

#### บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

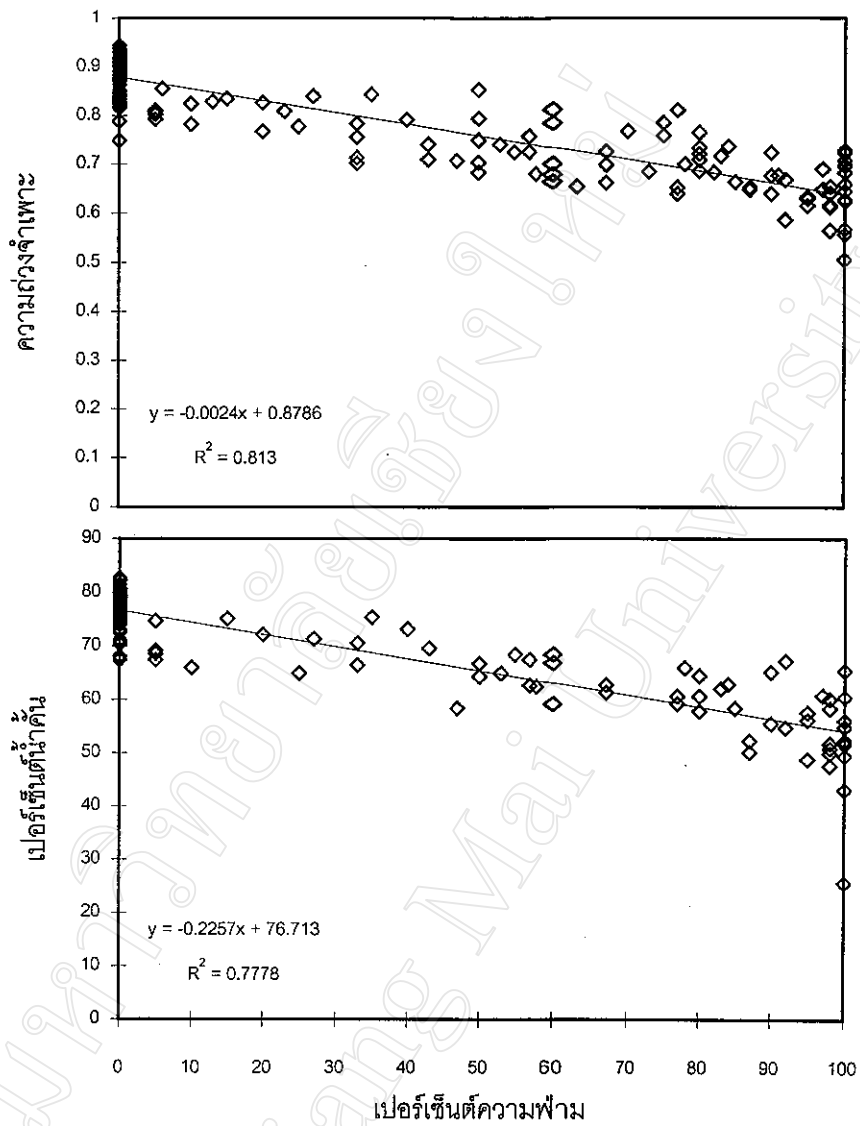
ตอนที่ 1 การศึกษาวิธีการประเมินความฟามของผลส้มแบบต่าง ๆ

การศึกษาค่าความฟามในผลส้มครั้งนี้ ใช้การประเมินด้วยสายตาโดยผ่าผลส้มแบ่งเป็น 4 ส่วน แล้วทำการประเมินความฟามทีละส่วน ในการประเมินความฟามจะดูจากพื้นที่ที่มีสีขาวขุ่น แตกต่างจากส่วนปกติที่มีสีส้ม เมื่อบีบ juice sac แห้งกว่าส่วนปกติ แล้วคิดส่วนฟามจากพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนว่ามีเปอร์เซ็นต์ฟามเท่าไรจากพื้นที่ทั้งหมด โดยคิดพื้นที่ทั้งหมดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำเปอร์เซ็นต์ความฟามจากทั้ง 4 ส่วนมาเฉลี่ยเป็นความฟามของทั้งผล ซึ่งผลดีจากวิธีการนี้คือสามารถประเมินความฟามได้ถูกต้องแม่นยำและสามารถประเมินได้ทั้งผล

เมื่อเปรียบเทียบความฟามกับความถ่วงจำเพาะ พบว่า เมื่อความฟามเพิ่มขึ้น ความถ่วงจำเพาะจะลดลง ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำคั้น โดยพบว่าความฟามเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำคั้นลดลงด้วย (ภาพที่ 8) โดยทั้งความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์น้ำคั้นมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับเปอร์เซ็นต์ความฟาม ที่  $R^2 = 0.813$  และ  $0.778$  ตามลำดับ การที่ความฟามเพิ่มขึ้นในขณะที่ความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์น้ำคั้นลดลงที่พบในการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ รวี (2540 ก และ ข) นอกจากนั้น รวี (2540 ข) ยังเสนอด้วยว่าการที่มีอากาศอยู่ใน juice sac มากกว่าปกติ น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ความถ่วงจำเพาะลดลงและการที่เปอร์เซ็นต์น้ำคั้นของผลส้มทั้งผลลดลงเกิดขึ้นเพราะบริเวณที่ฟามจะมี juice sac แห้งมีน้ำน้อยกว่าบริเวณปกติ

จากการสังเกตในการประเมินความฟาม พบว่าในจำนวนผลส้มทั้งหมดที่ประเมินความฟามพบอาการฟามแบบข้าวสาร (granulation) น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอาการที่พบนั้นสีของ juice sac ไม่แตกต่างจาก juice sac ปกติคือมีสีส้ม แต่เมื่อบีบ juice sac น้ำส้มจะไม่เป็นของเหลวแต่จะมีลักษณะเป็นเจล (gel)

จากผลการศึกษา ถ้าเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการใช้คัดคุณภาพส้มแบบไม่ทำลายที่ไม่รบกวนผล 100 เปอร์เซ็นต์ วิธีประเมินความฟามโดยใช้ความถ่วงจำเพาะน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำไปใช้ เพราะเป็นวิธีที่ไม่ต้องทำลายผล ในขณะที่อีก 2 วิธีคือการประเมินด้วยสายตาและเปอร์เซ็นต์น้ำคั้น เป็นวิธีที่ต้องทำลายผลซึ่งจะทำให้ไม่สามารถคัดผลส้มฟามได้ทุกผล



ภาพที่ 8 ความถ่วงจำเพาะ เปอร์เซ็นต์น้ำคั้นและเปอร์เซ็นต์ความฟามของสัมปรีมองค์

## ตอนที่ 2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับลักษณะต่างๆ ของส้ม

การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลของความถี่และความฟ้ามครั้งนี้ ทำการศึกษาคุณสมบัติไฟฟ้า 3 ชนิด ได้แก่ ความจุไฟฟ้า ความต้านทาน และ impedance โดยได้ผลการทดลองดังนี้

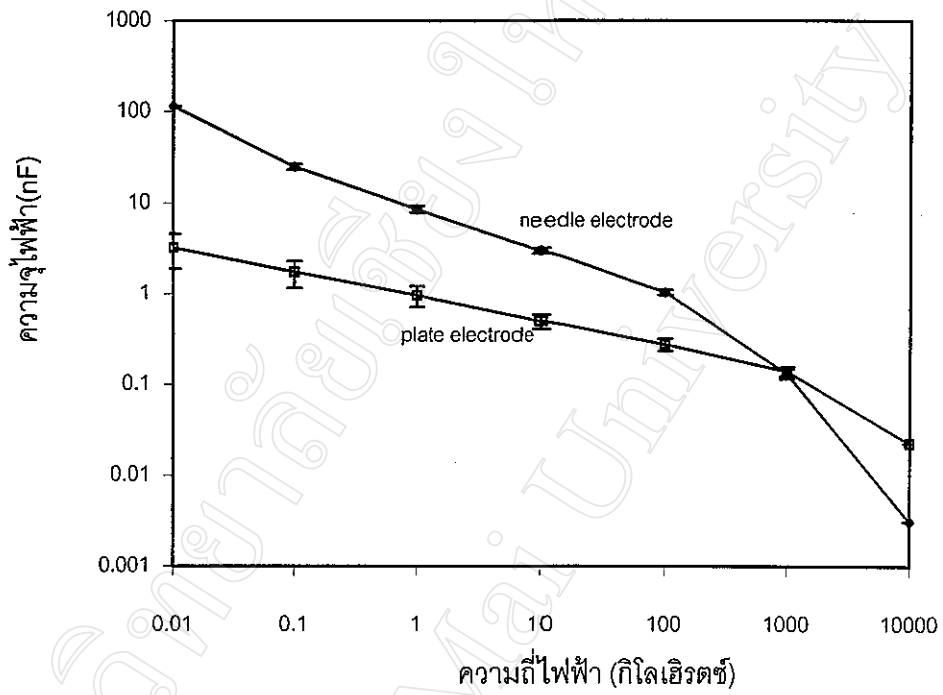
### 1. ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลส้มปกติ

#### 1.1 ความจุไฟฟ้า

ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อความจุไฟฟ้าในการวัดแบบทำลายด้วย needle electrode พบว่าการเพิ่มความถี่ไฟฟ้าทำให้ความจุไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง จาก 100 – 1 nF ในช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีการลดลงมากกว่า 1 – 0.003 nF ในช่วง 1,000 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในภาพที่ 9 ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Kato (1987) ซึ่งได้วัดผลแตงโม โดยพบว่าความจุไฟฟ้า ลดลงจาก 100 – 1 nF ในช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ และลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1 – 0.01 nF ในช่วงความถี่ 1,000 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ เช่นเดียวกัน

ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อความจุไฟฟ้าในการวัดแบบไม่ทำลายด้วย plate electrode พบว่า ความถี่ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความจุไฟฟ้าลดลงเช่นเดียวกับการวัดด้วย needle electrode โดยลดลงจาก 5 – 0.1 nF ในช่วง 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ และลดลงอย่างรวดเร็วจาก 0.1 – 0.003 nF ในช่วงความถี่ 1,000 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ (ภาพที่ 9) สอดคล้องกับ Kato (1987) ที่ได้วัดแอปเปิ้ลและ พบว่า ความจุไฟฟ้าเริ่มลดลงจาก 3 – 0.1 nF ในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ และลดลงอย่างรวดเร็วจาก 0.1 – 0.01 nF ที่ความถี่ไฟฟ้า 1,000 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการวิจัยในแตงโมและแอปเปิ้ลของ Kato (1987) ทั้ง 2 แบบของ electrode เนื่องจากเป็นการวัดความจุไฟฟ้าของผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการวัดด้วย needle electrode นั้นให้ผลการทดลองเหมือนกัน



ภาพที่ 9 ความจุไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้า วัดด้วย needle electrode และ plate electrode

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างความจุไฟฟ้าที่วัดด้วย needle electrode กับ plate electrode คาดว่าเกิดจากอิทธิพลของความจุไฟฟ้าของเปลือก เพราะการวัดด้วย plate electrode เป็นการวัดที่ผิวนอกของเปลือกส้ม แต่การวัดด้วย needle electrode เป็นการวัดที่เนื้อส้มทำให้อิทธิพลของเปลือกต่อความจุไฟฟ้าลดลง เมื่อความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้อิทธิพลของเปลือกลดลงจนกระทั่งที่ความถี่ไฟฟ้า 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ความจุไฟฟ้าทั้ง 2 electrode มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับคำอธิบายของ Kato (1987) ที่พบว่าความถี่ไฟฟ้ามากกว่า 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ทำให้อิทธิพลของเปลือกต่อความจุไฟฟ้าและความต้านทานน้อยลงจนกระทั่งไม่มีความสำคัญ

เมื่อพิจารณาส่วนของการลดลงของความจุไฟฟ้าเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้านั้น Harker and Dunlop (1994) และ Stout (1988) ได้อธิบายว่าความถี่ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้มีพลังงานผ่านทะลุเข้าไปในเซลล์ได้ดีขึ้น ดังสมการที่เกี่ยวกับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (พิซัย, 2539)

$$E = hf \quad (8)$$

เมื่อ	E	คือพลังงานของคลื่น
	h	คือค่าคงที่พลังค์ (Planck's constant)
	f	คือความถี่ไฟฟ้า (Frequency)

