4.38\%$) > หัว ($51.30 \pm 2.74\%$) กรณีหัวมันขนาดกลาง : กลาง ($53.65 \pm 4.80\%$) > หัว ($51.41 \pm 4.65\%$) > หาง ($48.92 \pm 1.66\%$). กรณีหัวมันขนาดใหญ่ : กลาง ($50.99 \pm 1.72\%$) > หาง ($50.04 \pm 1.52\%$) > หัว ($48.25 \pm 1.93\%$) ปริมาณน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณแป้งของหัวมันสำปะหลังอยู่ในระดับสูงมาก ($r = -0.955$) แต่มีทิศทางผกผันกัน กล่าวคือเมื่อมีปริมาณน้ำมากจะทำให้มีปริมาณแป้งน้อย และในทางกลับกัน



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (*, **, *** นัยสำคัญที่ระดับ 0.05, 0.01 และ 0.005 ตามลำดับ)



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณน้ำในหัวมันสำปะหลัง (***) นัยสำคัญที่ระดับ 0.005)

4.4.2 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการดูดกลืนแสงของแป้งมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

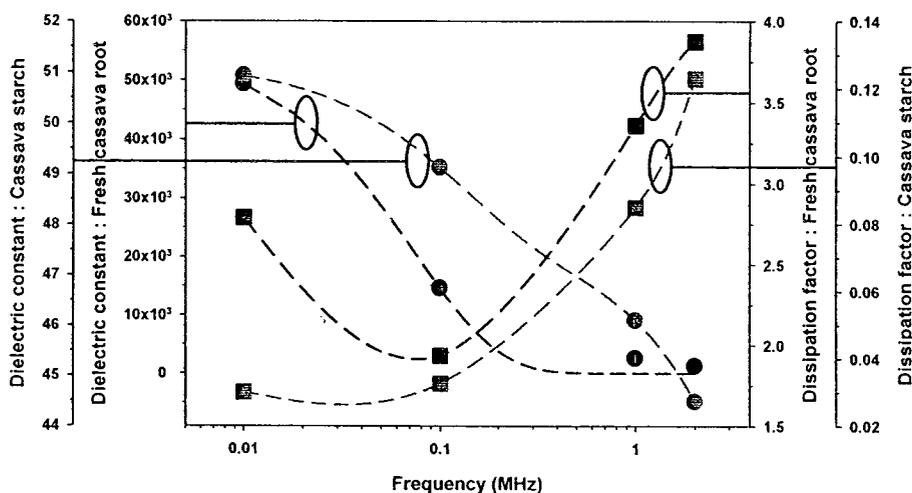
ปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

มันสำปะหลังสดที่ทำการทดสอบมีปริมาณความชื้น 74.29 ± 0.10 wt.% ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณความชื้น 11.94 ± 1.18 wt.%

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและปัจจัยสูญเสีย

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีต่อความถี่ของหัวมันสำปะหลังสดและผงแป้งมันสำปะหลังแสดงได้ดังภาพที่ 4.27 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยจะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของหัวมันสำปะหลังสดจะมีค่ามากกว่าประมาณพันเท่าของผงแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากผลของ relaxation และ dispersion ของวัสดุ [11] และปริมาณความชื้นที่หัวมันสำปะหลังสดมีค่าสูงกว่ามาก [12] เมื่อพิจารณาปัจจัยการสูญเสีย (dissipation factor) จะพบว่าปัจจัย

การสูญเสียจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นในช่วง 10 kHz-100 kHz และจะเริ่มเพิ่มขึ้นตามความถี่เมื่อความถี่มีค่ามากกว่า 100 kHz มากไปกว่านั้นยังพบอีกว่าค่าปัจจัยการสูญเสียของหัวมันสำปะหลังสดจะมีค่าสูงกว่าผงแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความชื้นที่แตกต่างกันโดยหัวมันสำปะหลังสดจะมีความชื้นที่สูงกว่าผงแป้งมันสำปะหลังจึงเป็นเหตุให้ประจุสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่า



