

## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อลดการเกิดฟาวลิงของโปรตีน โดยเลือกใช้วิธีการที่ทำได้ง่าย คือวิธีผสมและเคลือบผิวเยื่อแผ่น โดยจะศึกษา 3 วิธีคือ 1.วิธีผสม PVA ในเยื่อแผ่น PES ในขั้นตอนการเตรียมด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion) 2.วิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่น PES ด้วย PVA 3.วิธีผสม PVA ในเยื่อแผ่น PES หลังจากนั้นเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย PVA อีกครั้ง โดยใช้ GA เป็นสารเชื่อมขวางในทุกขั้นตอน เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับเยื่อแผ่น

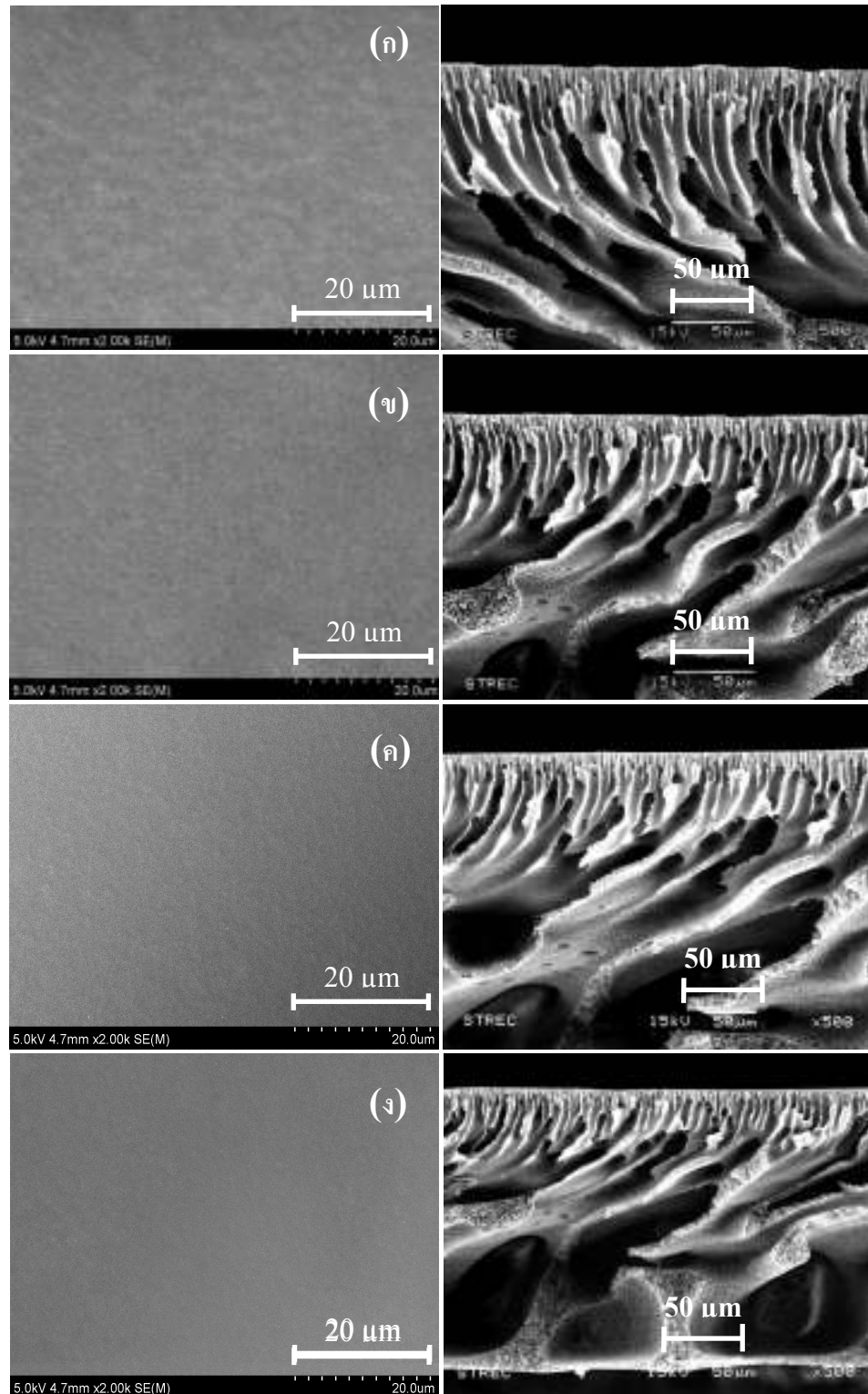
จากนั้นทำการศึกษาคูณสมบัติต่างๆ ของเยื่อแผ่นที่ถูกเตรียมขึ้น เช่น ศึกษาโครงสร้างของเยื่อแผ่นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM), หาค่า Molecular weight cut off (MWCO), หาค่ามุมสัมผัส (Contact angle), ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical tests), วัดค่าฟลักซ์น้ำ, ทดสอบความคงทน, ทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และการหลุดของ PVA, วัดค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนและการเกิดฟาวลิง ตามลำดับ