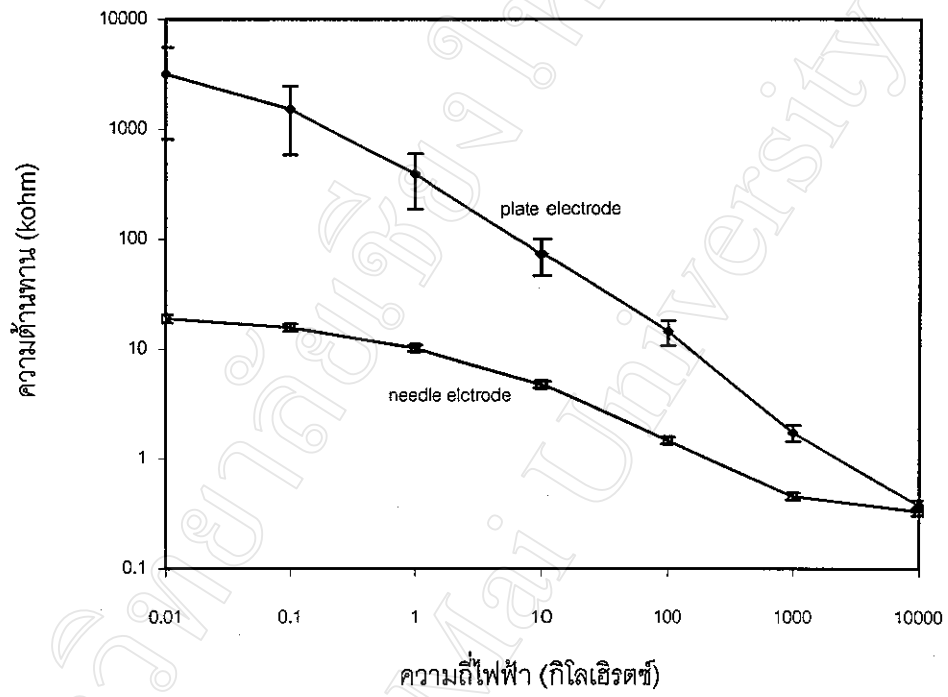
จากสมการ (8) พบว่าความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากเท่าใด พลังงานที่ได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งพลังงานที่มากขึ้นคาดว่าจะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านเซลล์ต่าง ๆ ได้ดีกว่าพลังงานที่น้อยและพลังงานของประจุอิสระที่ผ่านเข้าไปก็มีค่ามากขึ้น ทำให้เซลล์ไม่สามารถที่จะเก็บประจุอิสระเหล่านี้ไว้ได้จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า นอกจากนี้การเพิ่มความถี่ไฟฟ้ายังทำให้อิทธิพลของสารไอออนที่มีในผลไม้ และสภาพการเกิดประจุในช่องว่างระหว่างเซลล์ (space charge polarization) ลดลง จนกระทั่งไม่มีความสำคัญที่ความถี่ 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ (Thompson and Zachariah, 1971 b)

## 1.2 ความต้านทาน

ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อความต้านทานในการวัดแบบทำลายด้วย needle electrode พบว่า เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า ความต้านทานมีแนวโน้มลดลง โดยลดลงจาก 13 – 0.7 kohm ในช่วงความถี่ 0.01 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ (ภาพที่ 10) ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kato (1987) ที่พบว่าความต้านทานของแพร์มีค่าลดลงจาก 12 – 0.4 kohm ในช่วงความถี่ 0.01 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และลดลงน้อยมากจาก 0.4 – 0.3 kohm ในช่วงความถี่ 100 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ นอกจากนี้ผลยังสอดคล้องกับการทดลองของ Harker and Dunlop (1994) ในผล nectarine พบว่าความต้านทานมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าในช่วง 0.05 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์

ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อความต้านทานในการวัดแบบไม่ทำลายด้วย plate electrode พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า ความต้านทานมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับการวัดด้วย needle electrode โดยลดลงจาก 5,000 – 0.9 kohm ในช่วงความถี่ 0.001 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kato (1987) ที่พบว่าความต้านทานของแพร์มีค่าลดลงจาก 700 – 1 kohm ในช่วงความถี่ 10 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ เช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของความถี่ไฟฟ้าต่อความต้านทานในการวัดด้วย needle electrode กับ plate electrode พบว่าในช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ความต้านทานของส้มที่วัดด้วย plate electrode มีค่าสูงกว่า needle electrode แต่ที่ความถี่ 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ความต้านทานของทั้งสอง electrode มีค่าใกล้เคียงกัน การที่ในช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ความต้านทานของ plate electrode มีค่าสูงกว่าการวัดด้วย needle electrode นั้นอาจเนื่องมาจากอิทธิพลของเปลือกเช่นเดียวกับความจุไฟฟ้า และคำอธิบายของ Thompson and Zachariah (1971 b) ที่ว่า ในการวัดสภาพต้านทานของผลไม้ในช่วงความถี่ไฟฟ้า  $1-10^6$  เฮิร์ตซ์ นั้นปัญหาที่พบได้มากคือความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่จุดสัมผัสระหว่าง electrode กับผิวของผลไม้จะทำให้เกิดสภาพต้านทานอีกค่าหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของชนิดสารที่เป็นองค์ประกอบของผลไม้กับ electrode และยังเกิดขึ้นจากชั้นของอากาศที่อยู่ระหว่างผลไม้กับ electrode ซึ่งจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านมาจาก electrode ได้



ภาพที่ 10 ความต้านทานและความถี่ไฟฟ้า วัดด้วย needle electrode และ plate electrode

### 1.3 Impedance

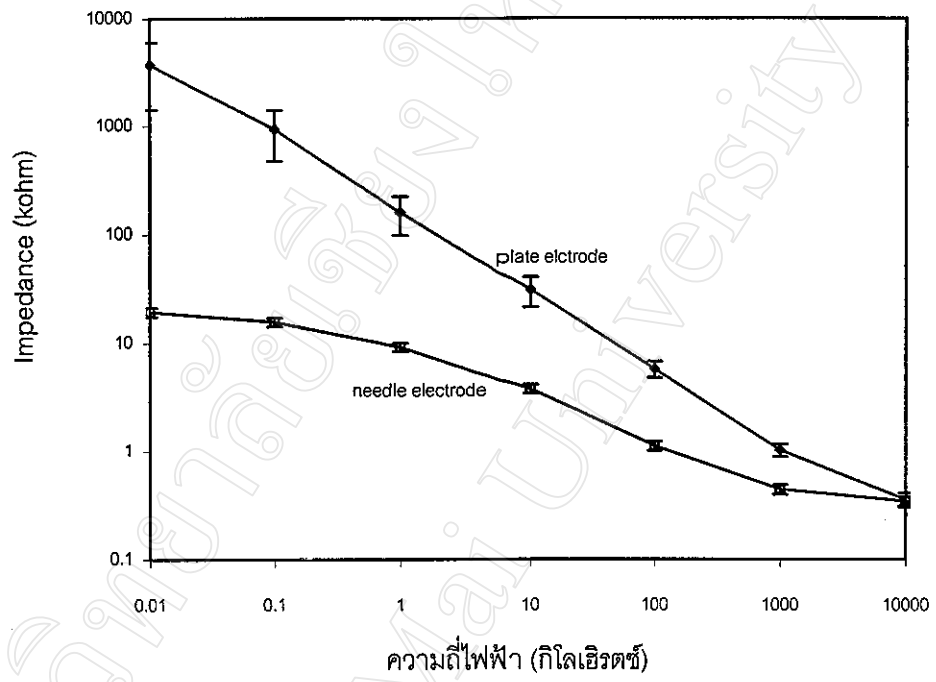
ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อ Impedance ในการวัดแบบทำลายด้วย needle electrode พบว่า เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า Impedance มีค่าลดลง โดยลดลงจาก 13 – 0.7 kohm ในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 – 1,000 กิโลเฮิรตซ์ และลดลงน้อยมากจาก 0.7 – 0.6 kohm ที่ความถี่ 1,000 – 10,000 กิโลเฮิรตซ์ (ภาพที่ 11) ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Kato (1987) ที่พบว่าค่า Impedance ของแพร์มีค่าลดลงจาก 12 – 0.9 kohm ที่ช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิรตซ์ และคงที่ที่ 0.9 kohm ที่ความถี่ 1,000 – 10,000 กิโลเฮิรตซ์ และผลการทดลองของ Weaver and Jackson (1966) ทำการวัดค่า impedance ของพืชพันธุ์ต่าง ๆ ที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ และ 4 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าที่ความถี่ 4 กิโลเฮิรตซ์ค่า impedance ของพืชพันธุ์ต่าง ๆ มีค่าที่น้อยกว่าการวัดที่ 250 เฮิรตซ์

ผลของความถี่ไฟฟ้าต่อ Impedance ในการวัดแบบไม่ทำลายด้วย plate electrode พบว่า เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า Impedance มีค่าลดลง จาก 6,000 – 0.6 kohm ในช่วงความถี่ 0.01 – 10,000 กิโลเฮิรตซ์

เมื่อพิจารณาค่า Impedance และแนวโน้มการลดลงแล้ว จากภาพที่ 9, 10 และ 11 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับความต้านทานทั้ง needle electrode และ plate electrode ดังสมการค่า Impedance ( $Z = R + 1/j\omega C$ ) ที่แสดงว่าความต้านทานมีอิทธิพลต่อ Impedance มากกว่าความจุไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่าค่า Impedance ที่วัดได้เป็นผลมาจากความต้านทานเป็นหลัก

○ การเปรียบเทียบค่า Impedance ในการวัดด้วย needle electrode กับ plate electrode พบว่าในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 – 1,000 กิโลเฮิรตซ์ ค่า impedance จากการวัดด้วย plate electrode มีค่าสูงกว่า แต่เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าเป็น 10,000 กิโลเฮิรตซ์ ค่า impedance ของการวัดด้วย electrode ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในช่วง 0.01 – 1,000 กิโลเฮิรตซ์ ค่า impedance จากการวัดด้วย needle electrode มีค่าน้อยกว่า impedance ที่วัดด้วย plate electrode นั้น คาดว่าเนื่องจาก เหตุผลเดียวกันกับความต้านทาน คือ อิทธิพลของความต้านทานของเปลือก



