



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

เพื่อทำการศึกษาการประติขันธ์และคุณสมบัติตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบาง โครงสร้างของโพลีเมอร์/BaTiO<sub>3</sub> ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดโพลีเมอร์โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [4-8] ซึ่งรายละเอียดตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สำหรับในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประติขันธ์ตัวเก็บประจุได้แก่ ขนาดของอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> ปริมาณของ BaTiO<sub>3</sub> และชนิดของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการประติขันธ์ซึ่งประกอบด้วย PAAS PAA และ PI โดยได้ทำการวัดและนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์รวมถึงตรวจสอบคุณภาพผิวหน้า ความหนาของชั้นฟิล์ม โดยตรวจสอบด้วย Confocal laser microscope

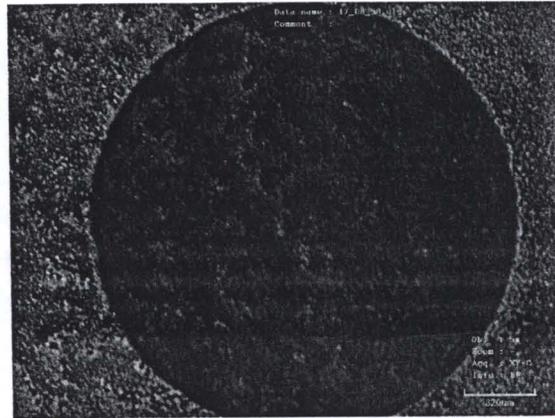
#### 4.1 คุณสมบัติตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/BaTiO<sub>3</sub>

##### 4.1.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาค BaTiO<sub>3</sub>

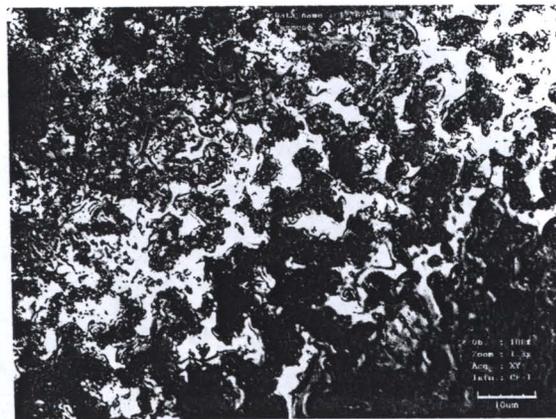
การทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> ด้วยกัน 3 ขนาดได้แก่ 100 nm 200 nm และ 400 nm ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

##### 4.1.1.1 Surface morphology

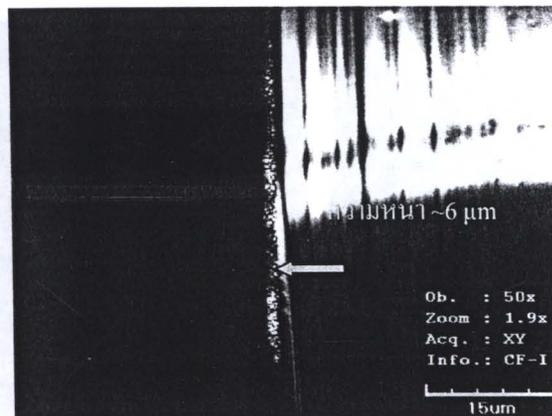
จากผลการตรวจสอบ Confocal laser microscope ซึ่งได้ภาพผิวหน้าและความหนาของชั้นฟิล์มบาง PAAS/BaTiO<sub>3</sub> ดังในรูปที่ 4.1 (ก) – รูปที่ 4.3 (ค) โดยรูปที่ 4.1(ก) แสดงผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่างและบริเวณที่ไม่มีโลหะปกคลุม ซึ่งมีลักษณะการกระจายของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ในเนื้อฟิล์มที่ไม่แตกต่างกันมาก สำหรับรูปที่ 4.1 (ข) เป็นภาพขยายของบริเวณผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน และรูปที่ 4.1 (ค) เป็นภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างซึ่งวัดค่าความหนาของชั้นฟิล์มได้ค่าประมาณ 6  $\mu\text{m}$  และมีความสม่ำเสมอ



(ก)

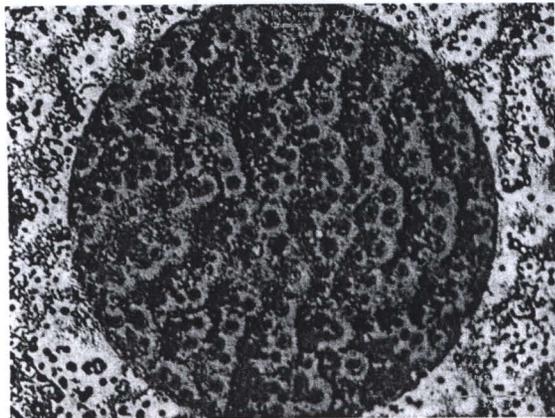


(ข)

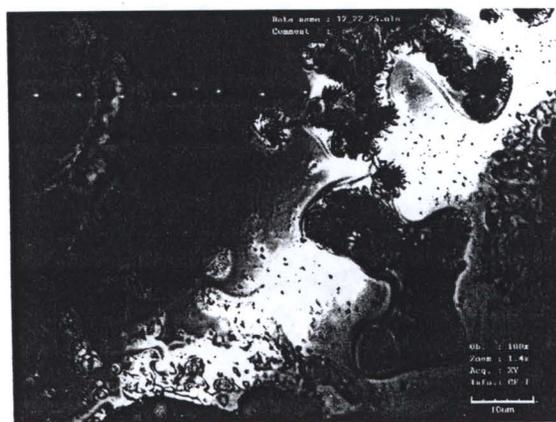


(ค)

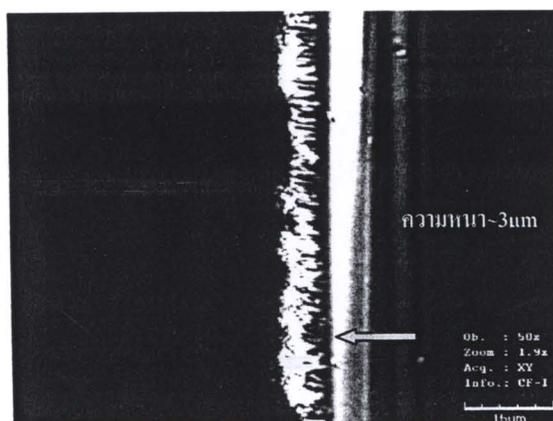
รูปที่ 4.1 ภาพผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของ ตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง



(ก)

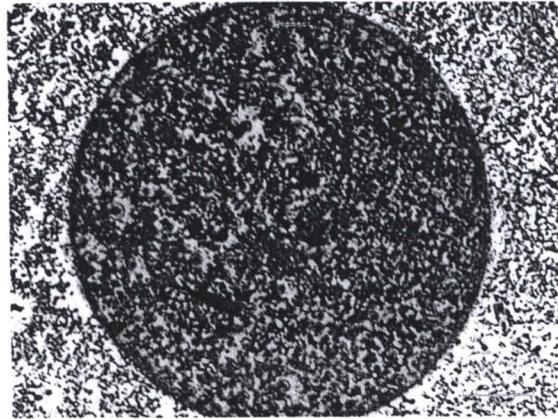


(ข)



(ค)

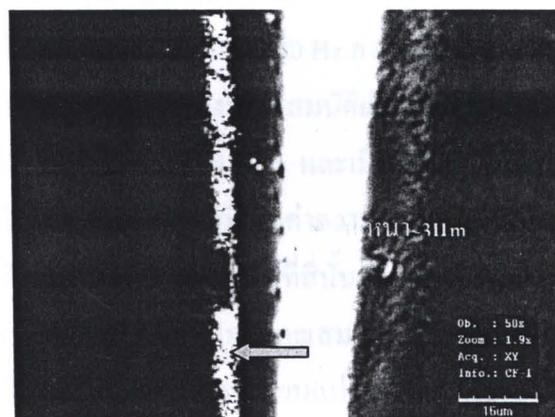
รูปที่ 4.2 ภาพผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 200 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของ ตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 ภาพผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 400 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง

สำหรับตัวอย่างที่ใช้อนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 200 nm และ ขนาด 400 nm ซึ่งผิวหน้าของ ตัวอย่างทั้งสองแสดงการกระจายของ BaTiO<sub>3</sub> ในเนื้อฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนกระจายในเนื้อฟิล์ม ดังในรูปที่ 4.2 (ก) รูปที่ 4.2 (ข) รูปที่ 4.3 (ก) และ รูปที่ 4.3 (ข) สำหรับความหนาของฟิล์มในกรณีหนาประมาณ 3  $\mu\text{m}$  ดังในรูปที่ 4.2 (ค) และ รูปที่ 4.3 (ค) สาเหตุเนื่องจากผลของขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ให้ความหนืดของ สารละลายมีค่าลดลง จึงให้ชั้นฟิล์มที่ได้มีความหนาลดลงค่าที่ได้ปรากฏจากภาพภาคตัดขวางของ ทั้งสองกรณี

#### 4.1.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm 1.7% โดยปริมาตร ซึ่ง ตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้มีผลตอบสนองเชิงความถี่ดังในรูปที่ 4.4 โดยข้อมูลที่ในรูปที่ 4.4 (ก) แสดง ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ทำการวัดทุกๆ 1 สัปดาห์ จากรูปที่ 4.4 (ก) ตัวอย่างในสัปดาห์แรก ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 300 Hz โดยมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่ มีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าความถี่มีค่าสูงกว่า 300 Hz ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ และเปลี่ยน มาแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุอีกครั้งเมื่อค่าความถี่มีค่าสูงกว่า 2 KHz และค่าตัวเก็บประจุมีค่า คงตัวเมื่อค่าความถี่มีค่าสูงขึ้น สำหรับในสัปดาห์ที่สองนั้นคุณสมบัติของตัวอย่างมีลักษณะ คล้ายคลึงกับผลที่วัดในสัปดาห์แรก แต่ในช่วงความถี่ 0.4-40 KHz ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติเป็นตัว เหนี่ยวนำ โดยมีค่าตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความถี่ประมาณ 8 KHz และเมื่อค่าความถี่มีค่าสูง กว่า 40 KHz ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุและมีค่าคงที่เมื่อค่าความถี่มีค่าสูงขึ้น สำหรับในสัปดาห์ที่สามในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 400 Hz ค่าตัวเก็บประจุมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่มีค่า สูงขึ้น ในช่วงความถี่ 0.4-40 KHz ตัวอย่างมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอย่างเด่นชัด โดยมีค่าตัว เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความถี่ประมาณ 4 KHz และเมื่อค่าความถี่มีค่าสูงกว่า 40 KHz ตัวอย่าง แสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุและมีค่าคงที่เมื่อค่าความถี่มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับผลที่วัดได้ใน สัปดาห์แรกและสัปดาห์ที่สอง สำหรับในสัปดาห์ที่สี่นั้นผลตอบสนองเชิงความถี่มีลักษณะใกล้เคียง กับผลที่วัดในสัปดาห์แรก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัตินี้ในแต่ละสัปดาห์ เนื่องจากคุณสมบัติ ของ PAAS ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปและเข้าสู่สภาวะ อยู่ตัวในสัปดาห์ที่สี่