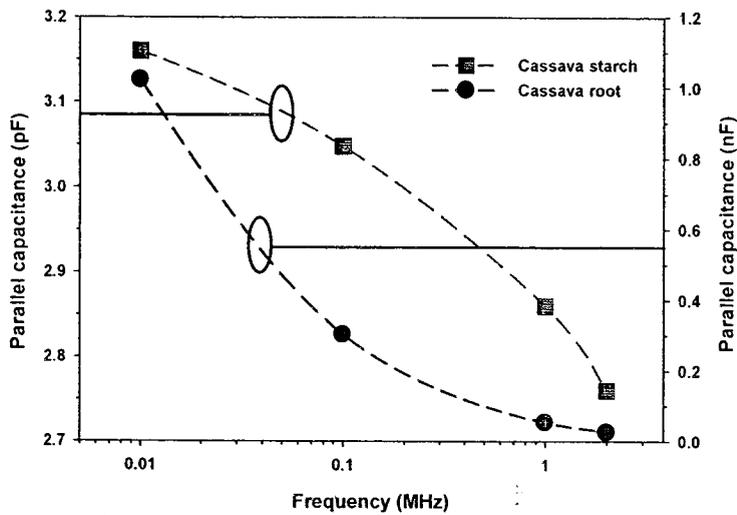
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้โอเล็กทริกกับความถี่

ตัวเก็บประจุขนาน

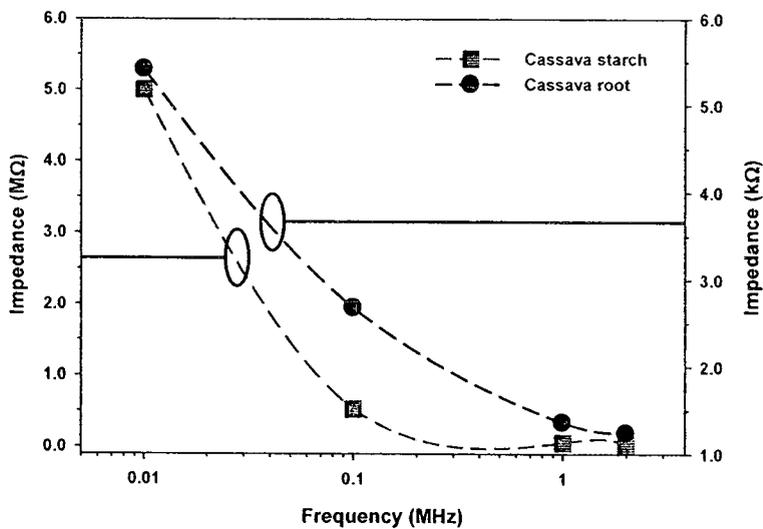
เนื่องด้วยการทดสอบอยู่ในย่านความถี่ต่ำ ดังนั้นโมเดลที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการพิจารณาค่าคงที่ได้โอเล็กทริก หรือปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ ควรเป็นโมเดลแบบขนาน ซึ่งเป็นการขนานกันระหว่างตัวเก็บประจุกับความต้านทาน โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุขนานกับความถี่ ที่ขนาดสัญญาณไบอัส 1 V ณ อุณหภูมิห้อง สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.28 เมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวเก็บประจุขนานจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยตัวเก็บประจุขนานของหัวมันสำปะหลังสดจะมีค่าสูงกว่าผงแป้งมันสำปะหลัง ในช่วงความถี่ 10 kHz-2 MHz

อิมพีแดนซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของตัวอย่างทั้งสองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.29 โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยค่าอิมพีแดนซ์ของผงแป้งมันสำปะหลังจะมีค่าสูงกว่าหัวมันสำปะหลังสด ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากผลของความถี่ที่ตั้งที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