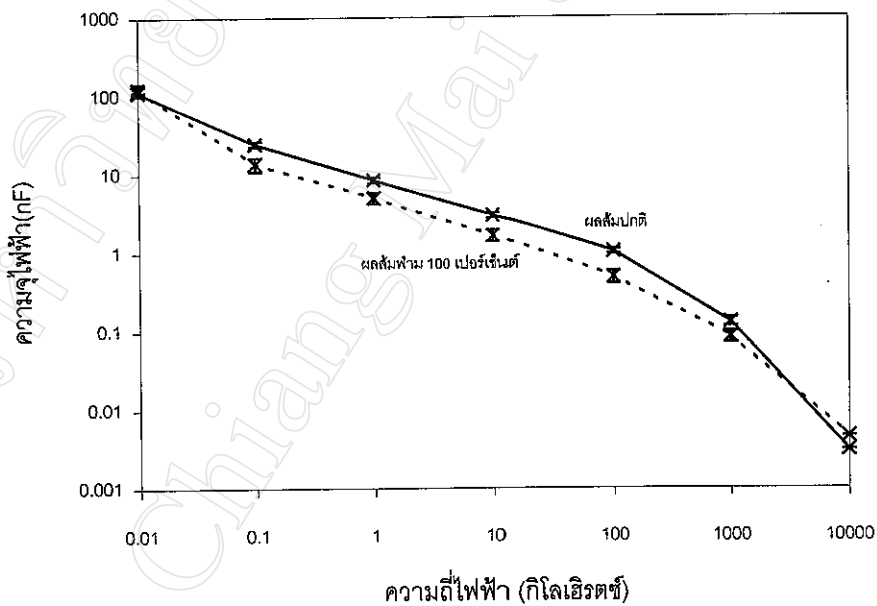


ภาพที่ 11 Impedance และความถี่ไฟฟ้า วัดด้วย needle electrode และ plate electrode

## 2. ผลของระดับอาการฟ้ามต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลลัม

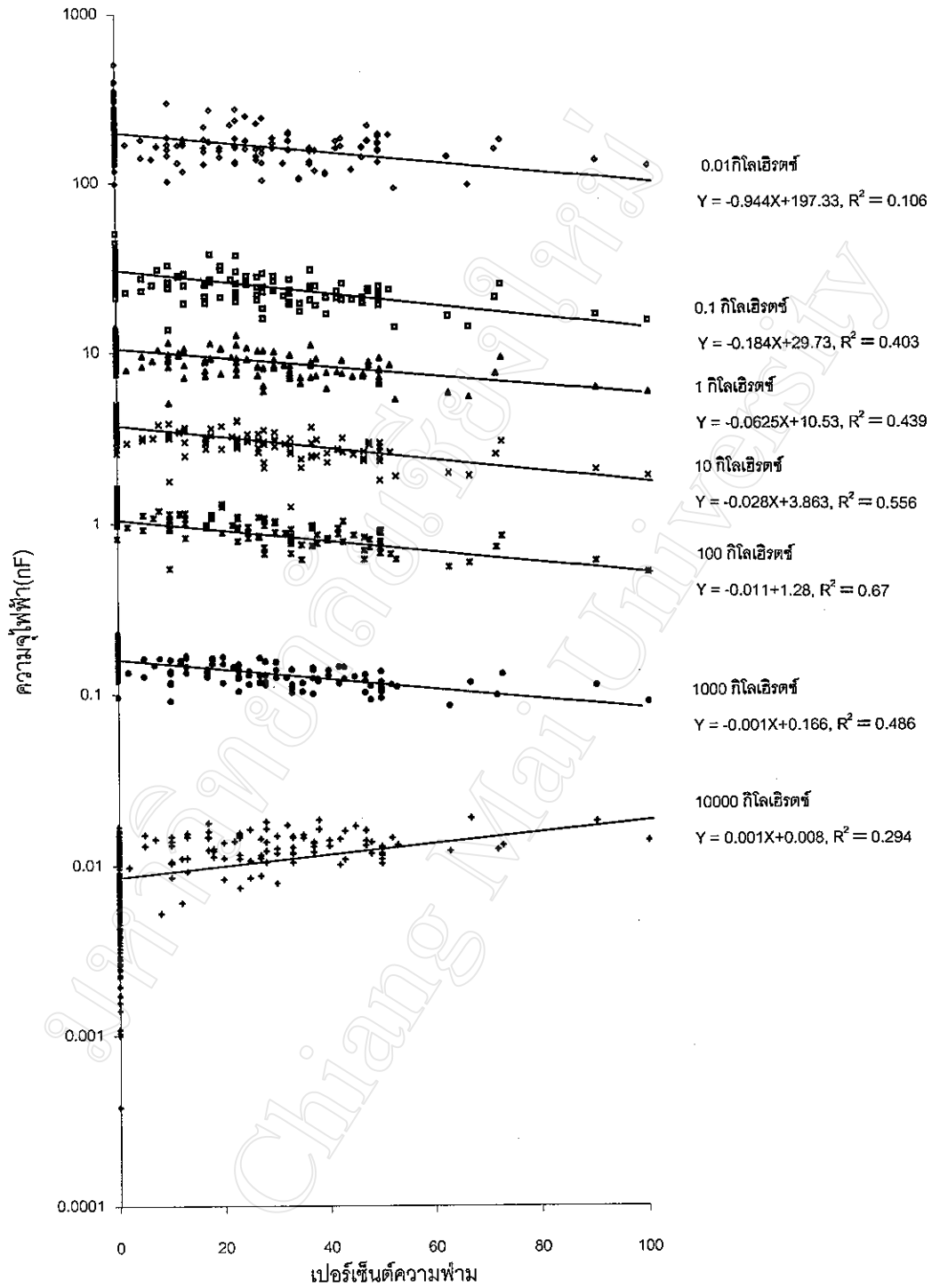
### 2.1 ความจุไฟฟ้า

เมื่อวัดความจุไฟฟ้าของผลฟ้ามเปรียบเทียบกับผลปกติพบว่า ความจุไฟฟ้าของผลลัมฟ้าม 100 เปอร์เซ็นต์มีค่าน้อยกว่าผลปกติ (ภาพที่ 12) เพราะผลลัมฟ้ามในการทดลองนี้คือผลที่มีปริมาณน้ำในเซลล์น้อยกว่าผลปกติ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานของ Kato (1987) ที่พบว่าผลปกติของแพร์และแตงโมมีความจุไฟฟ้าน้อยกว่าผลที่เน่า ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเนื่องจากผลไม้เน่าคือผลไม้ที่เซลล์ถูกทำลาย เกิดการรั่วไหลของสารประกอบต่างๆภายในเซลล์ทำให้มีปริมาณของอิออนมากกว่าปกติ จากสมการ (2) ( $C = \epsilon A/d$ ) ความหนาแน่นของประจุที่เพิ่มขึ้นทำให้ความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าผลปกติ

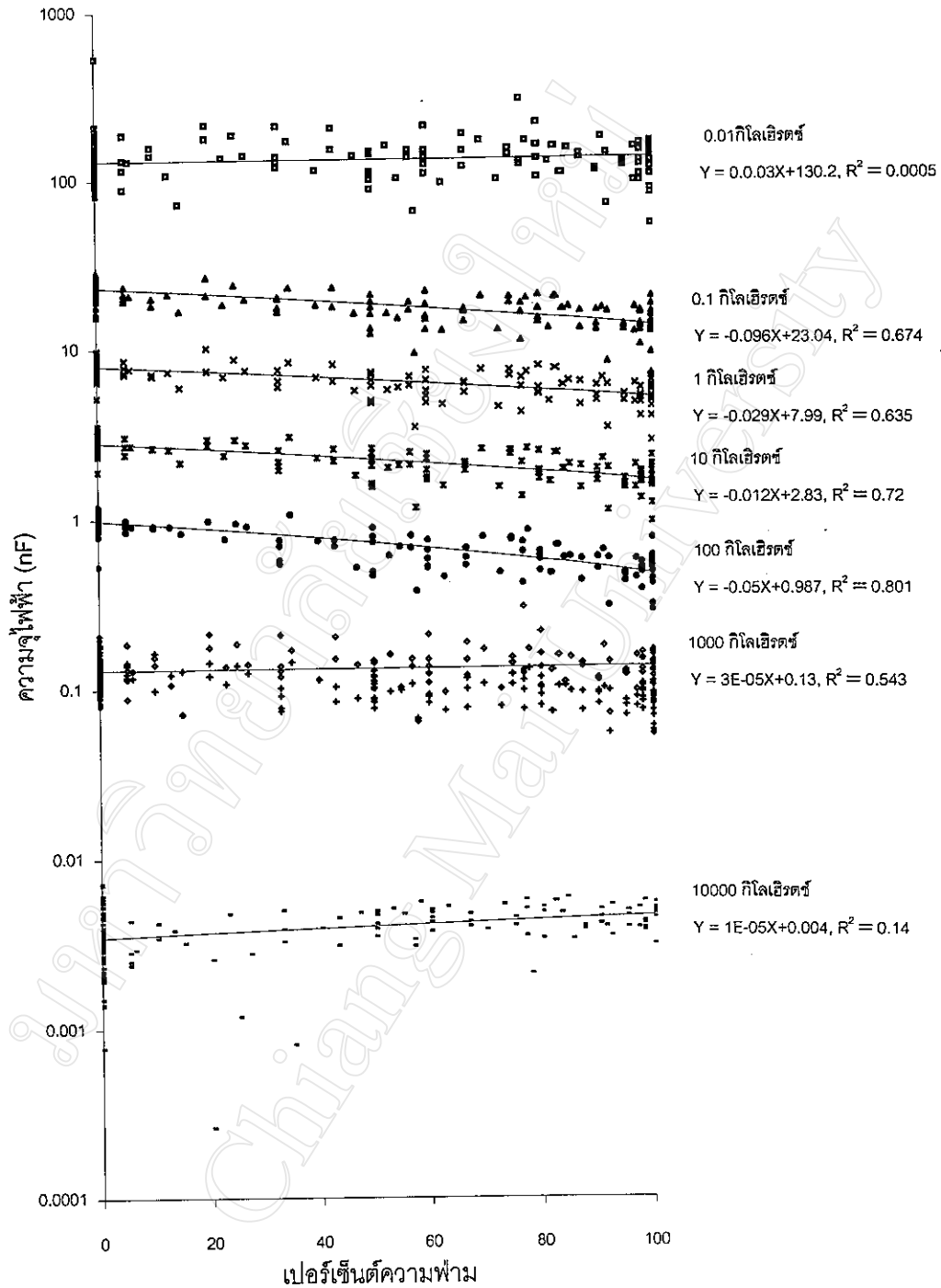


ภาพที่ 12 ความจุไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้า ในการวัดด้วย needle electrode

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับอาการฟ้ามที่วัดด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่าง พบว่าอาการฟ้ามมีความสัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยมีค่า  $R^2 = 0.670$  และรองลงมาที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่า  $R^2 = 0.556$  (ภาพที่ 13 และตารางภาคผนวกที่ 1) เมื่อเปลี่ยนเป็นการวัดความจุไฟฟ้าด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่าง พบว่าที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ อาการฟ้ามมีความสัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่าง โดยมีค่า  $R^2 = 0.802$  และรองลงมาที่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์เช่นกัน โดยมีค่า  $R^2 = 0.720$  (ภาพที่ 14 และตารางภาคผนวกที่ 1) และพบว่าความจุไฟฟ้าของผลฟ้าม 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับความจุไฟฟ้าของผลปกติที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และที่ความถี่ 10-100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าความจุไฟฟ้าของผลล้มฟ้าม 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลปกติ (ตารางที่ 1) หลังจากนั้นได้ทำการวัดด้วย plate electrode ที่ความถี่ช่วง 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับความจุไฟฟ้า โดยมีค่า  $R^2$  น้อยกว่า 0.1 แต่ที่ความถี่ 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับความจุไฟฟ้ามีแนวโน้มดีขึ้น โดยมีค่า  $R^2 = 0.54$  (ภาพที่ 15 และตารางภาคผนวกที่ 1) และจากตารางที่ 2 พบว่าที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ความจุไฟฟ้าของผลปกติมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับความจุไฟฟ้าของผลล้มฟ้าม 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป แต่ที่ความถี่ไฟฟ้า 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไม่พบทิศทางที่ชัดเจนของความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับความจุไฟฟ้าของผลปกติ



ภาพที่ 13 ความจุไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ความฟ้ามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10,000 กิโลเฮิรตซ์  
 ในการวัดด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม



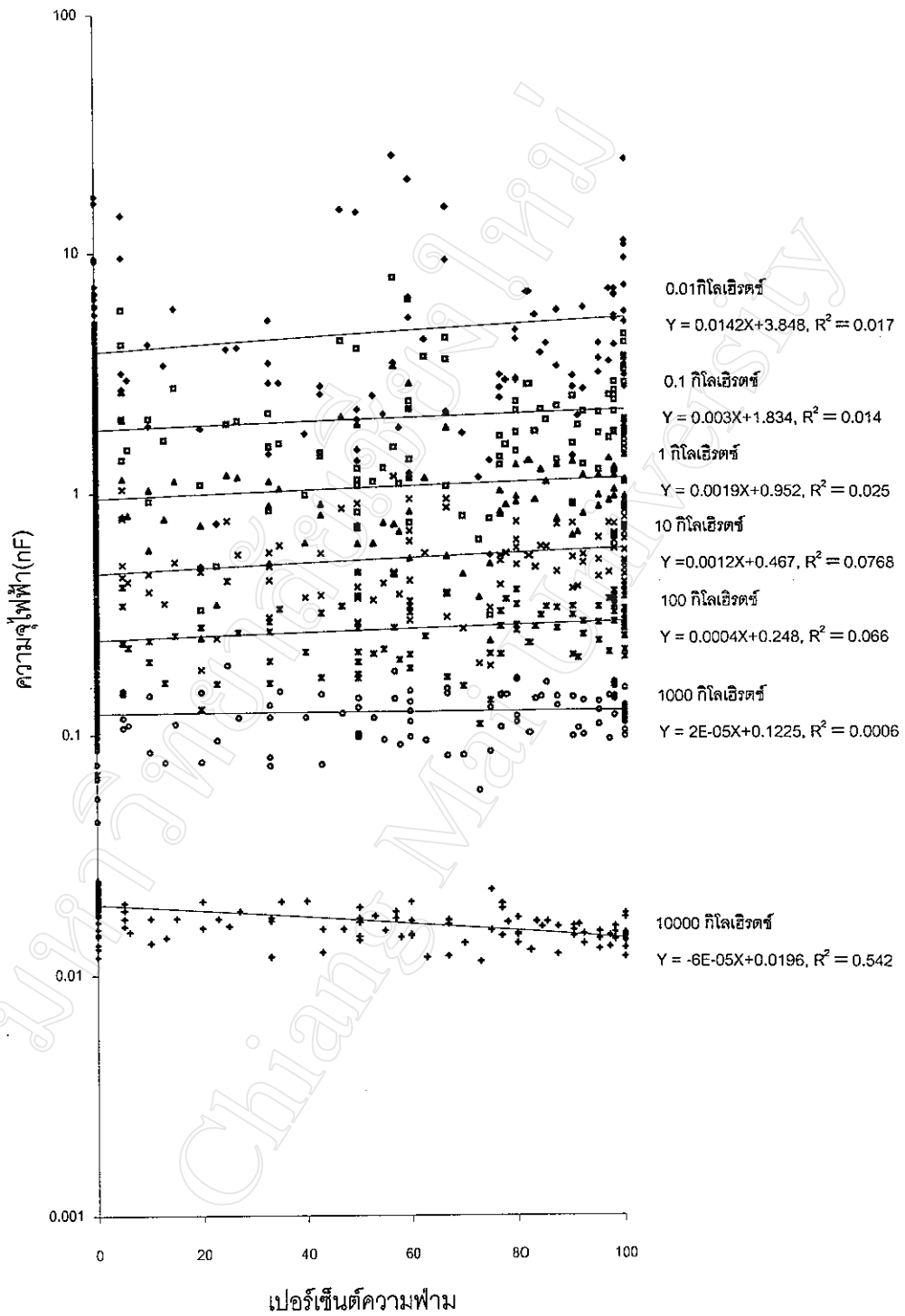
ภาพที่ 14 ความจุไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ความฟามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10,000 กิโลเฮิรตซ์  
 ในการวัดด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม

ตารางที่ 1 ความจุไฟฟ้า (nF) วัดด้วย needle electrode แบบไม่ก้าหนดระยะห่างเข็มกับระดับความฟ้าม ที่ความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความฟ้าม	จำนวน	ความถี่ไฟฟ้า (กิโลเฮิรตซ์)									
		0.01	0.1	1	10	100	1000	10000			
0	44	112.13±15.4 <sup>a</sup>	22.7±2.33 <sup>a</sup>	7.45±0.75 <sup>a</sup>	2.65±0.25 <sup>a</sup>	0.945±0.09 <sup>a</sup>	0.124±0.014 <sup>ns</sup>	5.24±1.32 <sup>a</sup>			
30	17	159.8±53.2 <sup>c</sup>	20.7±2.87 <sup>a</sup>	7.62±0.78 <sup>a</sup>	2.53±0.28 <sup>a</sup>	0.906±0.08 <sup>a</sup>	0.121±0.015 <sup>ns</sup>	2.38±1.45 <sup>c</sup>			
50	21	123.5±33.3 <sup>ab</sup>	17.6±2.48 <sup>b</sup>	6.33±0.9 <sup>b</sup>	2.09±0.31 <sup>b</sup>	0.629±0.12 <sup>b</sup>	0.153±0.275 <sup>ns</sup>	4.51±1.16 <sup>ab</sup>			
80	18	141.1±26.2 <sup>b</sup>	15.5±3.47 <sup>b</sup>	5.62±1.25 <sup>b</sup>	1.88±0.45 <sup>b</sup>	0.574±0.5 <sup>b</sup>	0.257±0.38 <sup>ns</sup>	3.97±1.16 <sup>bc</sup>			
100	30	112.5±32.7 <sup>a</sup>	12.88±2.98 <sup>c</sup>	4.83±1.0 <sup>c</sup>	1.6±0.34 <sup>c</sup>	0.489±0.11 <sup>c</sup>	0.117±0.185 <sup>ns</sup>	4.44±0.67 <sup>ab</sup>			