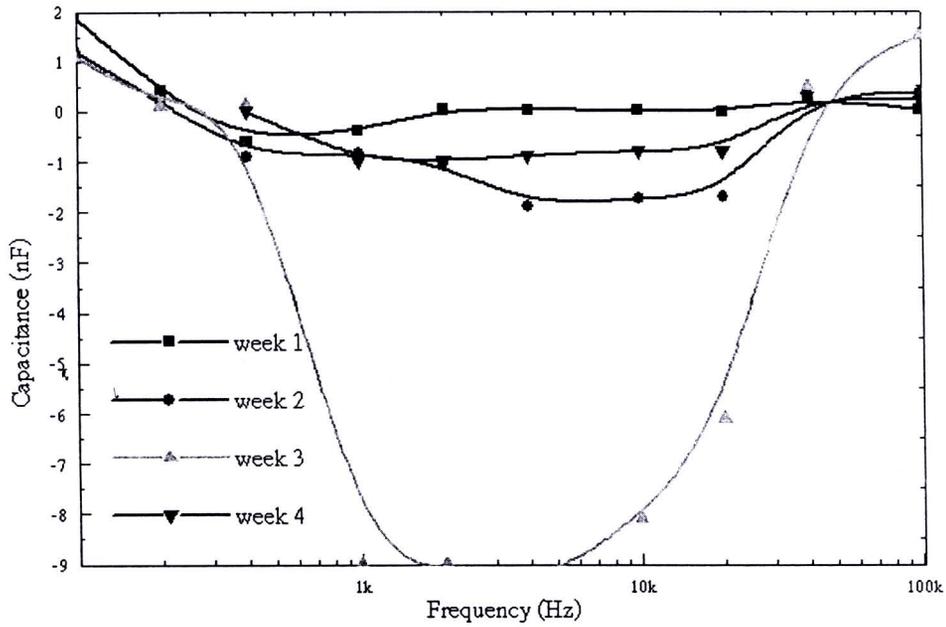
ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวอย่างในกรณีดังในรูปที่ 4.4 (ข) โดยผลที่วัดได้ในสัปดาห์ แรก สัปดาห์ที่สอง และสัปดาห์ที่สามมีคุณลักษณะใกล้เคียง โดยค่าสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ค่าความถี่มีค่ามากกว่า 100 Hz และมีค่าสูงสุดที่ค่าความถี่ประมาณ 200 Hz เมื่อค่าความถี่มีค่าสูง กว่า 200 Hz เป็นต้นไปค่าสูญเสียมีค่าลดลง และค่าสูญเสียมีค่าคงตัวค่าหนึ่งเมื่อค่าความถี่มีค่า

มากกว่า 20 KHz แต่ผลจากวัดในสัปดาห์แรกนั้นค่าสูญเสียลดลงเข้าหาค่าต่ำสุดเมื่อค่าความถี่มากกว่า 50 KHz สำหรับค่าสูญเสียที่วัดในสัปดาห์ที่สี่นั้น ค่าสูญเสียมีค่าลดลงอย่างเด่นชัด โดยค่าสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1 KHz และมีค่าสูงสุดที่ความถี่ประมาณ 1 KHz จากนั้นค่าสูญเสียมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงสู่ค่าคงตัวค่าหนึ่ง

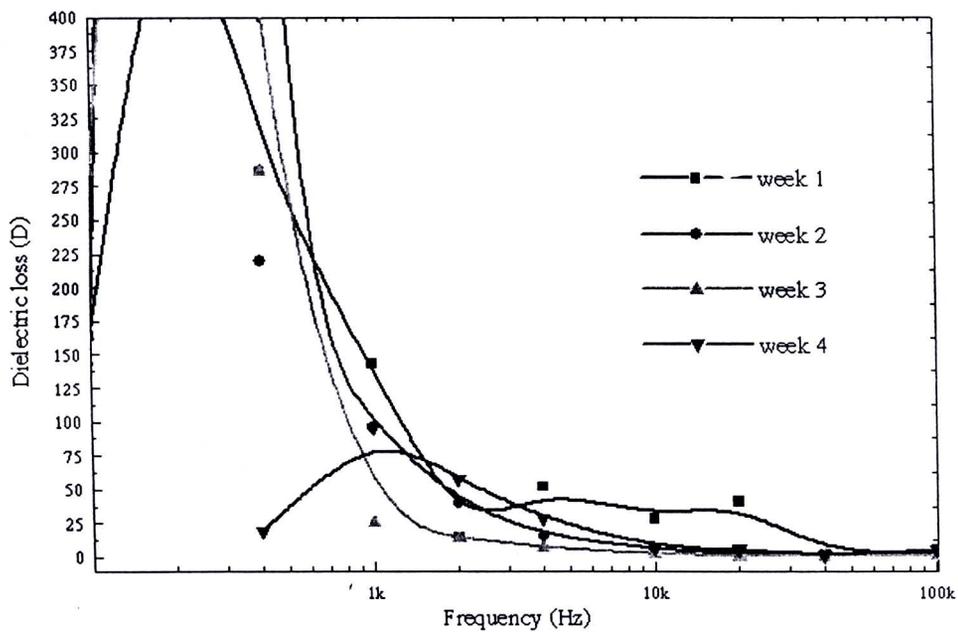
สำหรับตัวเก็บประจุที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  ขนาด 200 nm 1.7% โดยปริมาตร นั้นดังในรูปที่ 4.5 ซึ่งคล้ายคลึงกับผลจากตัวเก็บประจุที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  ขนาด 100 nm 1.7% โดยปริมาตร

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  ขนาด 400 nm 1.7% โดยปริมาตร นั้นดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งผลที่ได้แตกต่างไปจากผลของตัวเก็บประจุที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  ขนาด 100 nm 1.7% โดยปริมาตร จากในรูปที่ 4.6 (ก) โดยตัวอย่างแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 40 KHz และแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกสำหรับกรณีมีค่าต่ำทุกค่าความถี่ที่วัด เนื่องจากผลของขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้เนื้อฟิล์มเกาะตัวกันแน่นกว่า

โดยค่าตัวเก็บประจุที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาค 1.7% โดยปริมาตร ที่มีขนาดอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  ขนาด 100 nm 200 nm และ 400 nm เมื่อวัดที่ความถี่ 100 KHz ผลที่ได้ตามในตารางที่ 4.1 อิทธิพลของขนาดตัวเก็บประจุนั้น ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 100 nm มีค่า  $6.4 \text{ nF/cm}^2$  ตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 200 nm มีค่า  $128.3 \text{ nF/cm}^2$  และตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 400 nm มีค่า  $29.0 \text{ nF/cm}^2$  การเพิ่มขึ้นของค่าตัวเก็บประจุของตัวอย่างที่ใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกรณีนี้สามารถอธิบายได้จากผลของค่าความหนาของ PAAS/  $\text{BaTiO}_3$  ที่มีค่าลดลง (ดูรูปที่ 4. 1(ค) รูปที่ 4.2(ค) และรูปที่ 4.3 (ค)) แต่สำหรับค่าตัวเก็บประจุของตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 200 nm มีค่ามากกว่าค่าตัวเก็บประจุของตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 400 nm เนื่องจากค่าความหนาแน่นผิวของ  $\text{BaTiO}_3$  ของตัวเก็บประจุของตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 200 nm มีค่ามากกว่า (ดูรูปที่ 4. 2 (ข) และรูปที่ 4. 3 (ข) เทียบเปรียบเทียบกัน) สำหรับค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้น ตัวอย่างที่ใช้อนุภาคขนาด 200 nm มีค่าต่ำที่สุด

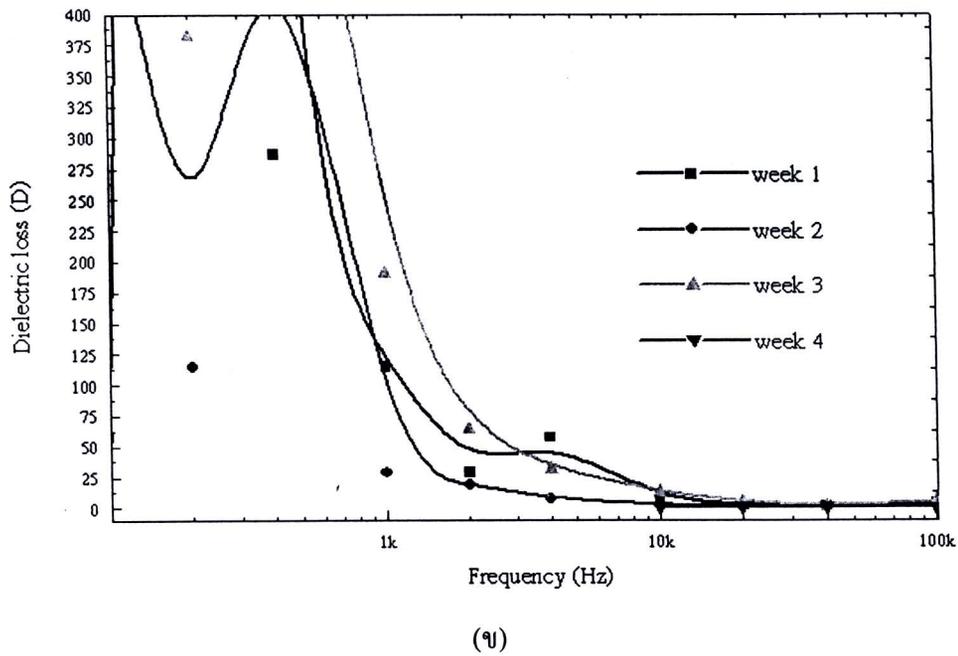
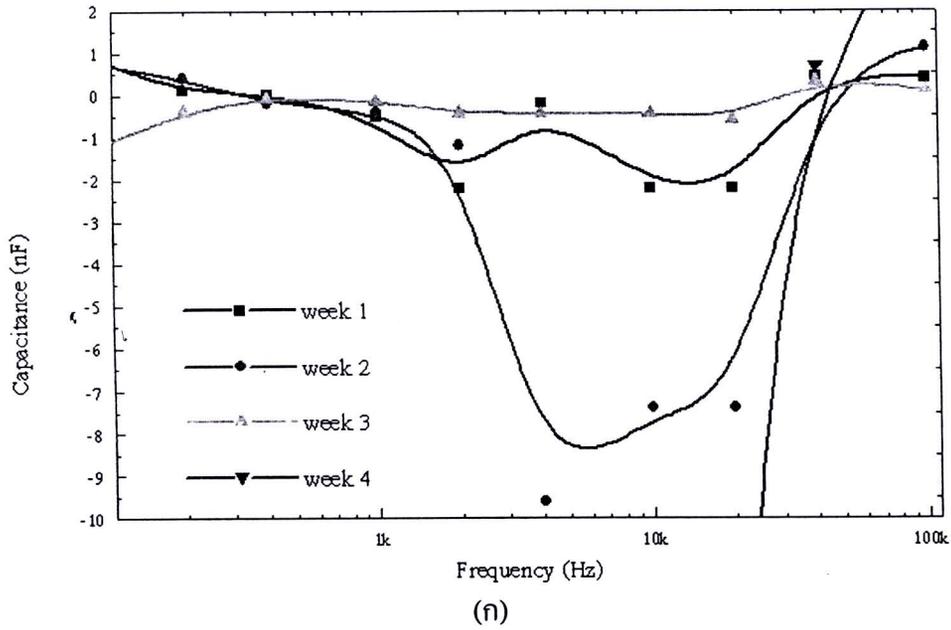