### 4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเยื่อแผ่น (Morphologies of membrane)

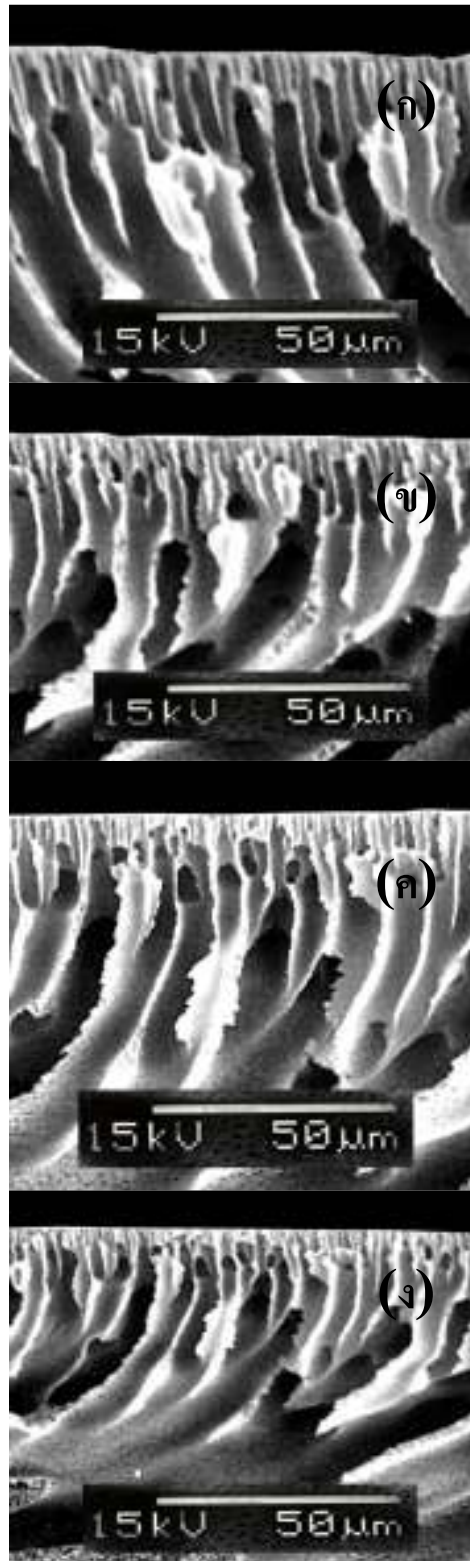
สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม PVA จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ก-ง พบว่า เยื่อแผ่นเป็นแบบไม่สมมาตร มีลักษณะ โครงสร้างแบบ finger-like ประกอบด้วยส่วนที่เป็นชั้นผิวและชั้นรองรับ ในทุกความเข้มข้นที่ผสม PVA จากการเปรียบเทียบทั้ง 4 รูป จะสังเกตเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0.5-1.5 %wt โครงสร้างของเยื่อแผ่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยชั้นผิวด้านบนมีการจัดเรียงที่แน่นขึ้น ส่วนในชั้นรองรับก็มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับเยื่อแผ่น PES ที่ไม่ได้ผสม PVA (ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ก) เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ให้สูงขึ้น มีผลทำให้เกิดฟองอากาศแทรกอยู่ภายในผนังชั้นรองรับของเยื่อแผ่น และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากสารละลายโพลิเมอร์มีความหนืดสูง และเมื่อนำสารละลายโพลิเมอร์มาคาสท์เป็นฟิล์ม จะพบว่าสารละลายโพลิเมอร์ที่อยู่ด้านล่างจะเกิดการขึ้นรูปช้ากว่าด้านบน อากาศที่อยู่ภายนอกจึงแทรกเข้าไปอยู่ในเนื้อของฟิล์ม มีผลทำให้เกิดฟองอากาศแทรกอยู่ภายในผนังชั้นรองรับของเยื่อแผ่น [7] แสดงดังรูปที่ 4.1 ง

สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนเคลือบผิว จากรูปที่ 4.3 และ 4.5 เมื่อคุณภาพตัดขวางของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนเคลือบผิว พบว่า เยื่อแผ่นยังมีลักษณะโครงสร้างแบบไม่สมมาตรเหมือนเดิม แต่ที่บริเวณผิวของเยื่อแผ่นจะมีชั้นเคลือบของ PVA ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ PVA ที่เพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) และเมื่อดูที่ผิวด้านบนของเยื่อแผ่นจะพบว่าเยื่อแผ่นมีลักษณะที่เรียบขึ้น

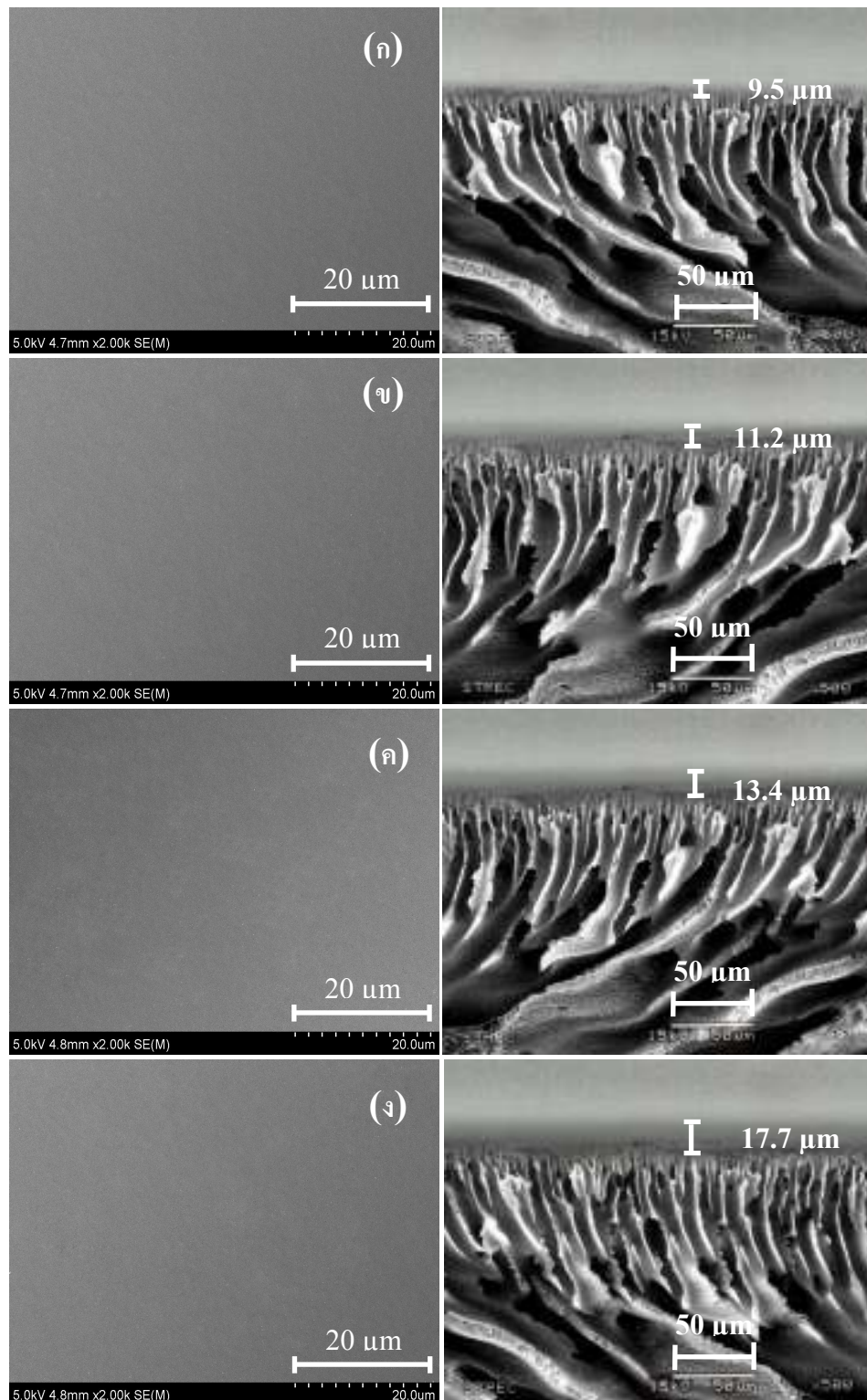
สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากรูป 4.4 เมื่อดูที่ภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น พบว่า ที่บริเวณผิวด้านบนของเยื่อแผ่นจะมีชั้นเคลือบของ PVA ที่มีความหนาใกล้เคียงกัน (ดังตารางที่ 4.1) ส่วนชั้นรองรับของเยื่อแผ่นจะมีขนาดของรูพรุนไม่เท่ากัน อธิบายด้วยเหตุผลเดียวกันกับการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่นด้วยวิธีผสม และเมื่อดูที่ผิวด้านบนของเยื่อแผ่นจะพบว่าเยื่อแผ่นมีลักษณะที่เรียบเช่นกัน