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้งต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P ≤ 0.05)

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P ≤ 0.05)



ภาพที่ 15 ความจุไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ความฟามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10,000 กิโลเฮิรตซ์  
ในการวัดด้วย plate electrode

ตารางที่ 2 ความจุไฟฟ้า (nF) วัดด้วย plate electrode กับระดับความฟาม ที่ความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความฟาม	จำนวน	ความถี่ไฟฟ้า (กิโลเฮิรตซ์)									
		0.01	0.1	1	10	100	1000	10000			
0	44	5.67 ± 5.55 <sup>a</sup>	2.29 ± 1.56 <sup>a</sup>	1.07 ± 0.54 <sup>ab</sup>	0.47 ± 0.13 <sup>a</sup>	0.247 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.121 ± 0.016 <sup>a</sup>	0.019 ± 0.002 <sup>a</sup>			
30	17	2.37 ± 1.56 <sup>ab</sup>	1.31 ± 0.51 <sup>ab</sup>	0.86 ± 0.23 <sup>a</sup>	0.52 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.278 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.126 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.018 ± 0.002 <sup>bc</sup>			
50	21	8.42 ± 9.49 <sup>ab</sup>	2.89 ± 2.51 <sup>ab</sup>	1.43 ± 0.97 <sup>ab</sup>	0.66 ± 0.26 <sup>b</sup>	0.311 ± 0.07 <sup>ab</sup>	0.132 ± 0.025 <sup>ab</sup>	0.017 ± 0.002 <sup>cd</sup>			
80	18	4.66 ± 4.41 <sup>ab</sup>	1.96 ± 1.43 <sup>ab</sup>	1.07 ± 0.61 <sup>ab</sup>	0.56 ± 0.16 <sup>ab</sup>	0.311 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.143 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.016 ± 0.001 <sup>cd</sup>			
100	30	6.43 ± 6.4 <sup>ab</sup>	2.51 ± 1.38 <sup>ab</sup>	1.25 ± 0.49 <sup>ab</sup>	0.62 ± 0.17 <sup>ab</sup>	0.304 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.128 ± 0.021 <sup>ab</sup>	0.015 ± 0.002 <sup>d</sup>			

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้งต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>ab</sup> ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )



จากผลการทดลอง ในการวัดความจุไฟฟ้าด้วย plate electrode นั้น การที่ไม่มีความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับความจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิรตซ์ นั้น ( $R^2$  น้อยกว่า 0.1) อาจเนื่องมาจาก การที่ผิวสัมผัสของ electrode เป็นโลหะไม่แนบสนิทกับผิวสัมผัสตลอดทั้งแผ่น เพราะตัวแผ่น electrode เป็นโลหะที่มีความแข็งพอสมควรความยืดหยุ่นค่อนข้างน้อย และลักษณะผิวสัมผัสไม่เรียบ ประกอบด้วยต่อมน้ำมันเป็นตุ่ม ๆ ทำให้ผิวเปลือกไม่เรียบ มีช่องอากาศมาขวางระหว่างผิว electrode และผิวสัมผัส และเป็นเพราะอิทธิพลของความจุไฟฟ้าของเปลือก ซึ่ง Kato (1987) ได้เสนอว่า ปัญหาในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลไม้ แบบไม่ทำลายนั้น สิ่งที่ต้องพบ คือ อิทธิพลของความจุไฟฟ้าของอากาศระหว่างผิวสัมผัสของ electrode และผิวของผลไม้ นอกจากนี้ผลไม้ซึ่งเปรียบเสมือน คาปาซิเตอร์ (ในการวัดความจุไฟฟ้า) จะมีค่าคาปาซิทีบ รีแอคแตนซ์ (Capacitive reactance,  $X_c$ ) ด้านการไหลของกระแสไฟฟ้า อยู่ค่าหนึ่งซึ่งค่า คาปาซิทีบ

รีแอคแตนซ์นี้ จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ดังสมการ

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (9)$$

เมื่อ  $X_c$  = คาปาซิทีบ รีแอคแตนซ์ มีหน่วยเป็น ohm

จากสมการ (9) จะเห็นได้ว่า ค่า  $X_c$  เป็นส่วนกลับของความถี่ไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าความถี่ไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ค่า  $X_c$  จะน้อยลง ในทางตรงข้าม ถ้าความถี่มีค่าน้อย  $X_c$  จะมีค่ามาก (มกคล, 2534) ซึ่งในการวัดความจุไฟฟ้าของส้มเขียวหวานพันธุ์พร้อมองต์นี้ยังไม่ทราบวงจรไฟฟ้าภายในผลส้มที่แน่นอนทำให้ไม่สามารถหาค่า  $X_c$  นี้ได้

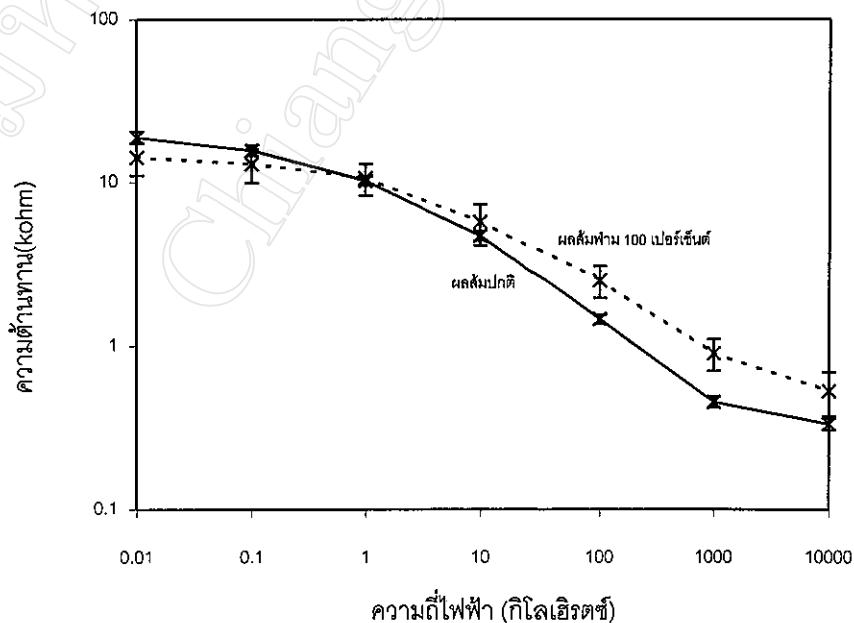
ส่วนการวัดความจุไฟฟ้าด้วย needle electrode นั้น เป็นการวัดที่ตัว electrode ทะลุผ่านเข้าไปสัมผัสกับเนื้อส้มโดยตรง ไม่มีช่องว่างอากาศระหว่าง electrode กับเนื้อส้ม ทำให้อาการฟ้ามเริ่มมีความสัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าตั้งแต่ความถี่ 0.1 - 100 กิโลเฮิรตซ์

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่าง needle electrode แบบกำหนดระยะห่างของเข็มกับไม่กำหนดระยะห่างของเข็มที่ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างอาการฟ้ามกับความจุไฟฟ้าของทั้งสอง electrode สูงสุด พบว่าในการวัดด้วย needle electrode ที่ไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม (แทงเข็มนำตรงข้ามกันของผล) จะมีความสัมพันธ์ระหว่างอาการฟ้ามกับความจุไฟฟ้าที่สูงกว่า ( $R^2 = 0.802$ ) การวัดด้วย needle electrode ที่

กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม ( $R^2 = 0.67$ ) ทั้งนี้คาดว่ามีความเสี่ยงจากการที่วัดด้วย needle electrode ที่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็มนั้น ประจุในบริเวณที่ electrode ครอบคลุมมีน้อยกว่า การวัดด้วย needle electrode ที่ไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม ที่เข็มแต่ละอันจะอยู่คนละด้านของผลส้มทำให้สามารถวัดความจุไฟฟ้าได้ทั่วทั้งผลมากกว่าการวัดด้วย needle electrode ที่กำหนดระยะห่าง ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการ (2) ( $C = \epsilon A/d$ ) ในการวัดด้วย needle electrode 2 แบบนั้น ความแตกต่างขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างระหว่าง electrode เป็นสำคัญ ทำให้ความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับความจุไฟฟ้าที่วัดด้วย needle electrode ทั้งสองแบบไม่เท่ากัน

## 2.2 ความต้านทาน

เมื่อวัดความต้านทานของผลส้มฟ้ามเปรียบเทียบกับผลส้มปกติพบว่า ความต้านทานของผลฟ้าม 100 เปอร์เซ็นต์มีค่ามากกว่าผลปกติ ที่ความถี่ช่วง 100 - 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ (ภาพที่ 16) ผลการทดลองสอดคล้องกับงานของ Kato (1987) ที่พบว่าความต้านทานในผลปกติของแพร์ แอปเปิ้ล และแตงโม มีความต้านทานมากกว่าผลที่เน่าหรือซ้ำที่ความถี่ 0.01 - 100 กิโลเฮิร์ตซ์ คาดว่าเกิดจากผลที่เน่าเสียผนังเซลล์จะถูกทำลาย ทำให้ความต้านทานต่ำกว่าผลปกติ ที่ผนังเซลล์ไม่ถูกทำลายและผลส้มฟ้ามจะมีผนังเซลล์หนากว่าผลปกติ (รวี, 2540 ก) ในขณะที่ผลส้มปกติมีผนังเซลล์บางกว่าและมีปริมาณน้ำในผลมากกว่า ซึ่งน้ำผลไม้เป็นสารไอออนโดยธรรมชาติมีการนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้มีความต้านทานของผลส้มฟ้ามมากกว่าผลส้มปกติ