(ก)

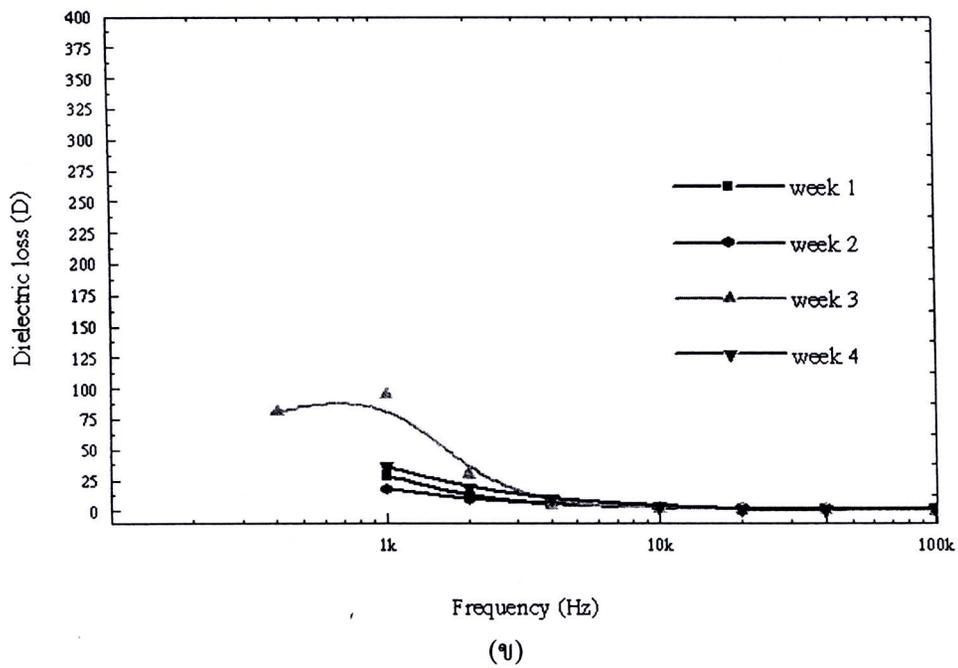
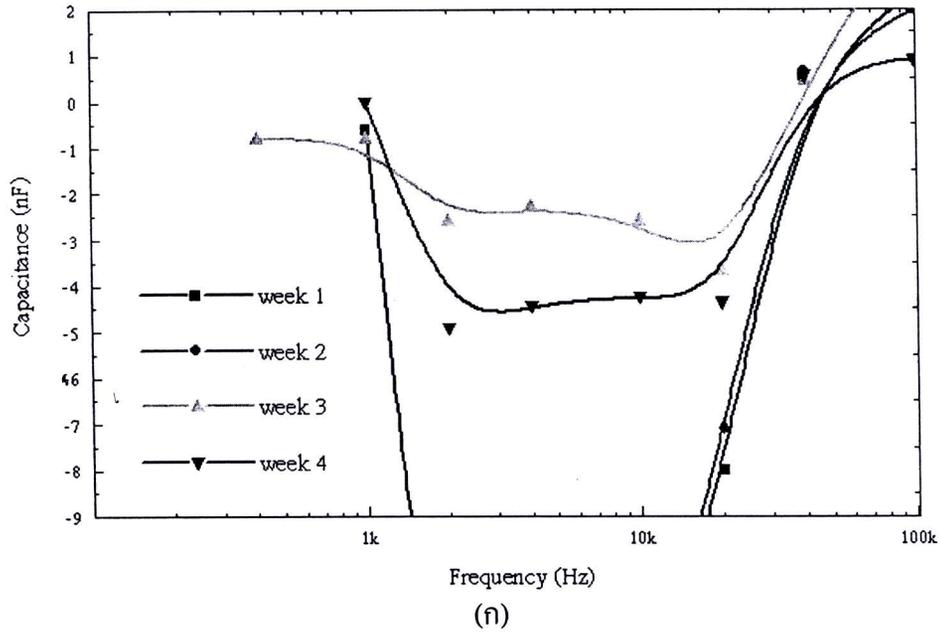


(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร



รูปที่ 4.5 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 200 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร



รูปที่ 4.6 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 400 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร

ในการทดลองโดยใช้ PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ความเข้มข้นของ BaTiO<sub>3</sub> คงที่ ที่ 1.7% ต่อปริมาตร โดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคเป็น 100 nm 200 nm และ 400 nm โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้ในอาทิตย์ที่ 4 โดยป้อนแรงดัน 1 V ความถี่ 100 kHz ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปค่าตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> โดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ที่วัดได้ที่ 100 kHz ที่แรงดัน 1 V ในอาทิตย์ที่ 4

| ขนาด BaTiO <sub>3</sub> (nm) | C (nF/cm <sup>2</sup> ) | D (Dielectric loss) |
|------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 100                          | 6.37                    | 5.14                |
| 200                          | 128.34                  | 0.035               |
| 400                          | 28.98                   | 1.73                |

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.1 พบว่า ที่ความถี่ 100 kHz ผลจากตัวเก็บประจุที่ใช้ BaTiO<sub>3</sub> ที่มีขนาด 200nm นั้นได้ผลของค่าเก็บประจุต่อพื้นที่สูงกว่าค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ BaTiO<sub>3</sub> ที่มีขนาด 100nm เนื่องจากค่าความหนาของชั้น PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มีค่าลดลงเมื่อขนาดของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> มีขนาดใหญ่ขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวเก็บประจุกรณีที่ใช้ BaTiO<sub>3</sub> มีขนาดอนุภาค 200 nm และ 400 nm นั้นค่าตัวเก็บประจุมีค่าลดลงโดยค่าความหนาของ PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ของกรณีทั้งสองมีค่าใกล้เคียง สาเหตุที่ค่าตัวเก็บประจุต่างกันนั้นเนื่องจากค่าความหนาแน่นของ BaTiO<sub>3</sub> ต่อพื้นที่ของกรณีอนุภาคขนาด 200 nm มีค่ามากกว่ากรณี 400 nm (ดูรูปที่ 4.2 (ข) และ 4.3 (ข) เปรียบเทียบกัน)

ผลการทดลองในการแปรค่า ขนาดอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> โดยมีปริมาณความเข้มข้นที่คงที่ คือประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์หรือปริมาตรซึ่งใช้เท่ากับ 100 mg ได้ผลดังนี้

ตัวเก็บประจุที่ใช้ PAAS/BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm มีค่าเก็บประจุสูงสุดที่ความถี่ 100 Hz โดยมีค่าเท่ากับ 1.9 nF ในสัปดาห์แรกและมีค่าแปรเปลี่ยนโดยมีแนวโน้มที่ลดลง มีค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงถึงประมาณ 290 ที่ความถี่เดียวกัน ซึ่งมีค่าสูญเสียในเกณฑ์ที่สูงมากเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุทั่วไป และเมื่อเปลี่ยนขนาดอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> ไปเป็น 200 nm และ 400 nm พบว่าค่าเก็บประจุที่ได้ลดลงเมื่อเทียบกับที่ขนาด 100 nm ที่ความถี่ใช้งาน โดยส่วนใหญ่

ในการทดลองพบว่าที่ความถี่ที่สูงขึ้นตัวเก็บประจุจะมีค่าความสูญเสียในไดอิเล็กทริกลดลงและต่ำสุดที่ 40 kHz ทุกขนาดอนุภาคอื่นเป็นผลมาจากการสั่นตัวของอนุภาคนั้นลดลง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำ อนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> จะสามารถสั่นตามความถี่ที่ได้ทันทำให้อนุภาคนั้นมีการเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าสลับได้ แต่ที่ความถี่ที่สูงขึ้นนั้นอนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ตามความถี่ได้ทันทำให้เสมือนอยู่นิ่ง ทำให้ผลของค่าการสูญเสียลดลงได้

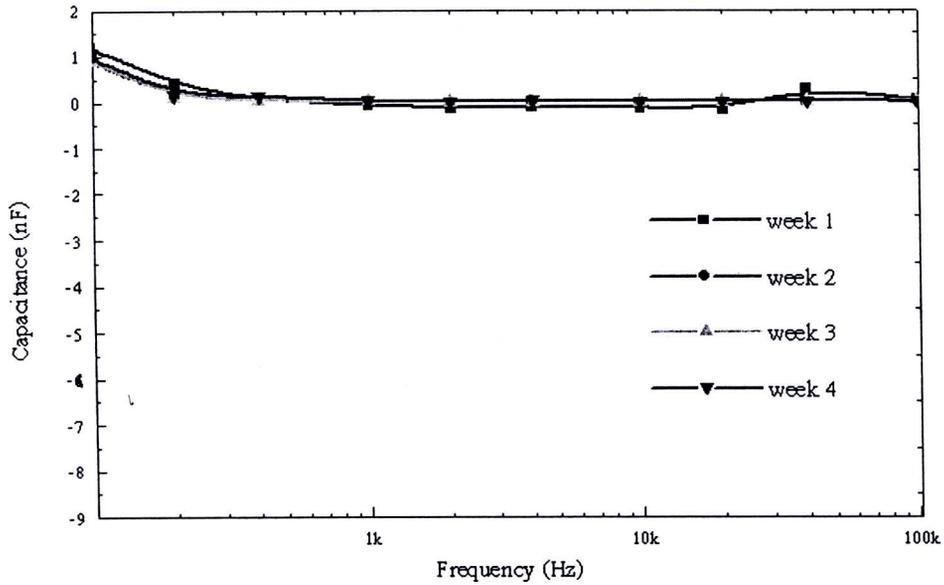
จากผลที่ได้ ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้างโพลีเมอร์/BaTiO<sub>3</sub> ใช้ BaTiO<sub>3</sub> ที่มีขนาดอนุภาค 100 nm จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ความถี่ต่ำทำให้สามารถตัดตัวแปรของขนาดอนุภาคลงได้