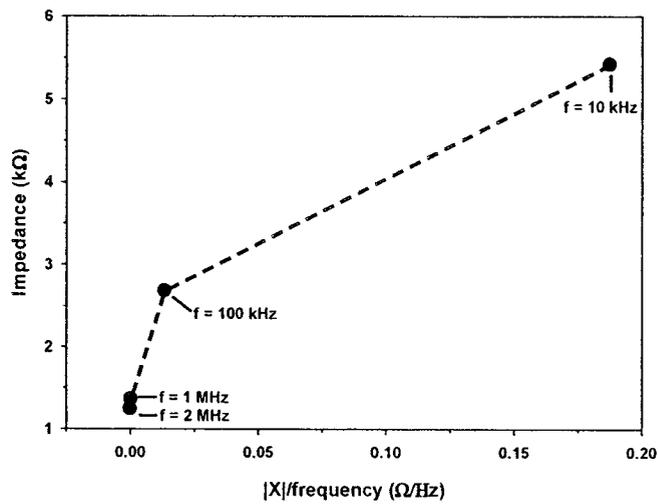
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุขนานกับความถี่



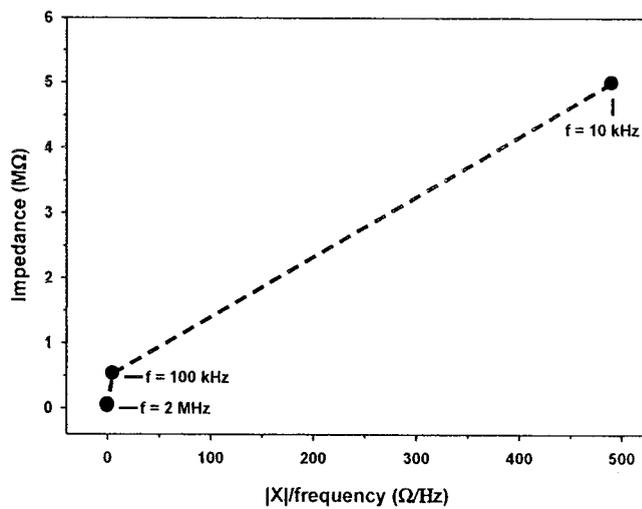
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ กับ $|X|/\text{frequency}$ ซึ่งนำเสนอโดย Abrantes และคณะ [13] ภายในระดับแรงดันกระตุ้น 1 V ดังแสดงในภาพที่ 4.30 (ก) และ 4.30 (ข) พบว่าภาพที่ 4.30 (ก) ซึ่งเป็นภาพที่เขียนโดยใช้ข้อมูลจากหัวมันสำปะหลังสดมีความชันเกิดขึ้นทั้งหมด 3 ค่า ตลอดช่วงความถี่จาก 10 kHz–2 MHz ในขณะที่ภาพที่ 4.30 (ข) ซึ่งเป็นภาพที่เขียนโดยใช้ข้อมูลจากผงแป้งมันสำปะหลังมีความชันเกิดขึ้นทั้งหมด 2 ค่า ที่ช่วงความถี่เดียวกันกับภาพที่ 4.30 (ก) ผลที่เกิดขึ้นจากกราฟพอที่จะประมาณได้ว่าความชันที่เกิดขึ้นในแต่ละค่านั้นจะบ่งบอกถึงจำนวนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ซ้อนร่วมอยู่ในระบบหรือโครงสร้างของกราวด์ ซึ่งจะเห็นว่าระบบกราวด์ของหัวมันสำปะหลังสดนั้นจะเกิดความชันขึ้นมา 3 ค่า ที่ความถี่ $< 100 \text{ kHz}$, $100 \text{ kHz} < \text{ความถี่} < 1 \text{ MHz}$ และความถี่ $< 2 \text{ MHz}$ ซึ่งน่าจะมีผลมาจากอิเล็กโทรด (electrodes) เกรน (grain boundaries) และ bulk ตามลำดับ ซึ่งแต่ละป็นปัจจัยดังกล่าวจะมีค่าไดอิเล็กทริกที่

แตกต่างกัน เฉกเช่นเดียวกันกับภาพที่ 4.30 (ข) ที่มีความชันเกิดขึ้น 2 ค่า นั้นเป็นเพราะการวัดผงแป้งมันสำปะหลังจะได้รับผลจากอิเล็กโทรด และ bulk เป็นหลัก