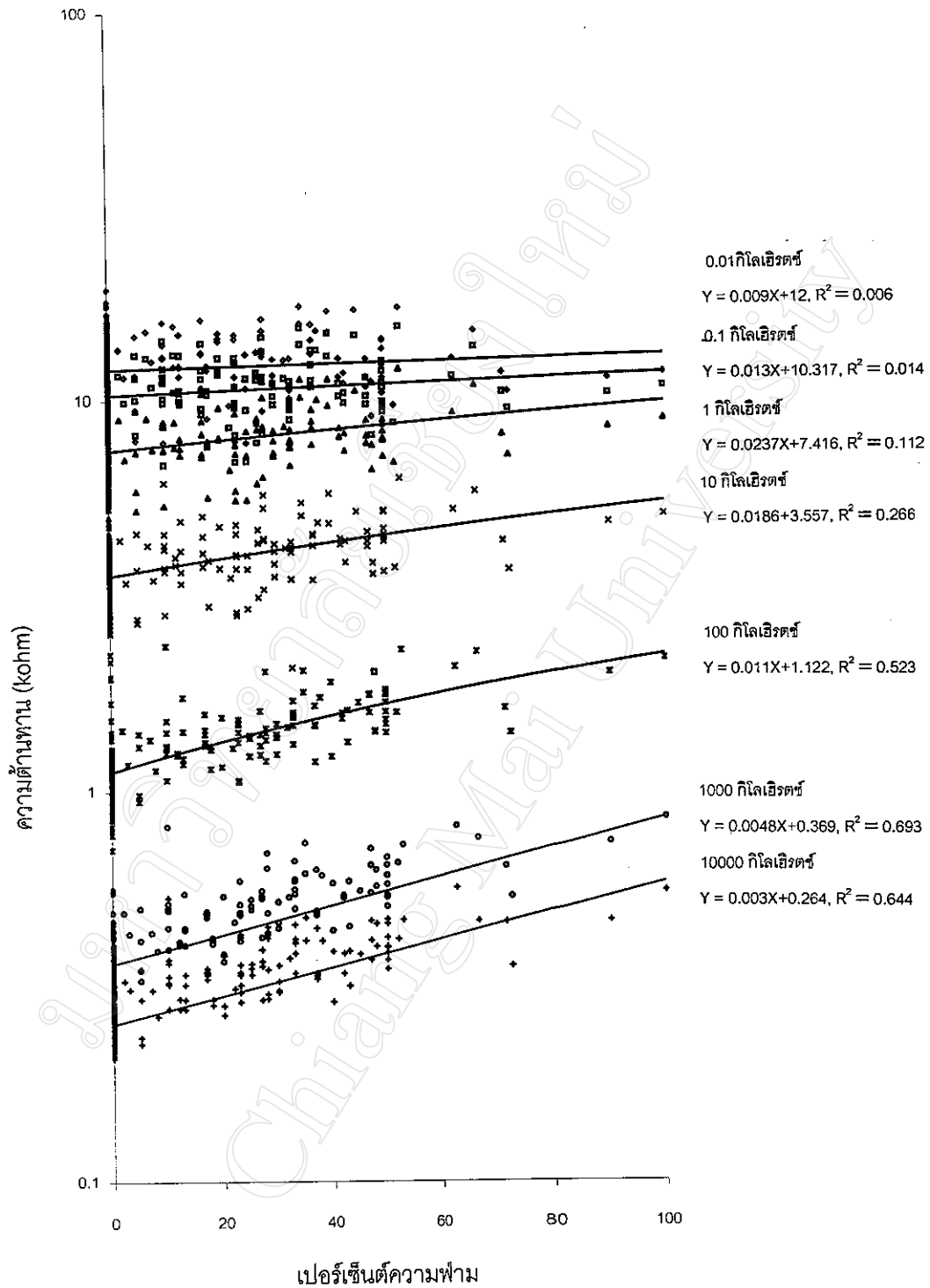


ภาพที่ 16 ความต้านทานและความถี่ไฟฟ้า ในการวัดด้วย needle electrode

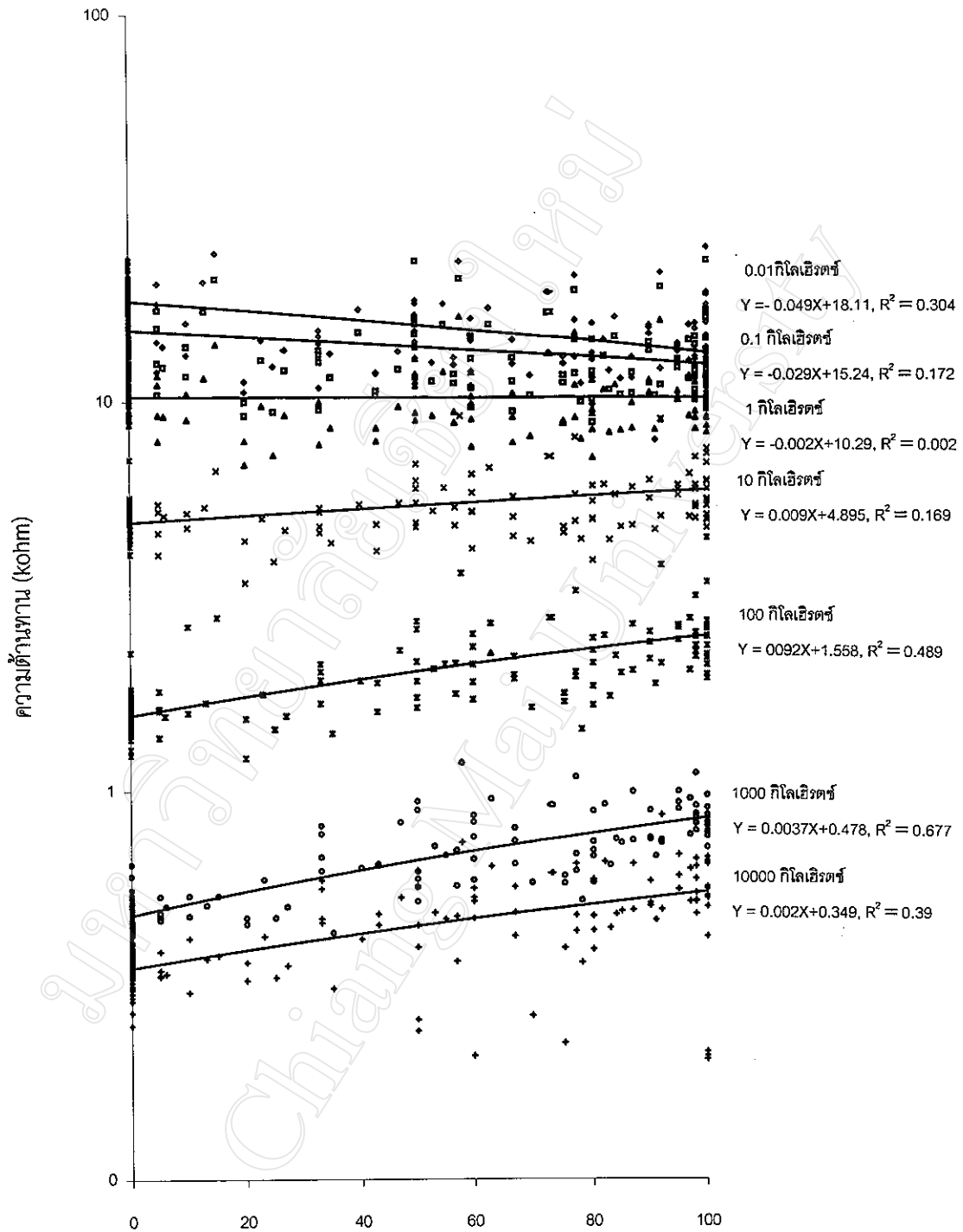
ในการศึกษาความสัมพันธ์ของความฟ้ามกับความต้านทานที่วัดด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม พบว่าความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับความต้านทานจะมีความสัมพันธ์กันมากที่สุดที่ความถี่ 1,000 กิโลเฮิรตซ์ มีค่า  $R^2 = 0.693$  รองลงมาที่ความถี่ 10,000 กิโลเฮิรตซ์ ค่า  $R^2 = 0.644$  (ภาพที่ 17 และตารางภาคผนวกที่ 2) ผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเปลี่ยนเป็นการวัดความต้านทานด้วย needle electrode ที่ไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็มพบว่า ที่ความถี่ 1,000 กิโลเฮิรตซ์ อาการฟ้ามมีความสัมพันธ์กับความต้านทานสูงสุด  $R^2 = 0.68$  รองลงมาที่ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ ค่า  $R^2 = 0.489$  (ภาพที่ 18 และตารางภาคผนวกที่ 2) และจากตารางที่ 3 พบว่าที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ความต้านทานของผลส้มปกติมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลส้มฟ้าม 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าเป็น 100 - 1,000 กิโลเฮิรตซ์ ความต้านทานของผลส้มปกติมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลส้มฟ้าม 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับการวัดด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม นั่นก็แสดงว่าในการวัดด้วย electrode แบบเข็มนั้น ไม่ว่าจะกำหนดระยะห่างระหว่างเข็มหรือไม่ ความต้านทานที่ได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอาการฟ้ามของส้มแล้ว ไม่แตกต่างกัน สามารถใช้ได้ทั้งสองแบบ

เมื่อเปลี่ยนเป็นการวัดด้วย plate electrode พบว่าที่ความถี่ตั้งแต่ 0.01 - 10,000 กิโลเฮิรตซ์ ความฟ้ามของส้มที่เพิ่มขึ้นไม่มีความสัมพันธ์กับความต้านทาน ค่า  $R^2$  ต่ำกว่า 0.1 (ภาพที่ 19 และตารางภาคผนวกที่ 2) สอดคล้องกับตารางที่ 4 พบว่า ที่ความถี่ 0.1 - 1,000 กิโลเฮิรตซ์ ความต้านทานของผลส้มปกติมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลส้มฟ้าม 100 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

การที่อาการฟ้ามไม่มีความสัมพันธ์กับความต้านทาน เมื่อทำการวัดด้วย plate electrode คาดว่า เกิดจากความถี่ไฟฟ้าที่ใช้วัดยังมีค่าต่ำเกินไปและมีชั้นของอากาศระหว่างผิวส้มกับ electrode เช่นเดียวกับการวัดความจุไฟฟ้า นอกจากข้อสันนิษฐานที่กล่าวมาแล้ว Thompson and Zachariah (1971 a) ยังได้อธิบายว่าปัญหาสำคัญที่จะพบในการวัดสภาพต้านทานของผลไม้ ในช่วงความถี่ 1 -  $10^6$  เฮิรตซ์ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่จุดสัมผัสระหว่างผิวของผลไม้ กับ electrode ซึ่งจะก่อให้เกิดสภาพต้านทานอีกค่าหนึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของชนิดของสารต่าง ๆ ของผลไม้กับ electrode และการที่อาการฟ้ามมีผลต่อความต้านทานในบางความถี่ไฟฟ้านั้น อาจเกิดจากเหตุผลเดียวกันกับความจุไฟฟ้า



ภาพที่ 17 ความต้านทานและเปอร์เซ็นต์ความฟามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์  
 ในการวัดด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม



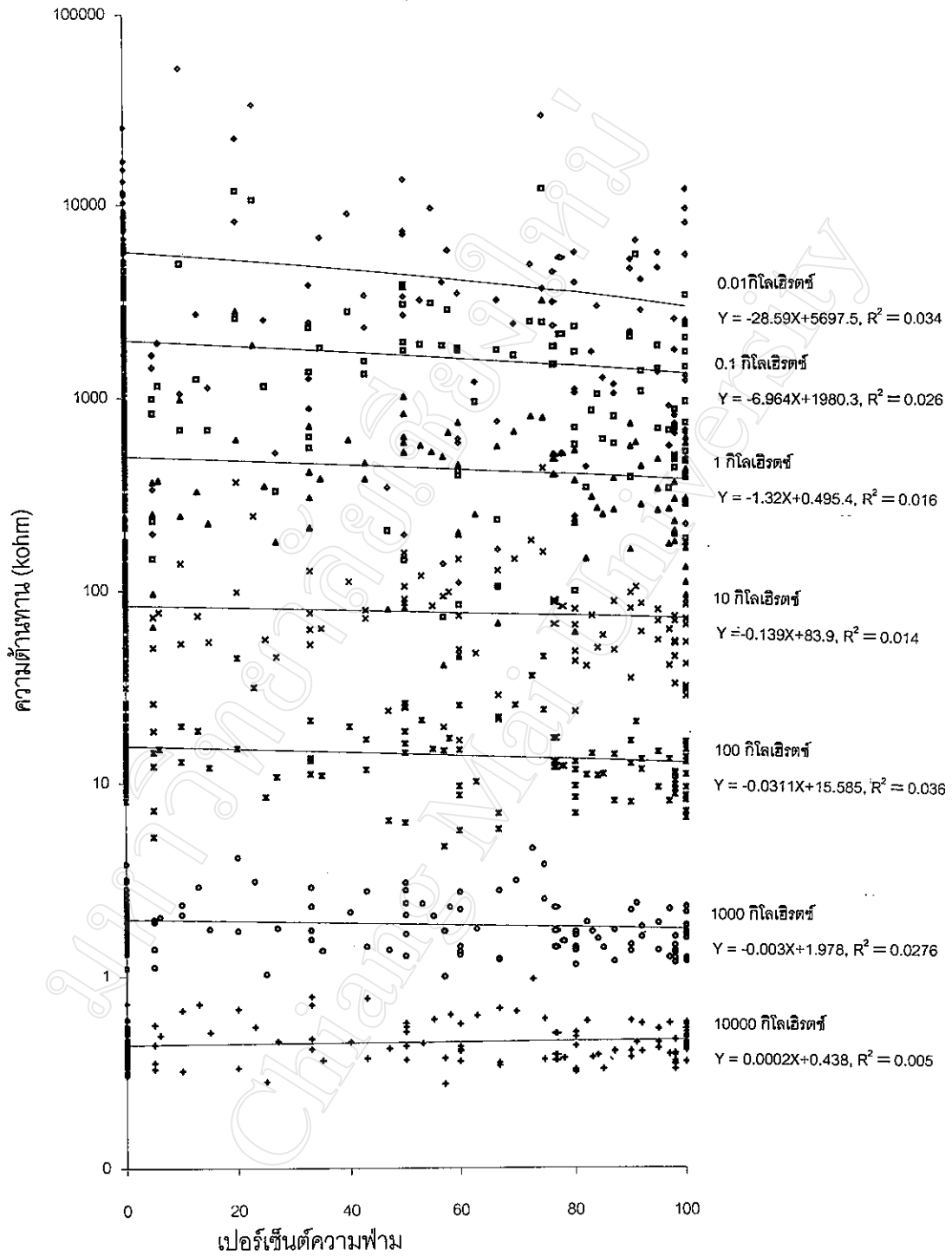
ภาพที่ 18 ความต้านทานและเปอร์เซ็นต์ความฟามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10000 กิโลเอมเพอร์  
 ในการวัดด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม

ตารางที่ 3 ความต้านทาน (kohm) วัดด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็มกับระดับความฟาม ที่ความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความฟาม	จำนวน	ความถี่ไฟฟ้า (กิโลเฮิรตซ์)									
		0.01	0.1	1	10	100	1000	10000			
0	44	15.77 ± 1.5 <sup>a</sup>	15.55 ± 4.7 <sup>a</sup>	12.1 ± 1.35 <sup>ns</sup>	4.87 ± 0.41 <sup>a</sup>	1.51 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.46 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.339 ± 0.027 <sup>a</sup>			
30	17	13.5 ± 4.9 <sup>b</sup>	15.5 ± 4.9 <sup>b</sup>	9.94 ± 1.2 <sup>ns</sup>	5.15 ± 1.01 <sup>a</sup>	1.95 ± 0.64 <sup>b</sup>	0.589 ± 0.15 <sup>b</sup>	0.4 ± 0.094 <sup>b</sup>			
50	21	13.8 ± 4.97 <sup>b</sup>	13.3 ± 4.8 <sup>b</sup>	11.3 ± 3.02 <sup>ns</sup>	5.82 ± 1.38 <sup>b</sup>	2.27 ± 0.62 <sup>c</sup>	0.76 ± 0.23 <sup>c</sup>	0.502 ± 0.13 <sup>c</sup>			
80	18	11.1 ± 3.23 <sup>c</sup>	10.5 ± 2.36 <sup>c</sup>	9.98 ± 1.2 <sup>ns</sup>	5.3 ± 1.27 <sup>a</sup>	2.04 ± 0.59 <sup>bc</sup>	0.713 ± 0.2 <sup>c</sup>	0.468 ± 0.11 <sup>c</sup>			
100	30	13.3 ± 4.8 <sup>b</sup>	12 ± 4.06 <sup>b</sup>	10.6 ± 2.1 <sup>ns</sup>	6.01 ± 1.06 <sup>b</sup>	2.55 ± 0.49 <sup>d</sup>	0.91 ± 0.21 <sup>d</sup>	0.582 ± 0.13 <sup>c</sup>			

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวดังข้างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ )



ภาพที่ 19 ความต้านทานและเปอร์เซ็นต์ความฟามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10000 กิโลเฮิร์ตซ์ ในการวัดด้วย plate electrode