#### 4.1.2 อิทธิพลของปริมาณ BaTiO<sub>3</sub> ในเนื้อฟิล์ม

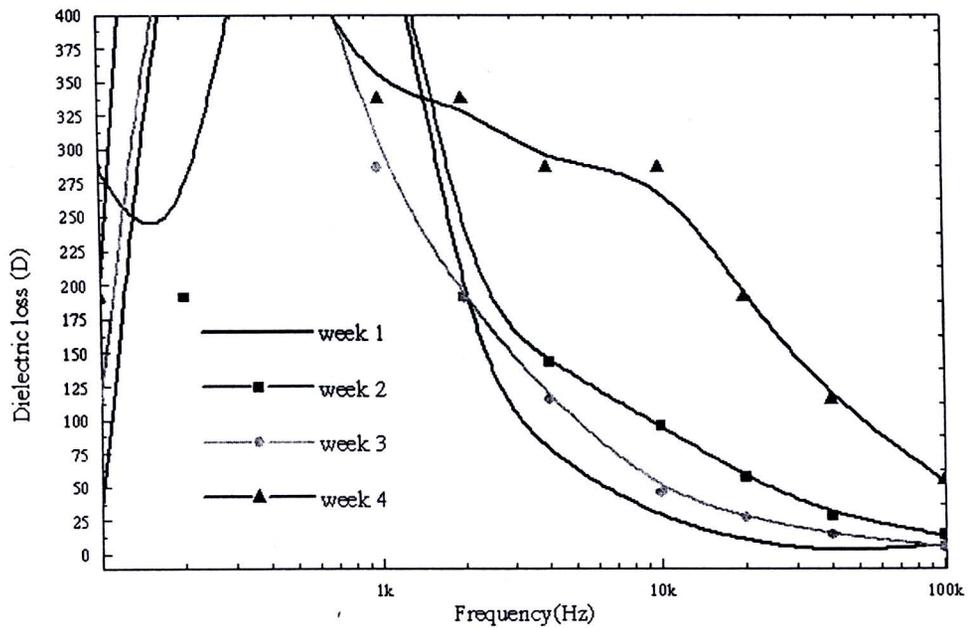
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 ทำให้เราสามารถตัดตัวแปรของขนาดของอนุภาค โดยขนาดที่เลือกใช้คือขนาด 100 nm โดยตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการขึ้นรูปฟิล์มคือ ค่าปริมาณความเข้มข้นของ BaTiO<sub>3</sub> โดยที่ผ่านมาได้ใช้ในปริมาณที่คงที่ที่ 1.7% ต่อปริมาตร ซึ่งในการทดลองนั้นได้มีการแปรเปลี่ยนค่าและได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปค่าตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่วัดได้ที่ 100 kHz ที่แรงดัน 1 V ในอาทิตย์ที่ 4

| ความเข้มข้นของ BaTiO <sub>3</sub><br>(% ต่อปริมาตร) | C (nF/cm <sup>2</sup> ) | D (Dielectric loss) |
|---|-------------------------|---------------------|
| 1.7   | 6.37                    | 5.14                |
| 3.3   | 0.32                    | 54.6                |
| 6.4   | -                       | -                   |
| 12  | -                       | -                   |



(ก)

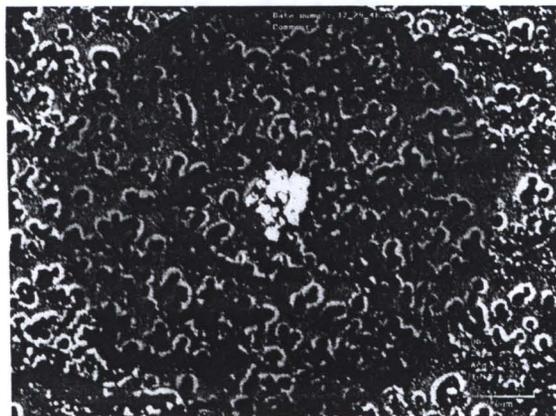


(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 3.3 %ต่อปริมาตร

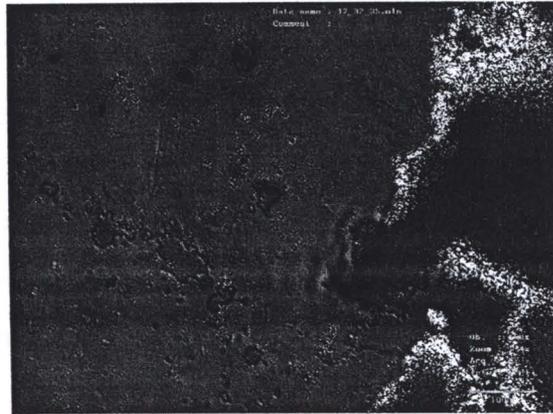
จากการทดลอง โดยเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{BaTiO}_3$  เป็น 3.3%ต่อปริมาตรพบว่าค่าเก็บประจุที่ได้นั้นมีค่าที่ต่างกันเล็กน้อยทุกช่วงความถี่ แต่ค่าอิมพีแดนซ์รวมมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกลดลง และยังมีความทนต่อแรงกดสูงขึ้นจากสังเกตได้จากค่าเก็บประจุที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงไปกับค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ยังมีค่าสูง

เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{BaTiO}_3$  ขึ้นเป็น 6.4 และ 12.03 %ต่อปริมาตรพบว่าตัวเก็บประจุที่ประดิษฐ์ได้นั้นไม่สามารถวัดค่าได้ โดยค่าที่วัดได้เสมือนกับ Open circuit ซึ่งคาดว่าป็นผลจากการที่ PAAS ไม่สามารถยึดเกาะ  $\text{BaTiO}_3$  ในปริมาณมากได้โดยสังเกตได้จากภาพของ Surface Morphology ซึ่งทำให้พบว่าในการใช้  $\text{BaTiO}_3$  มาประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุฟิล์มบางโดยใช้โพลีเมอร์ PAAS เป็นตัวยึดเกาะนั้นสามารถเพิ่มปริมาณได้ถึงเพียงค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่ง โดยเมื่อมีปริมาณที่สูงกว่าค่านั้นแล้วจะเสมือนเป็น Open circuit ซึ่งเมื่อตรวจสอบผิวหน้าของตัวอย่างที่มี  $\text{BaTiO}_3$  ในปริมาณความเข้มข้น 6.4 และ 12 % ต่อปริมาตร ดังรูปที่ 4.8 (ก) – 4.9 (ข) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า แสดงให้เห็นการหลุดลอกออกของอนุภาคภายหลังการทดสอบ ซึ่งเราอธิบายถึงสาเหตุของการหลุดลอกเกิดจากปริมาณของ  $\text{BaTiO}_3$  มีมากเกินไปกว่าที่ PAAS จะยึดเกาะไว้ได้



(ก)

รูปที่ 4.8 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/ $\text{BaTiO}_3$  ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 6.4 % ต่อปริมาตร (ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง

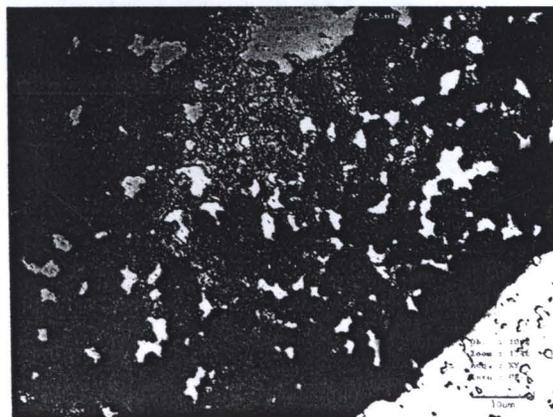


(ข)

รูปที่ 4.8(ต่อ) รูปผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/  
BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 6.4 % ต่อปริมาตร (ข) รูปขยายผิวหน้าขั้วโลหะ  
ด้านบน



(ก)



(จ)

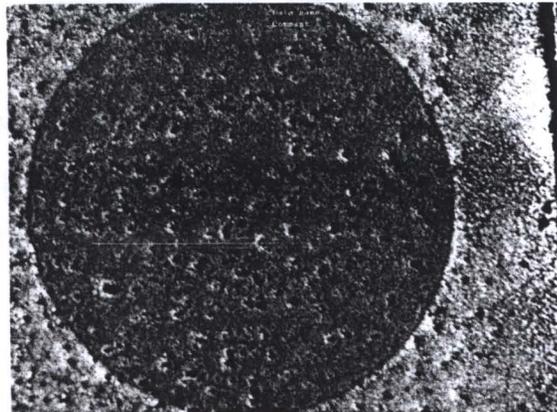
รูปที่ 4.9 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub>  
ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 6.4 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของ  
ตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน

จากภาพตรวจสอบผิวหน้าพบได้ว่าผิวหน้าของตัวเก็บประจุฟิล์มบางที่ใช้ PAAS เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ยึดอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ขนาดต่าง ๆ นั้นพบว่าที่ผิวหน้าของ อนุภาคขนาด 100 nm มีความหนาแน่นสูงสุด และลดลงเป็นขนาด 200 nm และ 400 nm ตามลำดับ ซึ่งก็เป็นผลที่ตรงกับค่าเก็บประจุที่สามารถวัดค่าได้ โดยค่าสูงสุดที่ความถี่โดยส่วนใหญ่สำหรับกรณีนี้ใช้อนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm โดยเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ BaTiO<sub>3</sub> ผลการตรวจสอบพบว่าความหนาแน่นก็เพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับแต่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 6.4% ต่อปริมาตรขึ้นไปผิวหน้าที่ถูกวัดด้วยขั้ววัดนั้นมีการเสียหายดังรูป 4.8 (ก) และรูป 4.9 (ก) และค่าความหนาของฟิล์มที่ประดิษฐ์ได้นั้นอยู่ที่ 3-6  $\mu\text{m}$

## 4.2 คุณสมบัติตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAA/BaTiO<sub>3</sub>

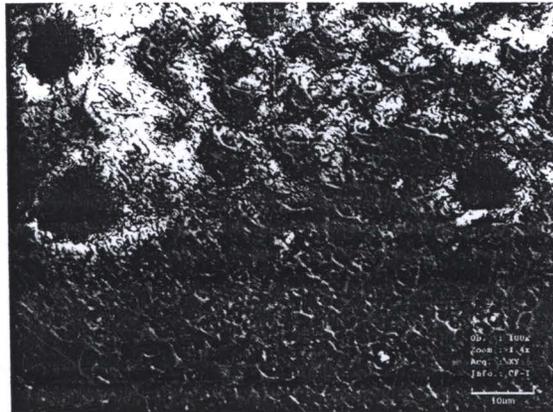
### 4.2.1 Surface morphology

หลังจากที่ได้ใช้ PAAS เป็นโพลีเมอร์ในการยึดเกาะสารแล้วได้ทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งคือ โพลีเมอร์ที่ใช้ในการยึดเกาะสาร โดยใช้เป็น PAA และใช้ PAA ในปริมาณที่เท่ากับของ PAAS โดยทดลองโดยใช้ BaTiO<sub>3</sub> ปริมาณความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตรซึ่งได้ผลผิวหน้าดังรูปที่ 4.10

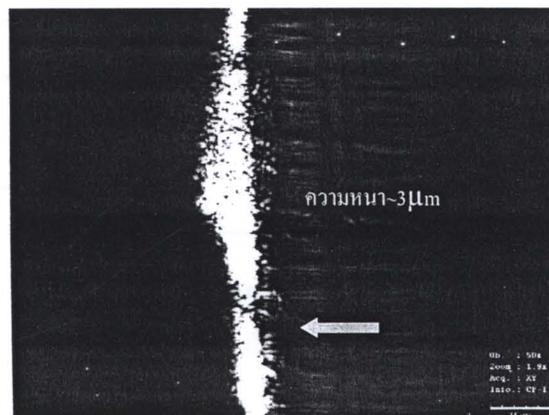


รูป (ก)