(ก)

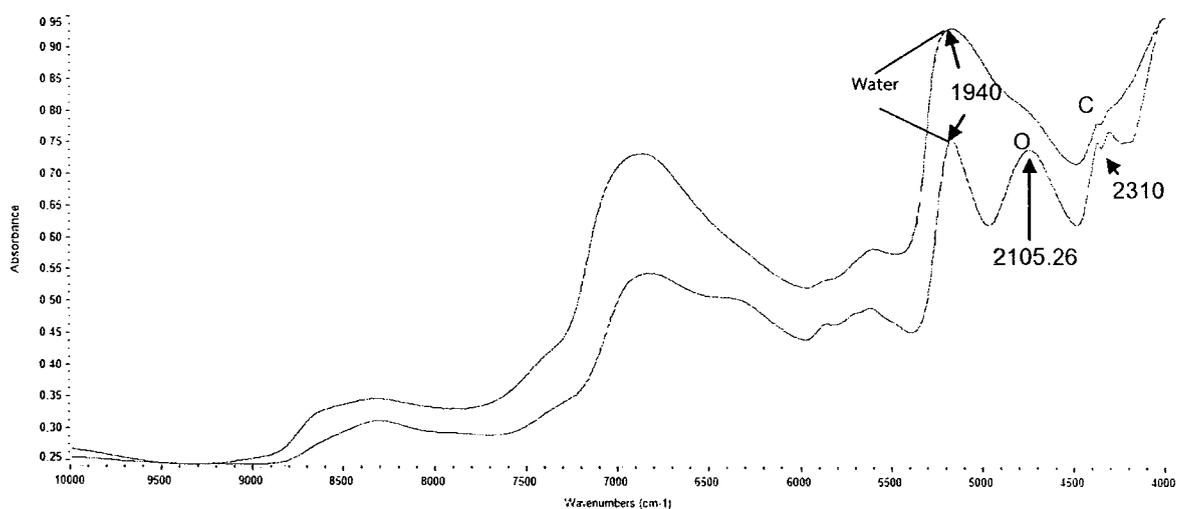


(ข)

ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับ $|X|/\text{frequency}$ (ก) หัวมันสำปะหลังสด (ข) ผงแป้งมันสำปะหลัง

การดูดกลืนแสง

ภาพที่ 4.31 แสดงสเปกตรัมของหัวมันสำปะหลังสดและผงแป้งมันสำปะหลังในช่วงความยาวคลื่น 1,000 – 2,500 nm หรือที่จำนวนคลื่น 10,000 – 4,000 cm^{-1} โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงสเปกตรัมของหัวมันสำปะหลังสด และเส้นกราฟสีแดงแสดงสเปกตรัมของผงแป้งมันสำปะหลัง จำนวนคลื่นที่ $5,154.64 \text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 1940 nm) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นของหัวมันสำปะหลังสดและแป้งมันสำปะหลัง จำนวนคลื่นที่ $4,329 \text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 2310 nm) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กับ Methylene (CH) และจำนวนคลื่นที่ $4,750 \text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 2,105.26 nm) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่มี OH [14] เป็นส่วนประกอบ ภาพที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่ายอดการดูดกลืนแสงของหัวมันสำปะหลังสดที่ความยาวคลื่น 1940 nm ซึ่งสูงกว่าและกว้างกว่าผงแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งบ่งชี้ถึงความชื้นและขนาดโมเลกุลของหัวมันสำปะหลังสดที่มีขนาดใหญ่กว่าผงแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าวัสดุทั้งสองจะมี OH และ Methylene (CH) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งสังเกตได้จากยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 2,105.26 nm และ 2310 nm ตามลำดับ มากไปกว่านั้นยังพบอีกว่าการดูดกลืนแสงของหัวมันสำปะหลังสดจะมีค่ามากกว่าผงแป้งมันสำปะหลังซึ่งอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $1,000 \text{ cm}^{-1} - 2,500 \text{ cm}^{-1}$.



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับจำนวนคลื่น