ตารางที่ 4 ความต้านทาน (kohm) วัดด้วย plate electrode กับระดับความฟาม ที่ความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความฟาม	จำนวนผล	ความถี่ไฟฟ้า (กิโลเฮิรตซ์)									
		0.01	0.1	1	10	100	1000	10000			
0	44	6307±6477 <sup>ab</sup>	2182±1736 <sup>a</sup>	546±480 <sup>ns</sup>	77.1±38.5 <sup>a</sup>	14.3±4.7 <sup>a</sup>	1.77±0.36 <sup>a</sup>	0.39±0.061 <sup>ab</sup>			
30	17	9801 ±8836 <sup>a</sup>	1836±1745 <sup>ab</sup>	410±320 <sup>ns</sup>	71.2±36.2 <sup>a</sup>	12.8±4.1 <sup>ab</sup>	1.73±0.304 <sup>a</sup>	0.419±0.08 <sup>b</sup>			
50	21	4074±4017 <sup>ab</sup>	1595±1487 <sup>abc</sup>	372±260 <sup>ns</sup>	68.1±36.1 <sup>ab</sup>	12.2±5.3 <sup>abc</sup>	1.656±0.46 <sup>ab</sup>	0.41±0.094 <sup>b</sup>			
80	18	2495±2328 <sup>b</sup>	1145±915 <sup>bc</sup>	355 ±191 <sup>ns</sup>	65.6±21.7 <sup>ab</sup>	10.72±3.1 <sup>bc</sup>	1.386±0.32 <sup>bc</sup>	0.357±0.05 <sup>a</sup>			
100	30	2229±1987 <sup>b</sup>	802±771 <sup>c</sup>	233±165 <sup>ns</sup>	50±21.9 <sup>b</sup>	10±3.14 <sup>c</sup>	1.478±0.35 <sup>c</sup>	0.415±0.07 <sup>b</sup>			

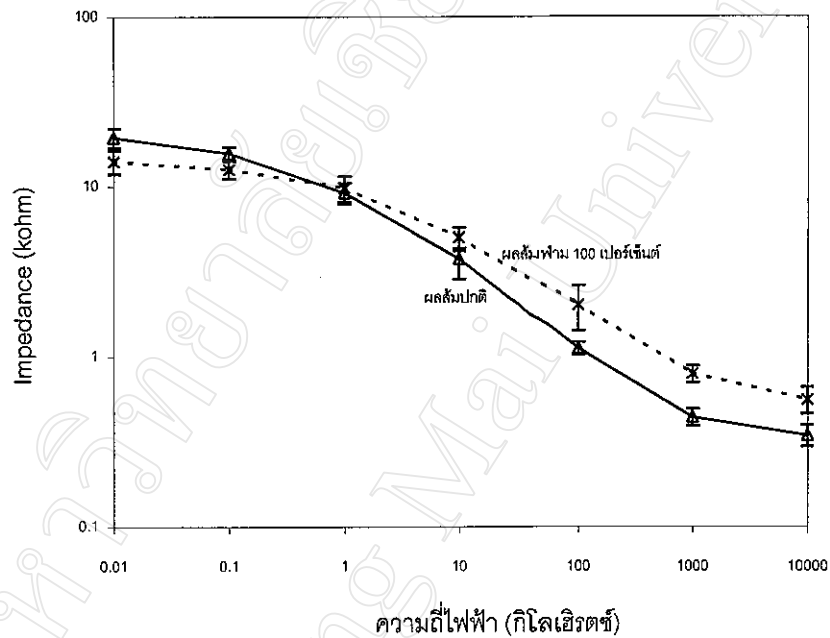
หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้งต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )



### 2.3 Impedance

เมื่อวัด Impedance ของผลส้มฟ้ามเปรียบเทียบกับผลส้มปกติ พบว่า Impedance ของผลส้มฟ้าม 100 เปอร์เซ็นต์มีค่ามากกว่าผลส้มปกติ ในช่วงความถี่ 10 – 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ (ภาพที่ 20) ผลการทดลองสอดคล้องกับงานของ Kato (1987) ที่วัด Impedance ของแพร์พบว่า Impedance ของผลปกติมีค่ามากกว่าผลที่เน่า ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากสาเหตุเดียวกันกับความต้านทาน



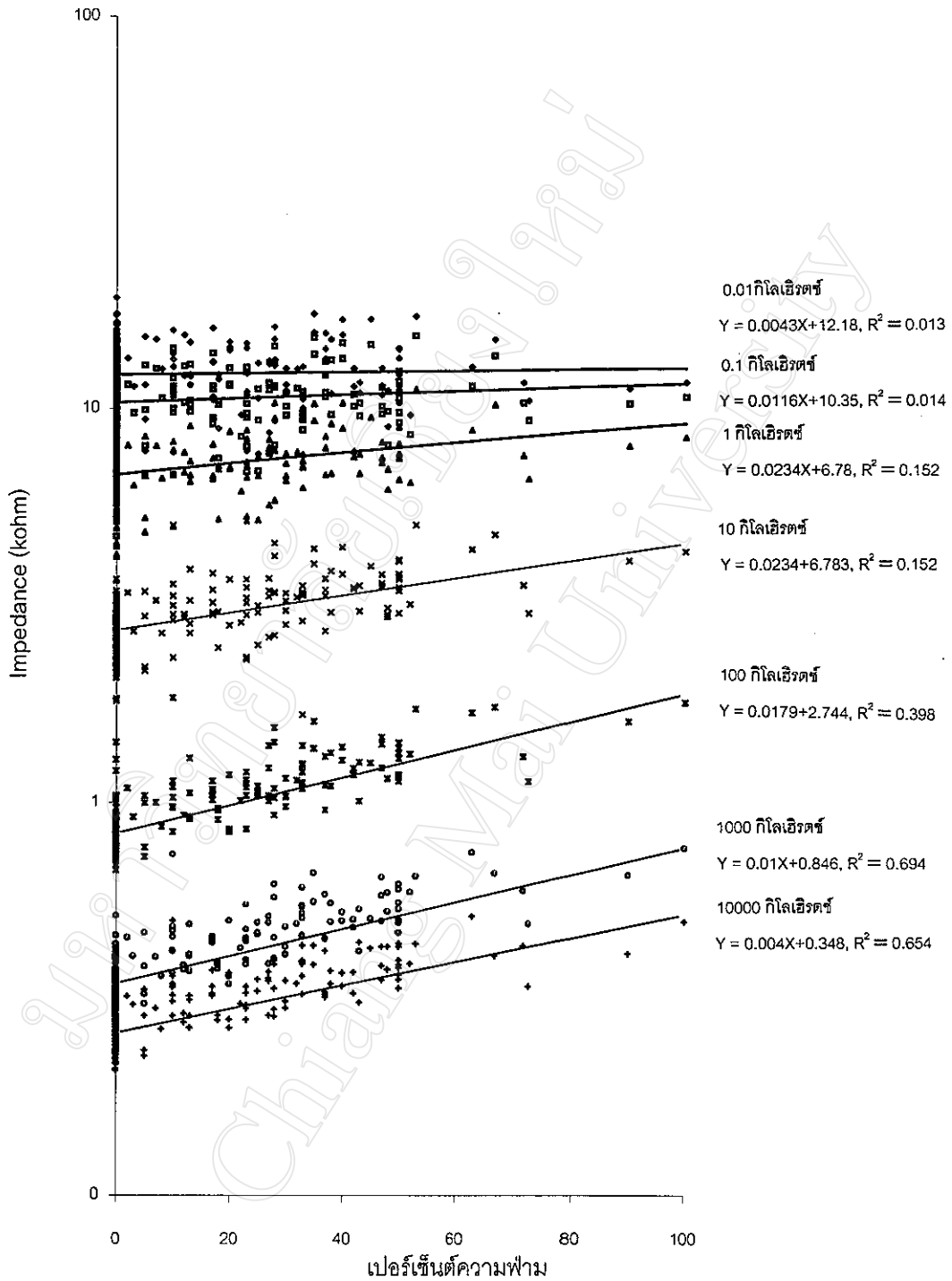
ภาพที่ 20 Impedance และความถี่ไฟฟ้า ในการวัดด้วย needle electrode

ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอาการฟ้ามกับ impedance ด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม พบว่ามีสัมพันธ์ที่ความถี่ 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ สูงสุด ค่า  $R^2 = 0.694$  รองลงมาที่ความถี่ไฟฟ้า 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่า  $R^2 = 0.654$  (ภาพที่ 21 และตารางภาคผนวกที่ 3) เมื่อเปลี่ยนเป็น needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม พบว่าที่ความถี่ไฟฟ้า 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ อาการฟ้ามมีความสัมพันธ์กับ impedance มากที่สุด ค่า  $R^2 = 0.639$  รองลงมาที่ความถี่ไฟฟ้า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่า  $R^2 = 0.611$  (ภาพที่ 22 และตารางภาคผนวกที่ 3) และจากตารางที่ 5 พบว่าที่ความถี่ไฟฟ้า 10 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์ impedance ของผลปกติมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลฟ้าม 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า 1,000 – 10,000 กิโลเฮิร์ตซ์ impedance ของผลปกติมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ impedance ของผลฟ้าม 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับค่า impedance ของการวัดด้วย needle electrode ทั้งสองแบบ พบว่า มีความสัมพันธ์กันมากที่สุดที่ความถี่ไฟฟ้า 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ทั้งสองแบบ โดยให้ค่า  $R^2$  ไม่แตกต่างกัน (0.694 สำหรับ needle electrode แบบกำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม และ 0.639 สำหรับ needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม) และมีแนวโน้มของความสัมพันธ์คล้ายกับความต้านทาน (ภาพที่ 9, 10 และ 11) อาจถือได้ว่าความต้านทานมีผลต่อค่า Impedance มากกว่าความจุไฟฟ้า

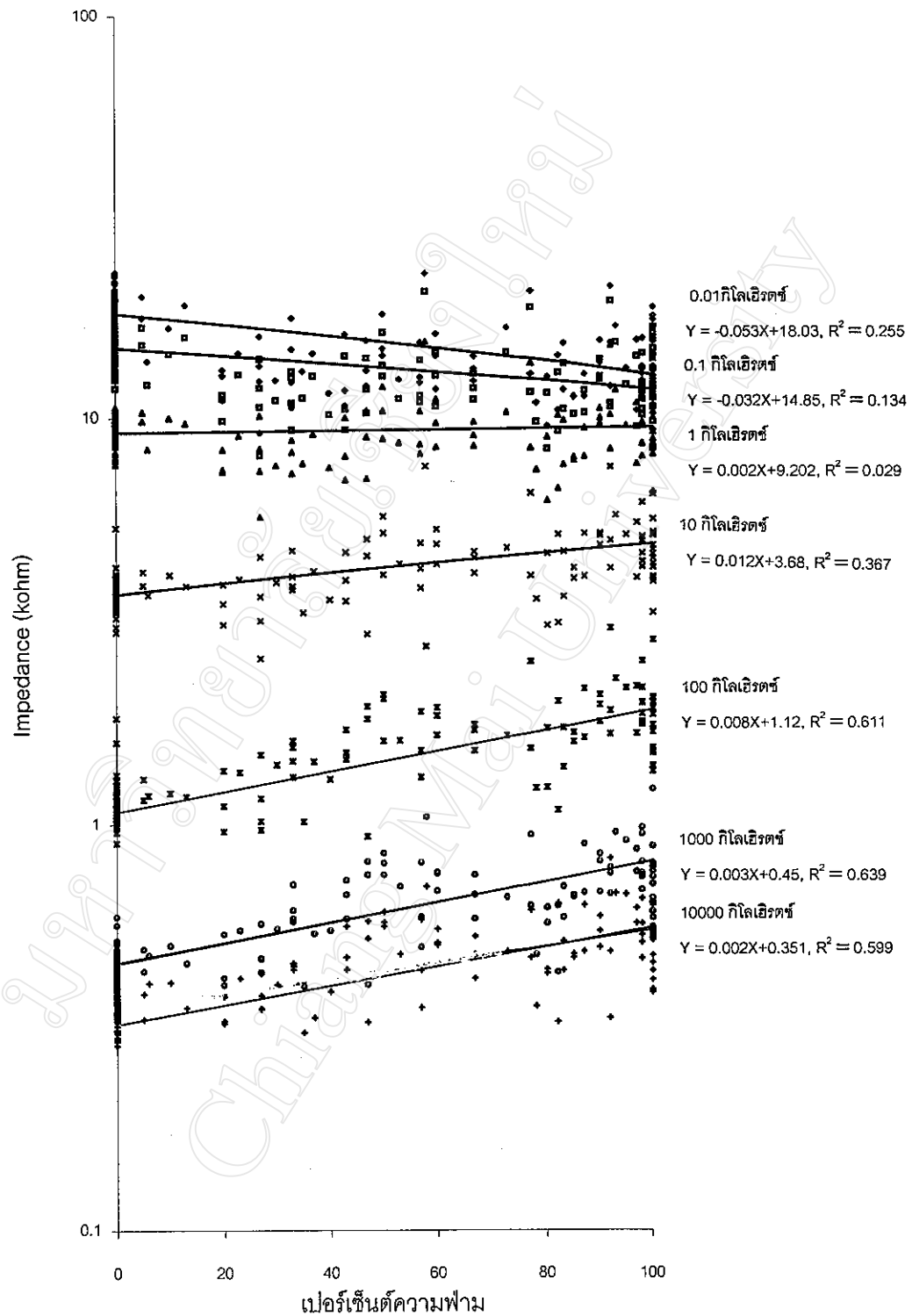
สำหรับการวัดด้วย plate electrode พบว่า อาการฟ้ามไม่มีความสัมพันธ์กับ impedance ในทุกความถี่ไฟฟ้าโดย  $R^2$  ต่ำกว่า 0.1 (ภาพที่ 23 และตารางภาคผนวกที่ 3) สอดคล้องกับผลในตารางที่ 6 พบว่าในทุกความถี่ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.01 – 10000 กิโลเฮิร์ตซ์ impedance ของผลผิดปกติไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลฟ้าม