รูปที่ 4.10 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAA/BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง



รูป (ข)



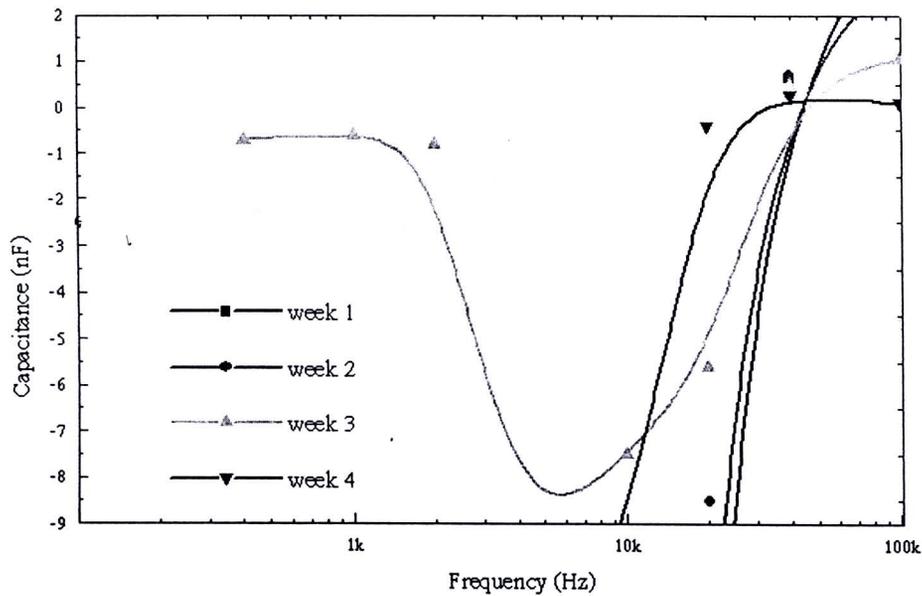
รูป (ค)

รูปที่ 4.10 (ต่อ) รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PAA/ BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร(ข) รูปขยายของ บริเวณผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง

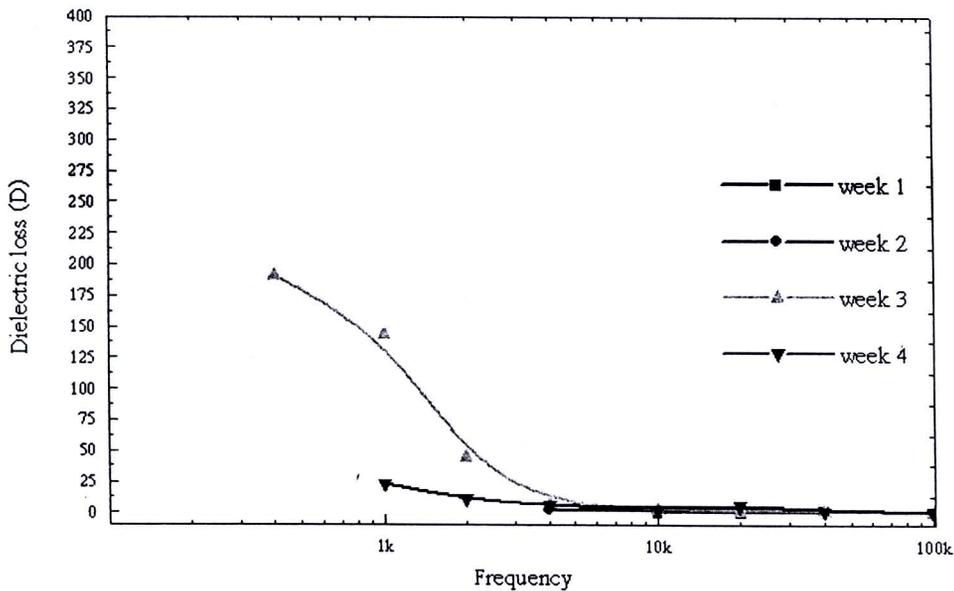
จากรูปผิวหน้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง PAA/ BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตรพบว่าการกระจายตัวของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> มีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับใน ตัวเก็บประจุโครงสร้าง PAAS/ BaTiO<sub>3</sub>

#### 4.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเก็บประจุโครงสร้าง PAA/BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร ทดสอบโดยป้อนแรงดัน 1 V ได้ผลตอบสนองต่อความถี่ ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง

โครงสร้าง PAA/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 1.7 % ต่อปริมาตร

จากการทดลองพบว่า ผลของการที่ใช้ PAA เป็นโพลิเมอร์ในการยึดอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> นั้น ไม่ได้มีผลที่ดีกว่าผลของการใช้ PAAS เป็นตัวยึดอนุภาค และยังมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่น้อยกว่าด้วยซึ่งสังเกตได้จากค่าที่แสดงเฟสความเหนียวนาแทนใน ณ ความถี่ต่ำโดยพิจารณาจากค่าเก็บประจุที่คิดลบที่วัดได้ และมีค่าโน้มน้ำแข็งไปในแนวโน้มน้ำของการใช้ PAA หรือ PAAS ที่ยังไม่ผสมอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> ดังนั้นการใช้ PAA มาใช้เป็นโพลิเมอร์เพื่อยึดอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาประดิษฐ์

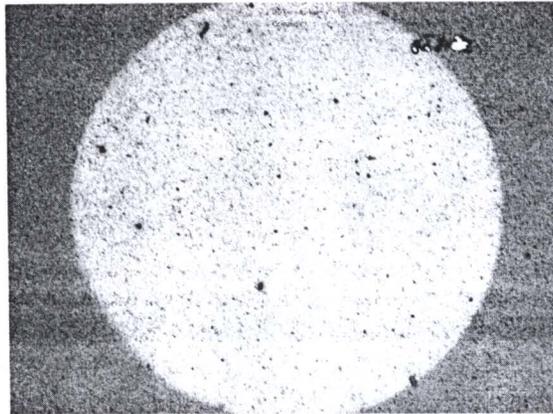
จากการทดลองมีข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ 1. โพลิเมอร์ที่นำมาใช้ทั้ง 2 ชนิดคือทั้ง PAA และ PAAS นั้นเป็นโพลิเมอร์ประเภท เทอร์โมพลาสติก (Thermo plastic) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีลักษณะยืดหยุ่น คืนรูปได้ ทำให้ค่าของการเก็บประจุนั้นมีค่าที่แกว่งตามแรงกดของขั้ววัดซึ่ง ถ้ากดลงโดยใช้แรงที่ขั้วที่มากกว่าก็จะทำให้ค่าเก็บประจุที่วัดได้มีค่าสูงตาม แต่ถ้าวัดโดยกดแรงเกินค่าหนึ่งก็จะมีผลทำให้ เหมือน ลัดวงจรซึ่งแสดงผลตามรูปที่ 4.4-4.11 ที่แสดงถึงค่าเก็บประจุที่คิดลบ 2. ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกที่วัดได้จากตัวเก็บประจุฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้นั้นมีค่าสูงมากและค่อยๆลดลงตามความถี่โดยคาดว่าเป็นผลจากส่วนของโพลิเมอร์ที่เป็นฉนวนชนิดที่ไม่ดีแล้วส่งผลต่อค่ารวมแต่ที่ความถี่สูงนั้นมีค่าลดลงซึ่งน่าเป็นผลจากการที่อนุภาคที่ยึดโดยโพลิเมอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ตามความถี่ได้ทันและเสมือนอยู่หนึ่งทำให้ค่าเก็บประจุที่ได้มีความเสถียรและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง 3. ในการเพิ่มปริมาณ BaTiO<sub>3</sub> ซึ่งใช้เป็นฉนวนหลักในการทำตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของการยึดเกาะตัวของโพลิเมอร์ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณที่เกินค่าๆ หนึ่งจะมีผลทำให้โพลิเมอร์ไม่สามารถยึด BaTiO<sub>3</sub> ได้อยู่ทำให้ตัวเก็บประจุที่ประดิษฐ์ไม่สามารถทำงานเป็นตัวเก็บประจุได้

#### 4.3 คุณสมบัติตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PI/BaTiO<sub>3</sub>

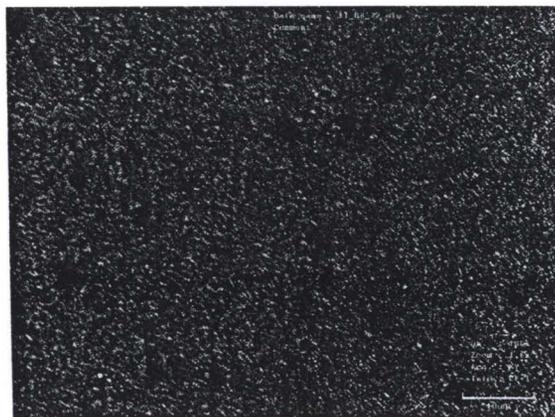
หลังจากที่ได้ทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์คือ ขนาดของอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> ปริมาณความเข้มข้นของ BaTiO<sub>3</sub> และการเปลี่ยนโพลิเมอร์ที่ใช้ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งเป็นประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermo plastic) ทั้งคู่ ก็ได้ทำการศึกษาต่อโดยทำการเปลี่ยนชนิดของโพลิเมอร์ โดยเปลี่ยนเป็นโพลีอิมิดเป็นโพลิเมอร์ที่มีการใช้ผลิตอย่างแพร่หลายเป็นอย่างมาก และเป็นโพลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต พลาสติก (Thermoset plastic) ซึ่งต้องมีขั้นตอนในการประดิษฐ์ เพื่อให้คงรูปที่ยืดหยุ่นกว่าแบบที่เป็นเทอร์โมพลาสติก

##### 4.3.1 Surface morphology

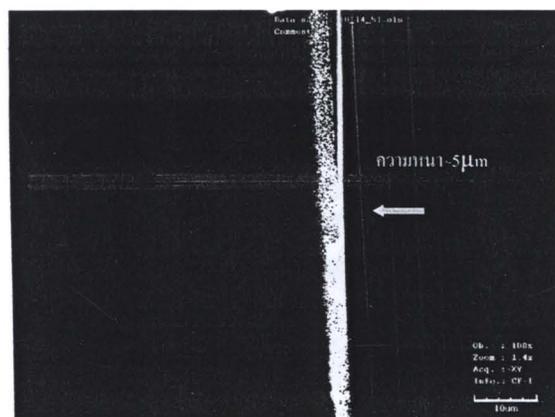
ในการทดลองโดยใช้ PI ได้มีการแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นทั้งหมด 4 ค่าคือ 30 35 40 และ 45 % ต่อปริมาตรโดยผลของการตรวจสอบผิวหน้าเป็นไปดังรูปที่ 4.12 (ก)- รูปที่4.15 (ค)



(ก)