ความแตกต่างของผลที่ได้จากการวัดด้วย plate electrode และ needle electrode ทั้งสองแบบ คาดว่าเกิดจากเหตุผลเดียวกับความต้านทานโดยเฉพาะเรื่องอิทธิพลของเปลือก

จากการวัดด้วย electrode ทั้งสามแบบพบว่าในแต่ละความถี่ ความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามกับ impedance ไม่เท่ากัน คาดว่าเกิดจากเหตุผลเดียวกับความจุไฟฟ้าและความต้านทาน คือเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ได้จากช่วงคลื่นต่าง ๆ ไม่เท่ากันในแต่ละความถี่ไฟฟ้า ทำให้ความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามต่อค่า impedance ในแต่ละช่วงความถี่ไฟฟ้าไม่เท่ากัน



ภาพที่ 21 Impedance และเปอร์เซ็นต์ความฟ้าม ในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10000 กิโลเฮิรตซ์ ในการวัดด้วย needle electrode แบบกำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม



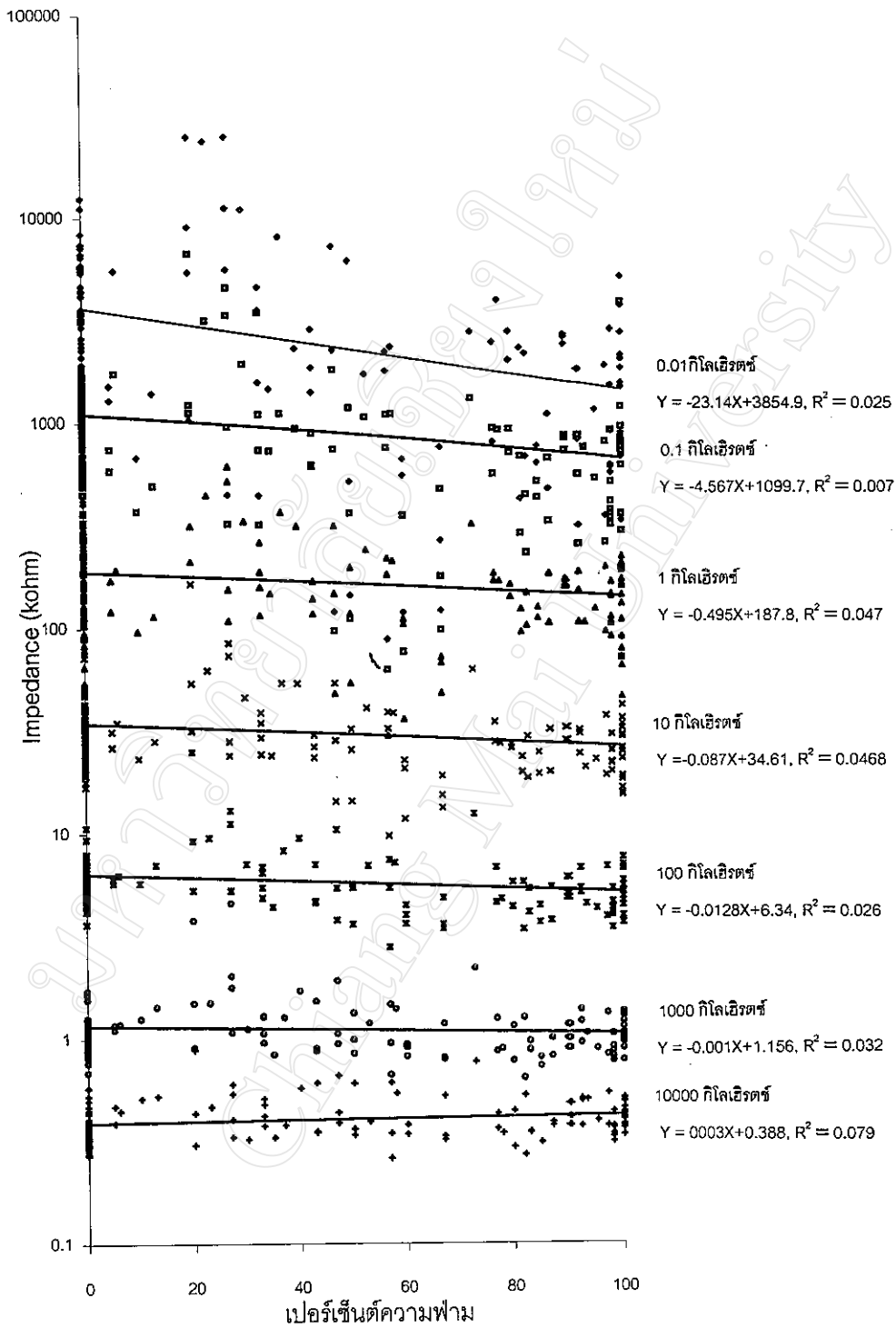
ภาพที่ 22 ค่า Impedance และเปอร์เซ็นต์ความฟ้ามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10000 กิโลเฮิรตซ์ ในการวัดด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็ม

ตารางที่ 5 Impedance (kohm) วัดด้วย needle electrode แบบไม่กำหนดระยะห่างระหว่างเข็มกับระดับความฟ้าม ที่ความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความฟ้าม	จำนวน	ความถี่ไฟฟ้า (กิโลเฮิรตซ์)										
		0.01	0.1	1	10	100	1000	10000				
0	ผล											
0	44	14.04±2.99 <sup>a</sup>	12.9±2.27 <sup>a</sup>	9.42±1.24 <sup>a</sup>	3.76±0.62 <sup>a</sup>	1.14±0.13 <sup>a</sup>	0.44±0.05 <sup>a</sup>	0.35±0.039 <sup>a</sup>				
30	17	13.41±2.48 <sup>b</sup>	11.6±2.05 <sup>b</sup>	8.38±1.4 <sup>b</sup>	3.76±0.59 <sup>a</sup>	1.26±0.24 <sup>a</sup>	0.51±0.11 <sup>a</sup>	0.37±0.07 <sup>a</sup>				
50	21	13.9±2.32 <sup>b</sup>	12.5±2.16 <sup>b</sup>	9.29±1.7 <sup>b</sup>	4.49±0.91 <sup>b</sup>	1.65±0.38 <sup>b</sup>	0.68±0.15 <sup>b</sup>	0.485±0.09 <sup>b</sup>				
80	18	13.08±3.03 <sup>b</sup>	11.7±2.82 <sup>b</sup>	8.98±2.1 <sup>ab</sup>	4.41±1.15 <sup>b</sup>	1.68±0.51 <sup>b</sup>	0.66±0.18 <sup>b</sup>	0.49±0.12 <sup>b</sup>				
100	30	13.9±2.7 <sup>b</sup>	12.55±2.42 <sup>b</sup>	9.66±1.78 <sup>a</sup>	4.85±0.87 <sup>b</sup>	1.9±0.4 <sup>c</sup>	0.77±0.17 <sup>c</sup>	0.55±0.10 <sup>c</sup>				

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้งต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P ≤ 0.05)

<sup>ab</sup> ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P ≤ 0.05)



ภาพที่ 23 ค่า Impedance และเปอร์เซ็นต์ความฟามในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10000 กิโลเฮิรตซ์  
 ในการวัดด้วย plate electrode

ตารางที่ 6 Impedance (kohm) วัดด้วย plate electrode กับระดับความฟ้าม ที่ความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความฟ้าม	จำนวน ผล	ความถี่ไฟฟ้า (กิโลเฮิรตซ์)									
		0.01	0.1	1	10	100	1000	10000			
0	44	2731±2648 <sup>a</sup>	1023±961 <sup>ns</sup>	149.8±105 <sup>a</sup>	30.4±13.7 <sup>ab</sup>	6.09±1.92 <sup>ns</sup>	1.119±0.26 <sup>ab</sup>	0.39±0.07 <sup>ab</sup>			
30	17	5419±4651 <sup>ab</sup>	1449±1295 <sup>ns</sup>	189.3±102 <sup>b</sup>	37.8±19.6 <sup>b</sup>	6.46 ±2.45 <sup>ns</sup>	1.38 ±1.31 <sup>b</sup>	0.397±0.09 <sup>ab</sup>			
50	21	5259±5039 <sup>ab</sup>	1176±1648 <sup>ns</sup>	210±207 <sup>ab</sup>	36.1±33.6 <sup>b</sup>	6.58±4.7 <sup>ns</sup>	1.13 ±0.37 <sup>ab</sup>	0.45±0.17 <sup>b</sup>			
80	18	2645±2031 <sup>a</sup>	764±428 <sup>ns</sup>	154 ±50.2 <sup>a</sup>	27.2±7.61 <sup>a</sup>	5.16±1.43 <sup>ns</sup>	0.998±0.27 <sup>a</sup>	0.38±0.09 <sup>a</sup>			
100	30	2843±2498 <sup>a</sup>	870±746 <sup>ns</sup>	155±80.5 <sup>b</sup>	27.9±11.4 <sup>ab</sup>	5.32±1.75 <sup>ns</sup>	1.049±0.27 <sup>ab</sup>	0.415±0.08 <sup>ab</sup>			

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้งต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P ≤ 0.05)

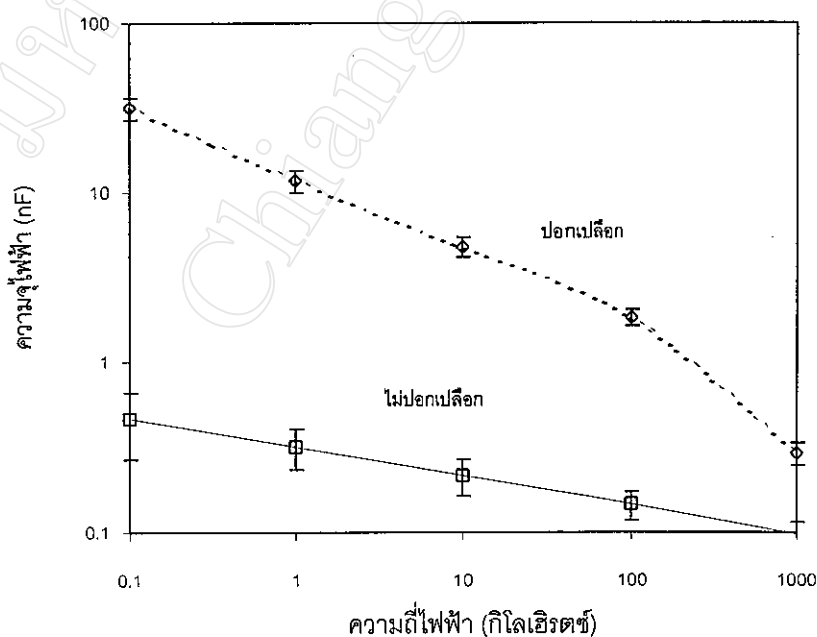
<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P ≤ 0.05)

### ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลเปลือกต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

จากผลการศึกษาในตอนต้นที่ 2 พบว่าในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย electrode แบบไม่ทำลาย ปัญหาที่อาการฟ้ามไม่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าสันนิษฐานว่ามีสาเหตุจากอิทธิพลของเปลือก ในการศึกษาตอนที่ 3 นี้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเปลือกต่อคุณสมบัติไฟฟ้า โดยวัดความจุไฟฟ้าและความต้านทานในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.1-1000 กิโลเฮิรตซ์ และวัดด้วย plate electrode

#### 1. ความจุไฟฟ้า

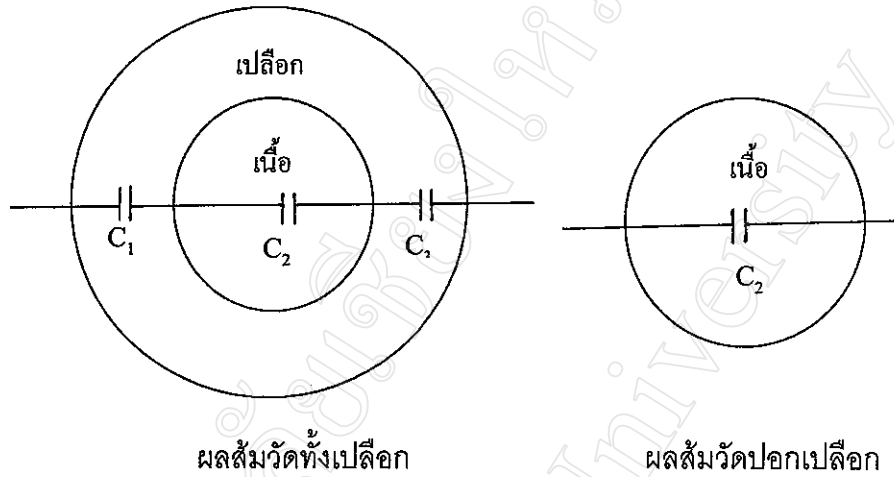
อิทธิพลของเปลือกที่มีต่อความจุไฟฟ้ามีมากในช่วงความถี่ไฟฟ้าต่ำและจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าในการวัด และถ้าเพิ่มความถี่ไฟฟ้ามากกว่า 1,000 กิโลเฮิรตซ์ อิทธิพลของเปลือกต่อความจุไฟฟ้า อาจลดลงจนไม่มีผล โดยเปลือกจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยลง (ภาพที่ 24) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Kato (1987) ซึ่งได้ทดลองเรื่องอิทธิพลของเปลือกในแอมเปิลต่อความจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ไฟฟ้า 0.01 - 10000 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าอิทธิพลของเปลือกทำให้ความจุไฟฟ้าลดลงและอิทธิพลของเปลือกจะลดลงเมื่อความถี่ไฟฟ้ามากกว่า 1000 กิโลเฮิรตซ์ จนกระทั่งไม่มีผลต่อความจุไฟฟ้า



ภาพที่ 24 ความจุไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าของสัมปทิตวัดทั้งเปลือกและสัมที่เปลือกเปลือก



เมื่อพิจารณาโครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของผลลึ้มในการวัดความจุไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่าง การวัดทั้งเปลือกและวัดปกเปลือกดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 แบบจำลองการวัดความจุไฟฟ้าในการวัดผลลึ้มทั้งเปลือกและผลลึ้มปกเปลือก

จากการวัดทั้งเปลือกจะเห็นว่า  $C_T$  เป็นค่ารวมของ  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ต่อแบบอนุกรมกัน เมื่อหาค่า  $C_T$  จะได้ว่า

$$C_T = \frac{C_1 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}}{C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}$$

ให้  $C_1 = C_3$  เพราะเป็นความจุไฟฟ้าของเปลือก

$$C_T = \frac{C_2 C_1^2}{C_1 C_2 + C_1 C_2 + C_1^2} = \frac{C_2 C_1^2}{2C_2 C_1 + C_1^2}$$

$$C_T = \frac{C_2 C_1}{2C_2 + C_1} \quad (10)$$

เมื่อ  $C_T$  = ความจุไฟฟ้ารวมทั้งผล

$C_1$  = ความจุไฟฟ้าของเปลือก

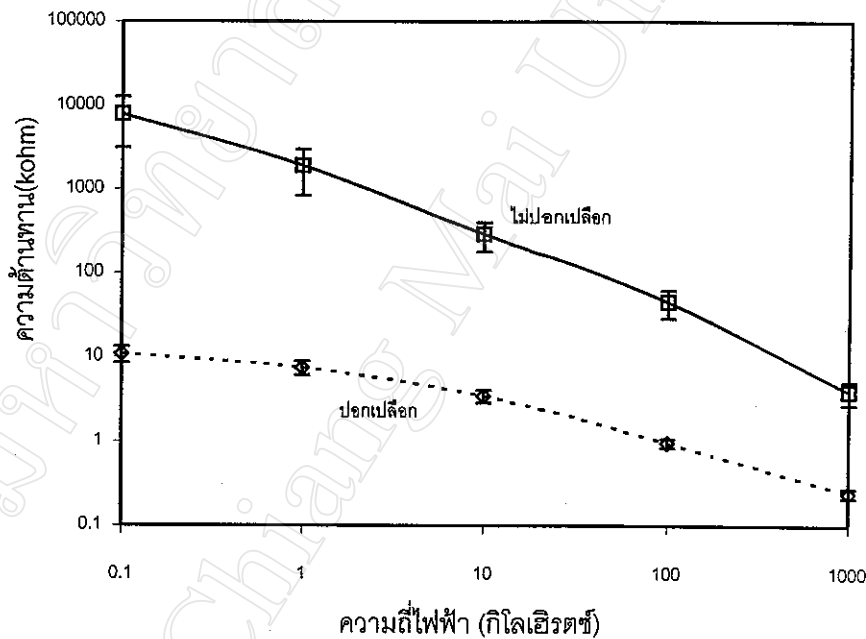
$C_2$  = ความจุไฟฟ้าของเนื้อ

จากสมการ (10) พบว่า ถ้า  $C_1$  น้อยกว่า  $C_2$  มากๆ แล้ว  $C_T$  จะมีค่าครึ่งหนึ่งของ  $C_1$  หรือมีค่าใกล้เคียงกับ  $C_1$  มากกว่า  $C_2$  และเมื่อพิจารณาสมการความจุไฟฟ้า พบว่าค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวัดความจุไฟฟ้าทั้งเปลือกและปอกเปลือกคือค่า  $\epsilon$  กรณีพิจารณาถึงองค์ประกอบของผลส้มทำให้ได้ผลลัพธ์ว่า ส่วนที่เป็นเนื้อส้มมีน้ำเป็นองค์ประกอบมาก ดังนั้นเนื้อส้มจึงมีค่า  $\epsilon$  ใกล้เคียงกับน้ำคือ 78 และส่วนของเปลือกส้มซึ่งประกอบด้วยต่อมน้ำมันเป็นส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับขี้ผึ้งโดยมีค่า  $\epsilon$  ประมาณ 2.7 (สมเกียรติ, 2527; ทวี, 2538) จากเหตุผลดังกล่าวพบว่า ค่า  $\epsilon$  ของเปลือกและเนื้อส้มมีค่าแตกต่างกันมากเป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของเปลือกส้ม ( $C_1$ ) มีค่าน้อยกว่าความจุไฟฟ้าของเนื้อส้ม ( $C_2$ ) มาก ดังนั้นจากสมการ (10) เมื่อทำการวัดความจุไฟฟ้าของผลส้มทั้งเปลือกจึงเป็นเสมือนการวัดความจุไฟฟ้าของเปลือก ( $C_1$ ) เท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้ค่า  $\epsilon$  เปลี่ยนไป ผลที่ตามมาคือค่าความจุไฟฟ้าของเปลือกส้มจะมีค่ามากขึ้นจนใกล้เคียงกับความจุไฟฟ้าของเนื้อส้ม เป็นเหตุให้ความจุไฟฟ้าของเปลือกส้มมีอิทธิพลต่อการวัดความจุไฟฟ้าของผลส้มทั้งผลน้อยลง สอดคล้องกับผลการทดลองในตอนที่ 2 พบว่าในการวัดด้วย plate electrode เมื่อความถี่ไฟฟ้าเพิ่มถึง 10,000 กิโลเฮิรตซ์ ความสัมพันธ์ของความฟ้ามกับความจุไฟฟ้ามีค่าสูง และถ้าเพิ่มความถี่ไฟฟ้าสูงกว่า 10,000 กิโลเฮิรตซ์แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างความฟ้ามกับความจุไฟฟ้าน่าจะดีขึ้นตามไปด้วย และสูงกว่าผลการทดลอง

ตอนที่ 2

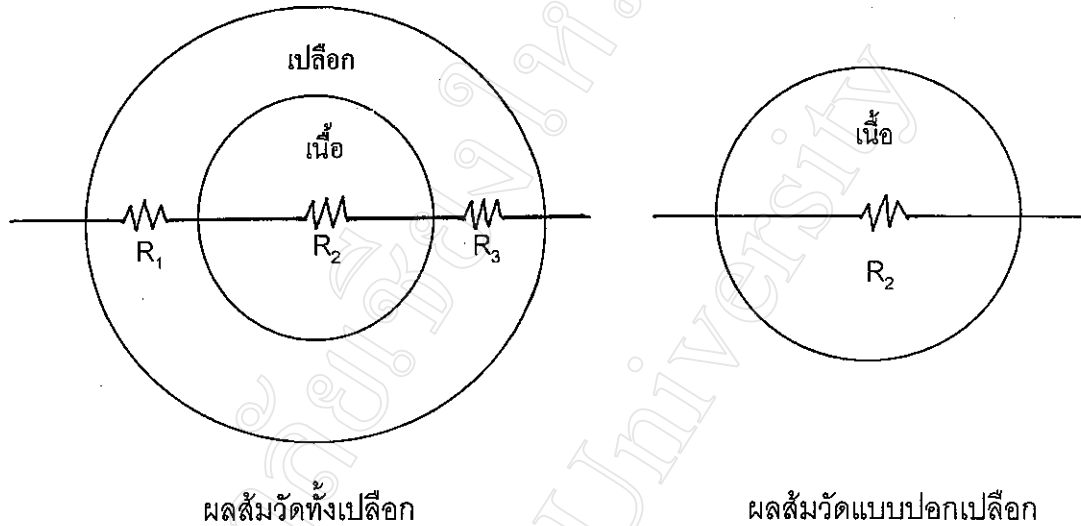
## 2. ความต้านทาน

สำหรับอิทธิพลเปลือกที่มีต่อความต้านทาน มีมากในช่วงความถี่ไฟฟ้าต่ำแต่เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้ามากขึ้นอิทธิพลของเปลือกจะลดลง และมีแนวโน้มลดลงจนไม่มีความสำคัญ เมื่อความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 26) อิทธิพลของเปลือกทำให้ความต้านทานมีค่าลดลงเมื่อวัดความต้านทานสัมผัสโดยปกเปลือก ซึ่งอาจเกิดจากเปลือกเป็นตัวต้านทานที่สำคัญ เป็นด่านแรกที่ต้านทานสิ่งต่าง ๆ ที่จะผ่านไปสู่น้ำสัมผัส ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kato (1987) ที่ได้ทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลเปลือกในแอบเปิ้ลต่อความต้านทาน ซึ่งพบว่าอิทธิพลของเปลือกมีมากในช่วงความถี่ 0.01 – 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์อิทธิพลของเปลือกมีค่าลดลงจนไม่มีความสำคัญ แต่ในผลสัมผัสที่ทำการทดลองนี้ ความถี่ไฟฟ้าต้องมากกว่า 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงจะสามารถลดอิทธิพลของเปลือกได้



ภาพที่ 26 ความต้านทานและความถี่ไฟฟ้า ของผลสัมผัสวัดทั้งเปลือกและวัดแบบปกเปลือก

เมื่อพิจารณาแบบจำลองการวัดความต้านทานไฟฟ้า ระหว่างการวัดผลลัมทั้งเปลือกและการวัดแบบลอกเปลือก ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แบบจำลองการวัดความต้านทาน ในการวัดผลลัมทั้งเปลือกและการวัดผลลัมลอกเปลือก

จากภาพที่ 27 ในการวัดผลลัมทั้งเปลือกความต้านทานรวม ( $R_T$ ) เป็นค่ารวมของ  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  ต่อแบบอนุกรมกัน จะได้

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 = (R_1 + R_3) + R_2$$

ให้  $R_1 = R_3$  เพราะเป็นความต้านทานของเปลือก

$$R_T = 2R_1 + R_2 \quad (11)$$

เมื่อ  $R_T =$  ความต้านทานรวมของผลลัมทั้งผล  
 $R_1 =$  ความต้านทานของเปลือกลัม  
 $R_2 =$  ความต้านทานของเนื้อลัม

จากสมการ (11) จะเห็นว่าความต้านทานรวมของผลลัมทั้งผล ( $R_T$ ) ได้จากความต้านทานของ 2 เท่าของเปลือกลัม ( $2R_1$ ) และความต้านทานของเนื้อลัม ( $R_2$ ) เมื่อนำค่าจริงจากการทดลอง (แสดงในภาพที่ 26) มาแทนค่า ความต้านทานรวมทั้งผล ( $R_T$ ) และความต้านทานเนื้อ ( $R_2$ ) ในสมการ (11) จะได้ว่า

$$\text{ที่ความถี่ไฟฟ้า } 0.1 \text{ กิโลเฮิรตซ์ } R_T = 7,930 \text{ kohm}, \quad R_2 = 10.9 \text{ kohm}$$

$$R_1 = \frac{7930 - 10.9}{2} = 3,959.6 \text{ kohm}$$

$$\text{ที่ความถี่ไฟฟ้า } 1,000 \text{ กิโลเฮิรตซ์ } R_T = 3.94 \text{ kohm}, \quad R_2 = 0.247 \text{ kohm}$$

$$R_1 = \frac{3.94 - 0.247}{2} = 1.847 \text{ kohm}$$

เมื่อพิจารณาการแทนค่าจากการทดลองในสมการ (11) ที่ความถี่ 0.1 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าความต้านทานเปลือกทั้งสองข้าง มีค่ามากกว่าความต้านทานของเนื้อลัมทั้งผล และความต้านทานของเปลือกทั้งสองข้างคิดเป็น 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 0.1 กิโลเฮิรตซ์ และ 94 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1,000 กิโลเฮิรตซ์ ของความต้านทานรวมทั้งผล ดังนั้นการวัดความต้านทานรวมทั้งผล จึงเป็นความต้านทานของเปลือกมากกว่าความต้านทานของเนื้อลัม ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากองค์ประกอบของเปลือกลัมและเนื้อลัม โดยเนื้อลัมจะมีความต้านทานต่ำกว่าเปลือกลัม เพราะเนื้อลัมมีน้ำและกรดอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสารเหล่านี้มีความนำไฟฟ้าสูงและความต้านทานต่ำ แต่เปลือกลัมมีไซและซีผึ้งเป็นองค์ประกอบ ซึ่งไซและซีผึ้งนี้มีคุณสมบัติต้านทานไฟฟ้าได้ดีกว่าน้ำ

เมื่อพิจารณาความต้านทานของเปลือก ในการแทนค่าจากการทดลอง ของ 2 ความถี่ไฟฟ้า พบว่าความต้านทานของเปลือก ที่ความถี่ไฟฟ้า 1,000 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าน้อยกว่าความต้านทานของเปลือกที่ความถี่ 0.1 กิโลเฮิรตซ์มาก นั่นก็แสดงว่าเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าให้สูงขึ้น ความต้านทานของเปลือกมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาการลดลงของอิทธิพลเปลือกเมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้าที่มากขึ้นส่งผลให้พลังงานที่ส่งผ่านผลลัมในการวัดความต้านทานมากขึ้นด้วย ทำให้การทะลุผ่านเปลือกทำได้ดีกว่าความถี่ไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นอิทธิพลของเปลือกต่อการวัดความต้านทานรวมของผลลัมจึงมีค่าลดลงเมื่อความถี่ไฟฟ้าสูงขึ้น