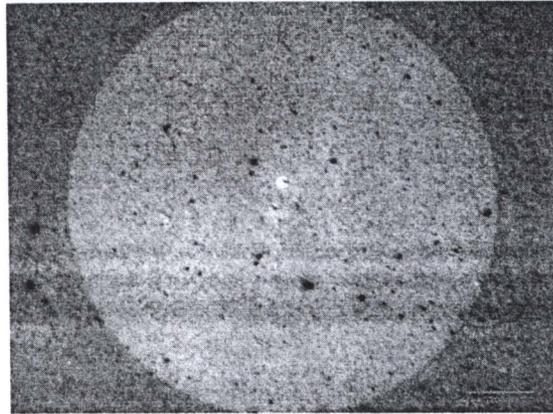


(ข)

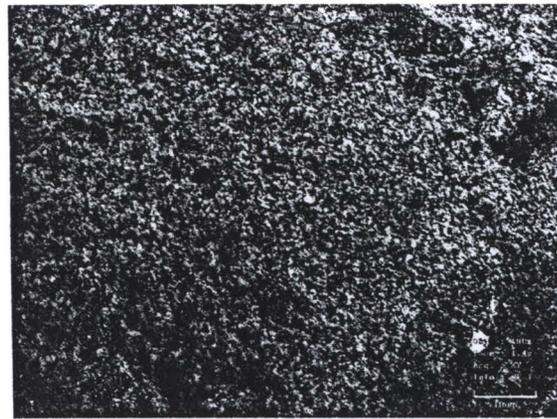


(ค)

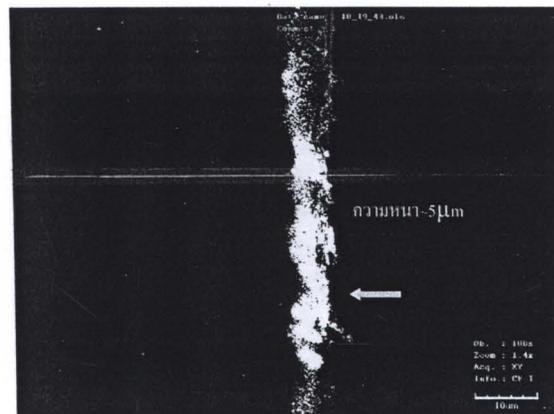
รูปที่ 4.12 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 30 % ต่อปริมาตร (ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะ ด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง



(ก)

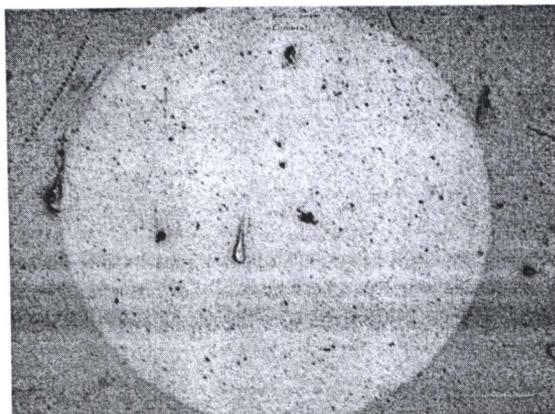


(ข)



(ค)

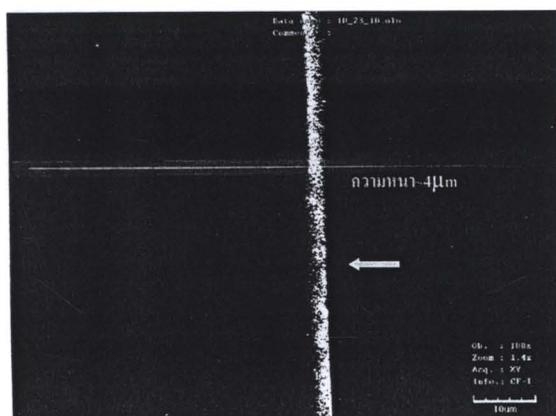
รูปที่ 4.13 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 35 % ต่อปริมาตร (ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะ ด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง



(ก)

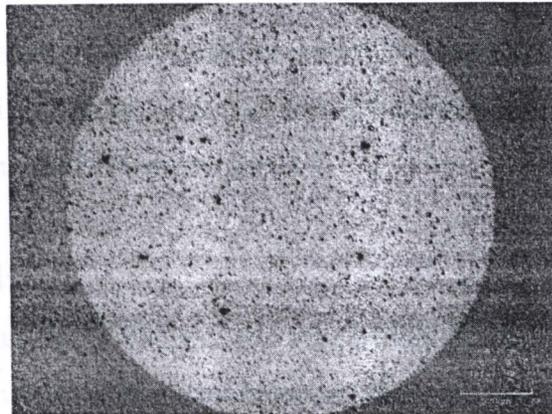


(ข)

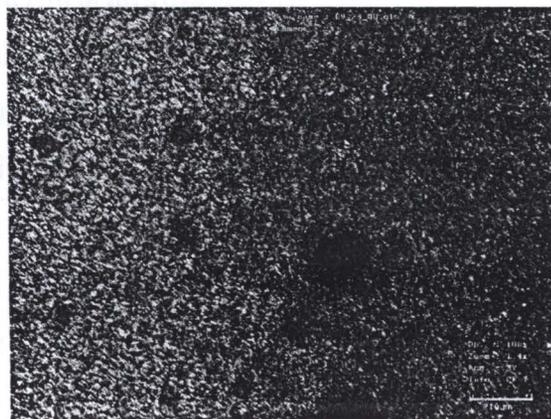


(ค)

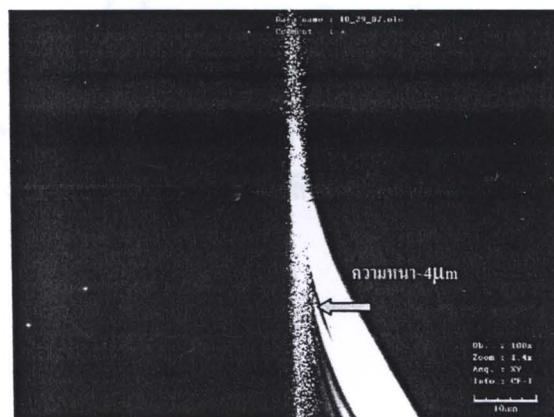
รูปที่ 4.14 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 40 % ต่อปริมาตร (ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของบริเวณผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 45 % ต่อปริมาตร (ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะ ด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของบริเวณผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง

ซึ่งในการตรวจสอบผิวหน้าพบว่ารูปผิวหน้าของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> มีลักษณะผิวหน้าและความหนาแตกต่างกันเล็กน้อยโดยมีความหนาแน่นของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> สูงมากจนไม่สามารถเห็นชั้นทองทะลุผ่านได้

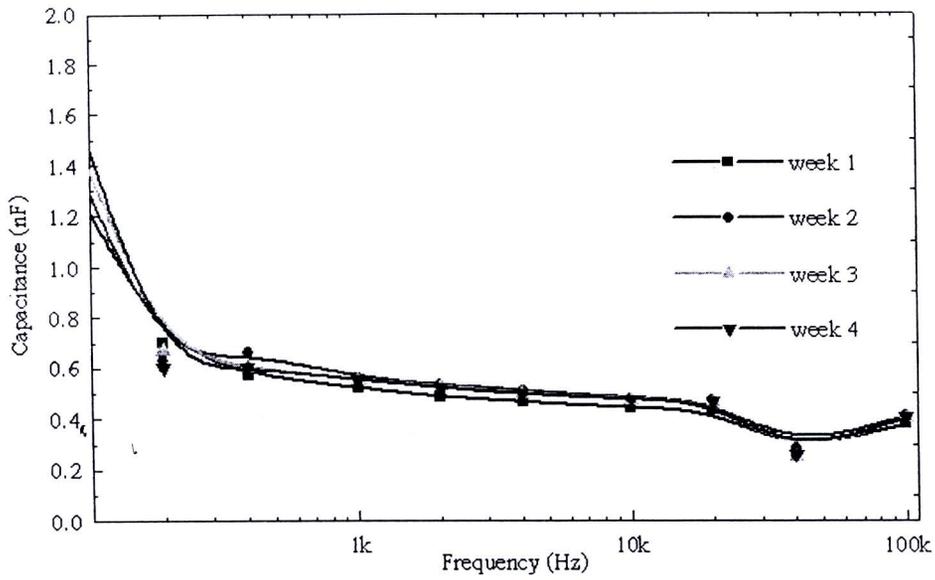
#### 4.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ของตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ BaTiO<sub>3</sub> โดยได้ผลดังตารางที่ 4.3

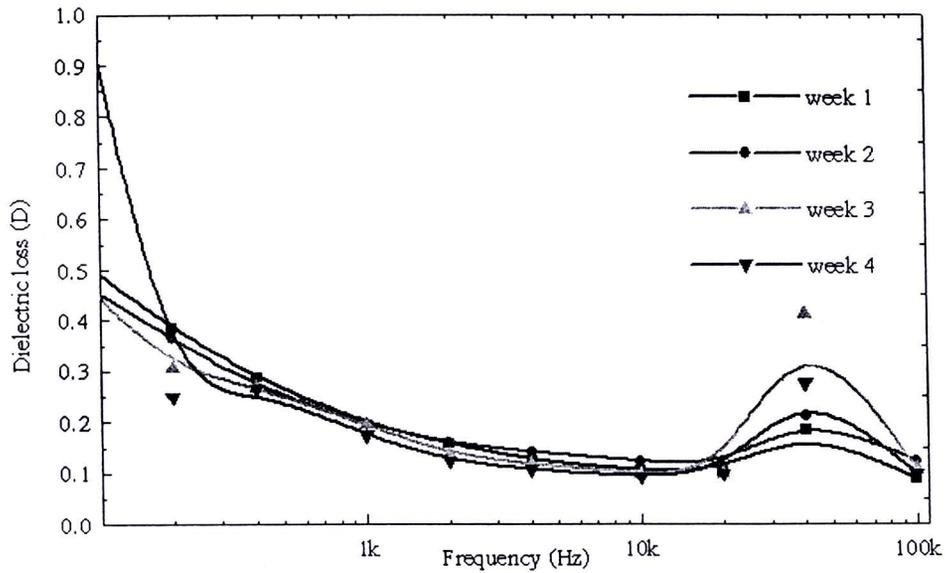
ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปค่าตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่วัดได้ที่ 100 kHz ที่แรงดัน 1 V ในอาทิตย์ที่ 4

| ความเข้มข้นของ BaTiO <sub>3</sub><br>(% ต่อปริมาตร) | C (nF/cm <sup>2</sup> ) | D (Dielectric loss) |
|---|-------------------------|---------------------|
| 30  | 12.8                    | 0.1                 |
| 35  | 5.6                     | 4.2                 |
| 40  | 15.5                    | 2.85                |
| 45  | 3.2                     | 7.4                 |

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของ BaTiO<sub>3</sub> ที่ 30 % มีค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำที่สุด โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นพบว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 40 % ต่อปริมาตร โดยที่ความเข้มข้นสูงกวานี้จะได้ค่าเก็บประจุต่อพื้นที่ที่ลดลง และแนวโน้มของค่าเก็บประจุและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ได้ต่อความถี่มีค่าดังรูปที่ 4.16 (ก)- รูปที่ 4.19 (ข)

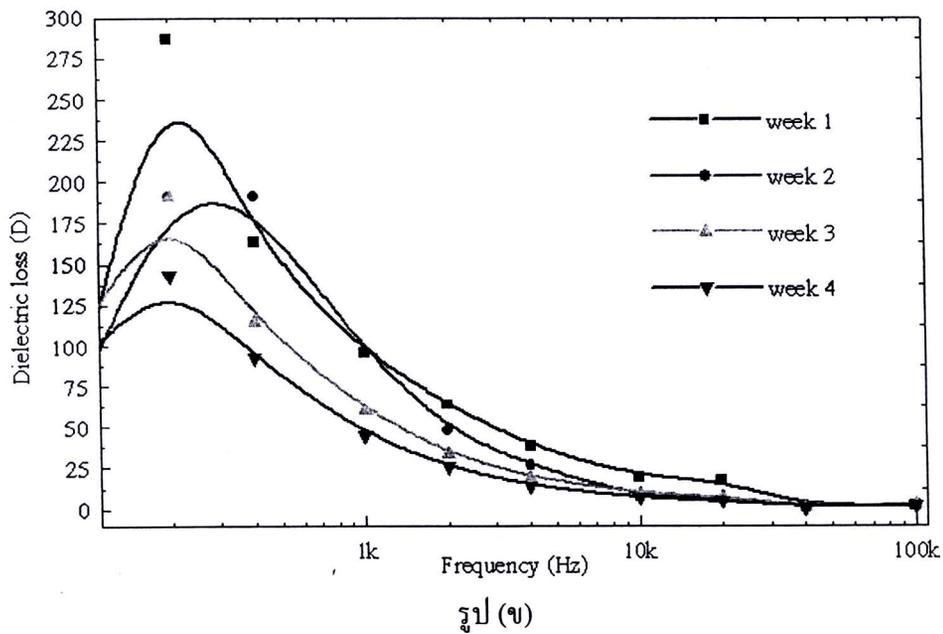
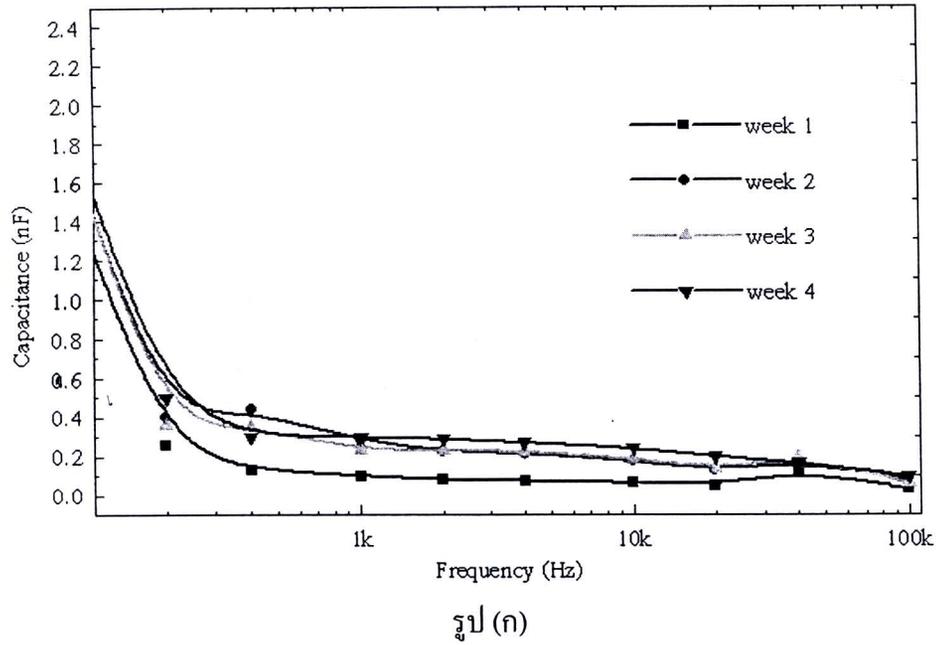


(ก)

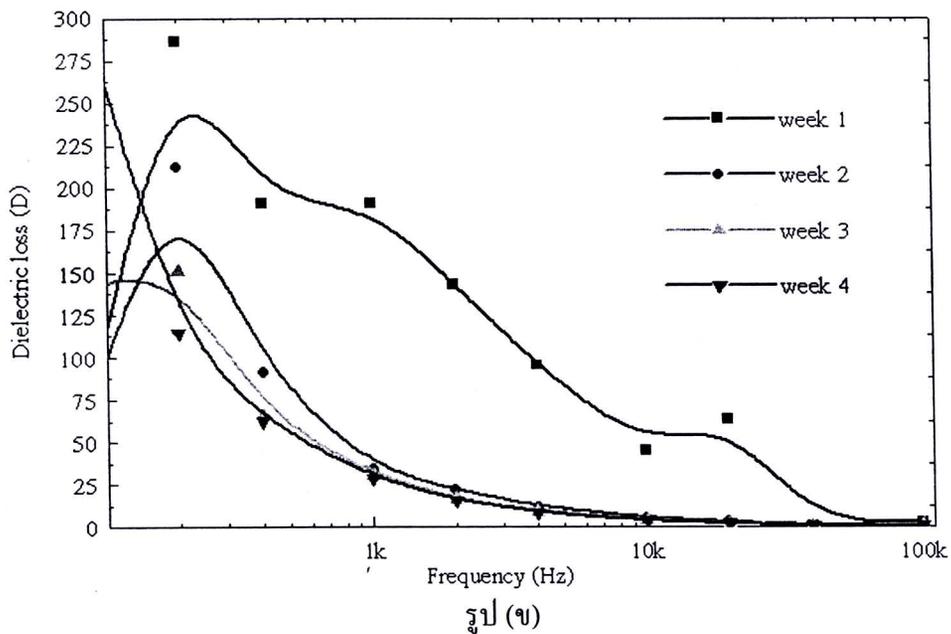
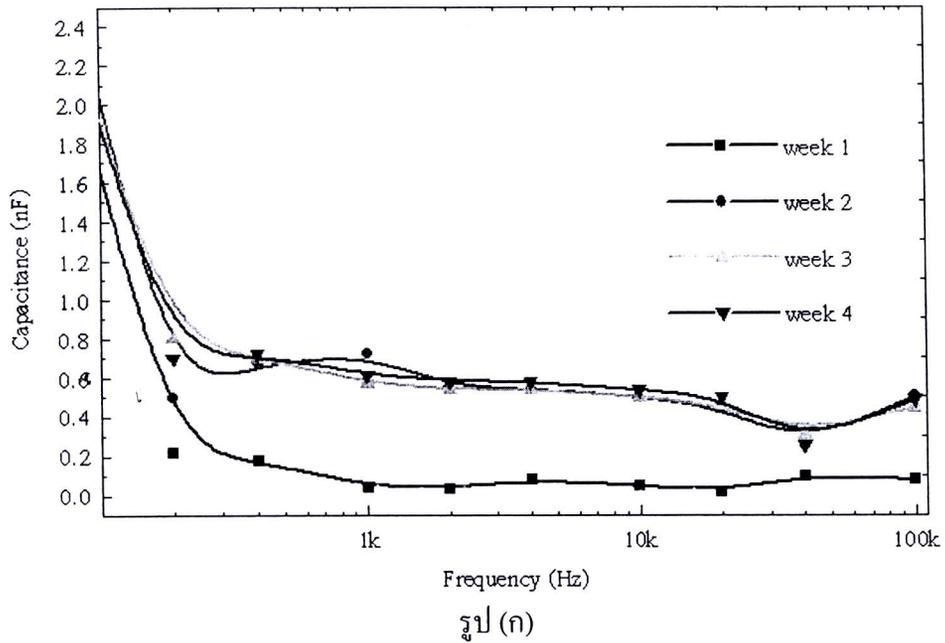


(ข)

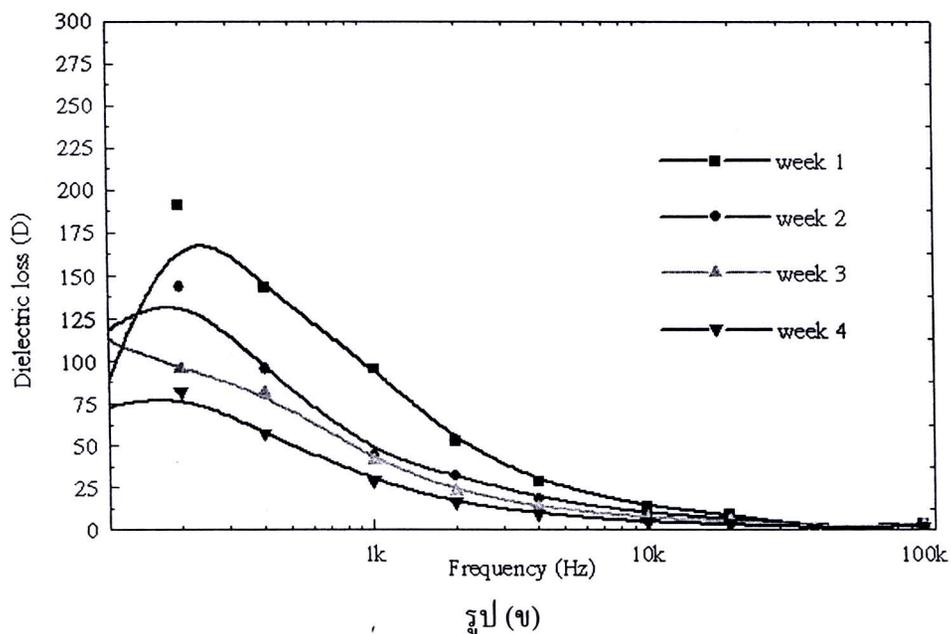
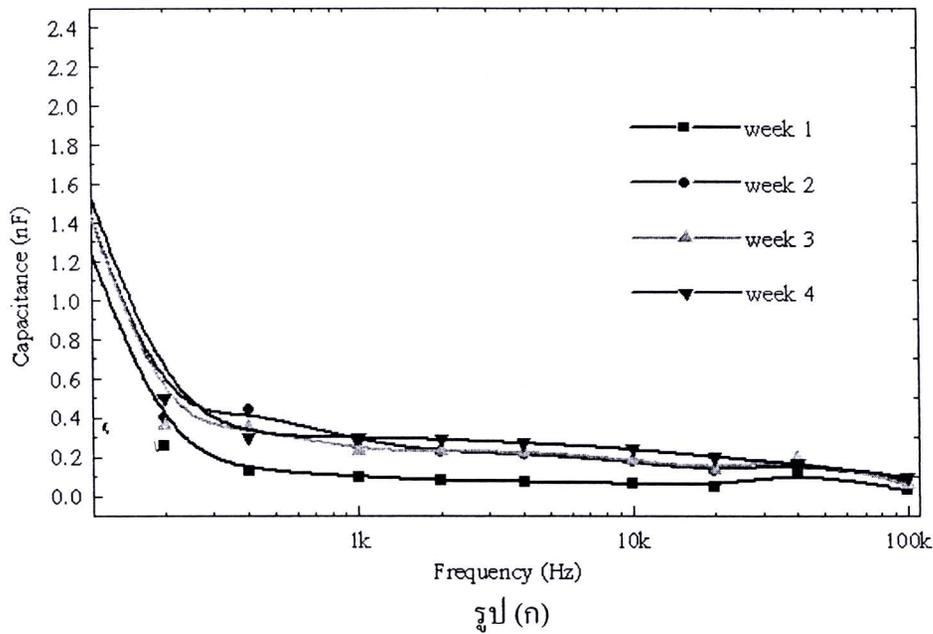
รูปที่ 4.16 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 30%ต่อปริมาตร



รูปที่ 4.17 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 35%ต่อปริมาตร



รูปที่ 4.18 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 40%ต่อปริมาตร



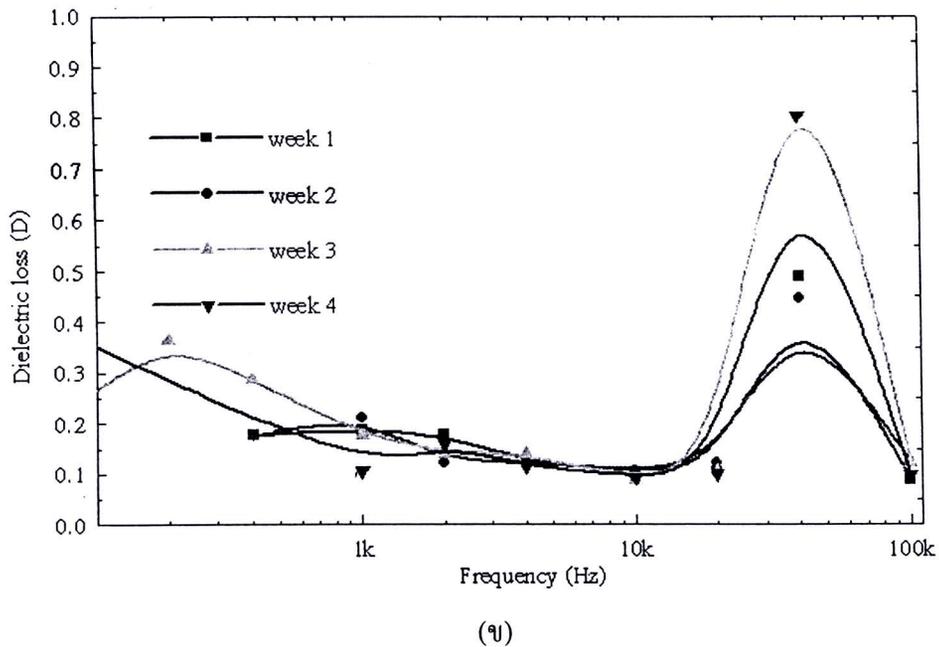
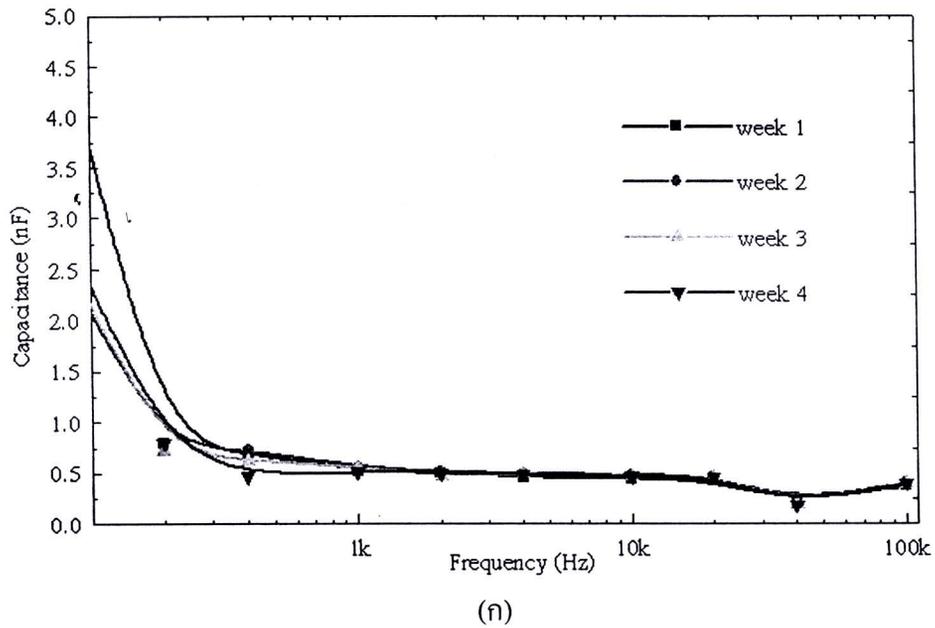
รูปที่ 4.19 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง

โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 45%ต่อปริมาตร

จากผลการทดลองโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์คือปริมาณของ BaTiO<sub>3</sub> โดยเพิ่มปริมาณขึ้นพบว่าค่าเก็บประจุที่ได้ที่แรงดันเดียวกันนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่จะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ 45%โดยปริมาตร ซึ่งได้ค่าสูงสุดที่ 1.9 nF และเมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นอีกพบว่าค่าที่ได้นั้นก็กลับมีค่าลดลง

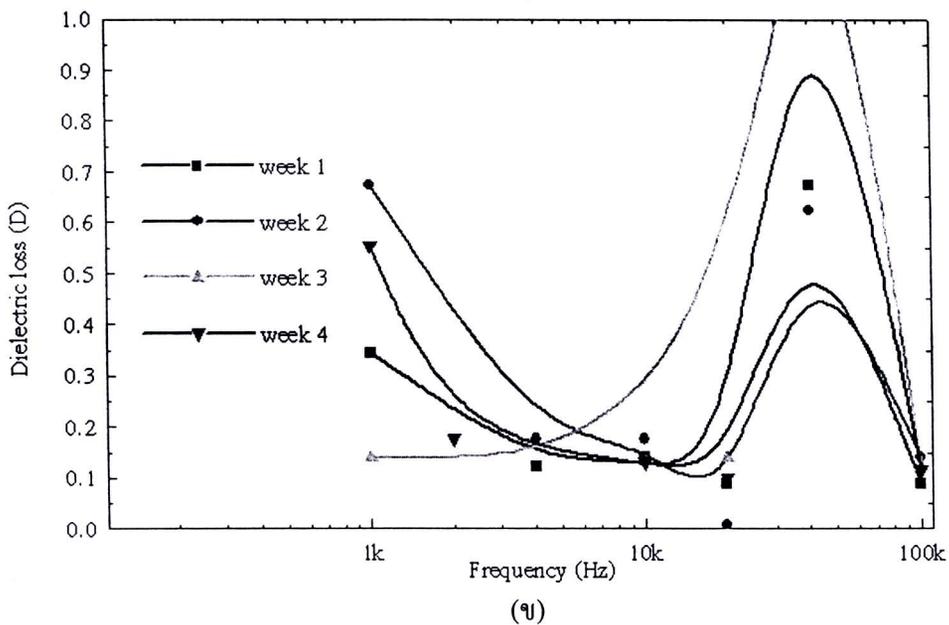
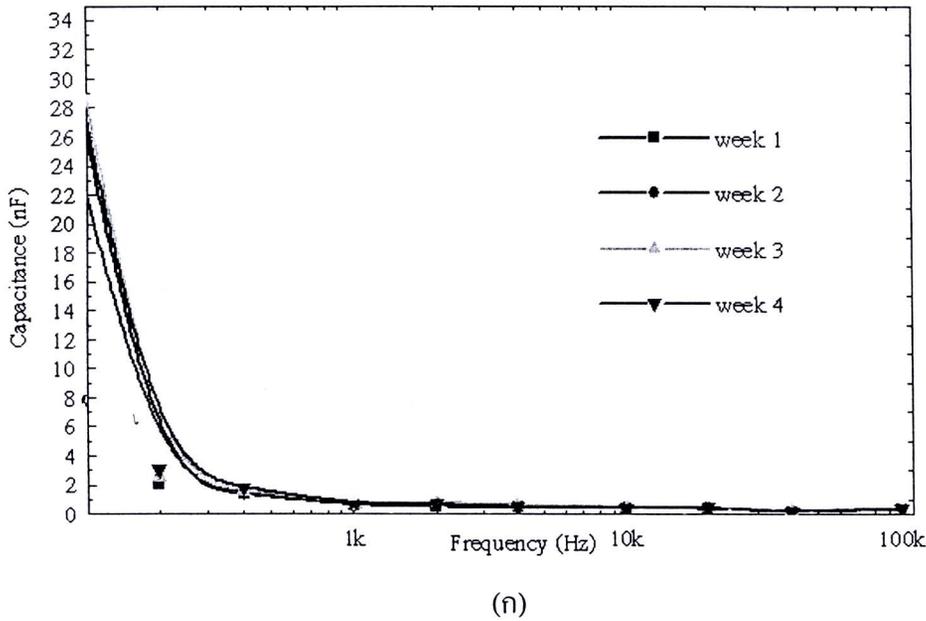
#### 4.3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดัน

ในการทดลองได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าโดยลองเปลี่ยนแปลงให้มีค่าที่ลดลงโดยวัดที่ 10 mV 100 mV และ 1 V โดยรูปที่ 1 V คูณผลได้ที่รูป 4.16 (ก)-4.16 (ข) โดยผลการทดลองของ 100 mV 10 mV ได้ผลรูปที่ 4.20 (ก)- รูปที่ 4.21 (ข) ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 4.20 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง

โครงสร้าง PI/BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 30%ต่อปริมาตร ที่ 100 mV



รูปที่ 4.21 (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง  
โครงสร้าง PI/ BaTiO<sub>3</sub> ที่มี BaTiO<sub>3</sub> ขนาด 100 nm ในปริมาณ 30%ต่อปริมาตร ที่ 10 mV

โดยผลของการเปลี่ยนค่าแรงดันในการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางที่ใช้ PI เป็นโพลีเมอร์ในการยึดโมเลกุลของ BaTiO<sub>3</sub> ได้ผลดังนี้

- (ก) เมื่อวัดค่าเก็บประจุที่โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำคือ 10mV แล้วผลที่ได้คือที่ความถี่ค่าต่ำ ค่าเก็บประจุที่ทำการวัดได้นั้นมีค่าเท่ากับ 30 nF ซึ่งสูงขึ้น กว่าที่แรงดัน 100 mVซึ่งได้เท่ากับ 4.2 nF และ 1 V มีค่าเท่ากับ 1.3nF มาก
- (ข) ความเสถียรของค่าเก็บประจุนั้นมีความเสถียรมากกว่าเมื่อให้แรงดันที่สูงขึ้น โดยจะ สามารถเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 4.16 (ก) รูปที่ 4.20(ก) และรูปที่ 4.21(ก) พบว่าความชันในช่วง ความถี่ต่ำนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อลด แรงดันลง
- (ค) ค่าการสูญเสียในไดโอดีกริกที่ได้จะมีค่าลดลงตามความถี่ แต่ที่ความถี่ 40 kHz ค่าสูญเสีย ไดโอดีกริกจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงขึ้น เมื่อให้แรงดันที่ลดลง