**รูปที่ 4.1** ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0 %wt (ข) 0.5 %wt (ค) 1.0 %wt และ (ง) 1.5 %wt  
 สภาวะ : พื้นผิวด้านบน: กำลังขยาย 1000 เท่า และภาพตัดขวาง: กำลังขยาย 500 เท่า



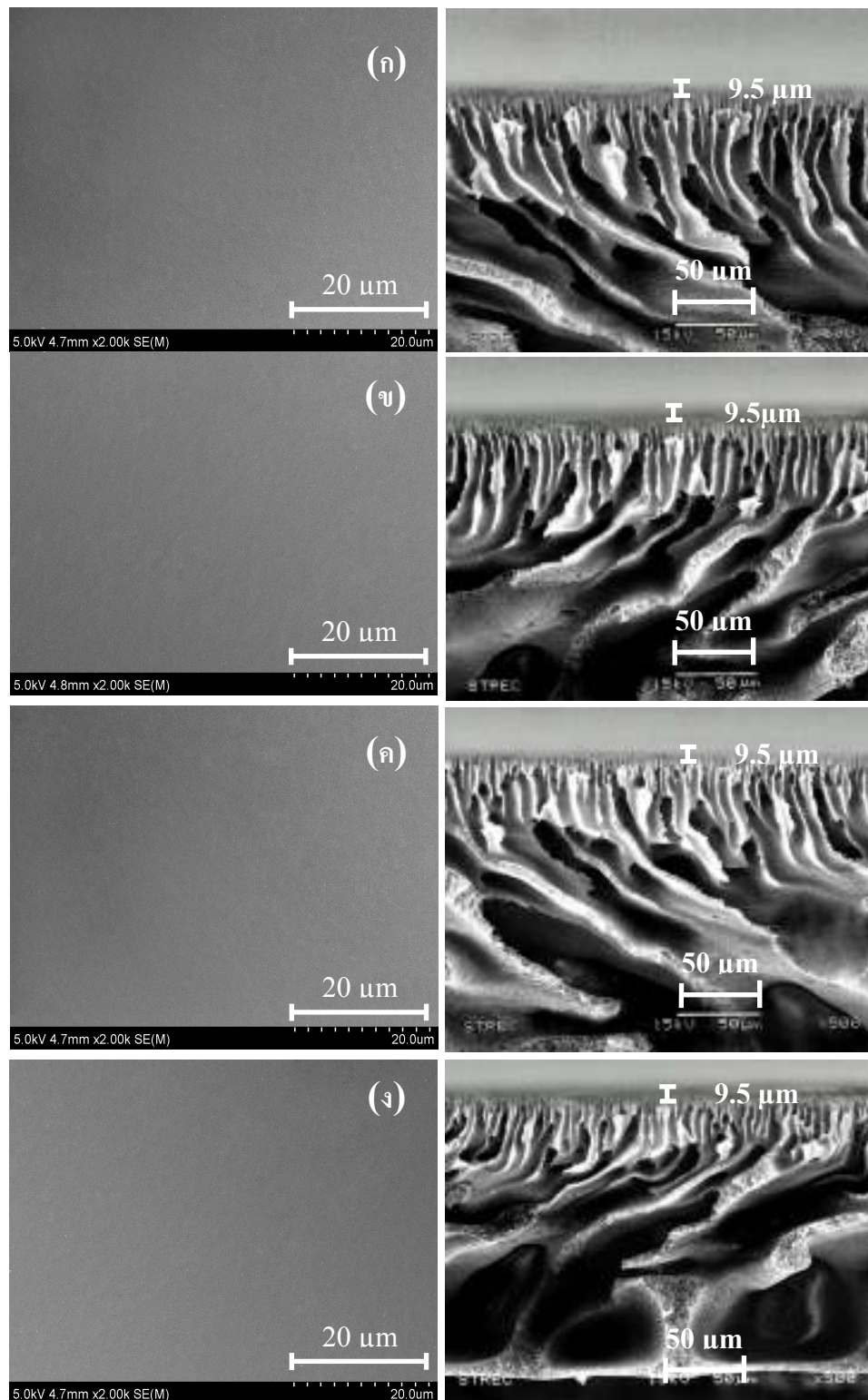
รูปที่ 4.2 ลักษณะภาพตัดขวาง (ขนาดขยาย) ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0 %wt (ข) 0.5 %wt (ค) 1.0 %wt และ (ง) 1.5 %wt



**รูปที่ 4.3** ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES เคลือบ PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

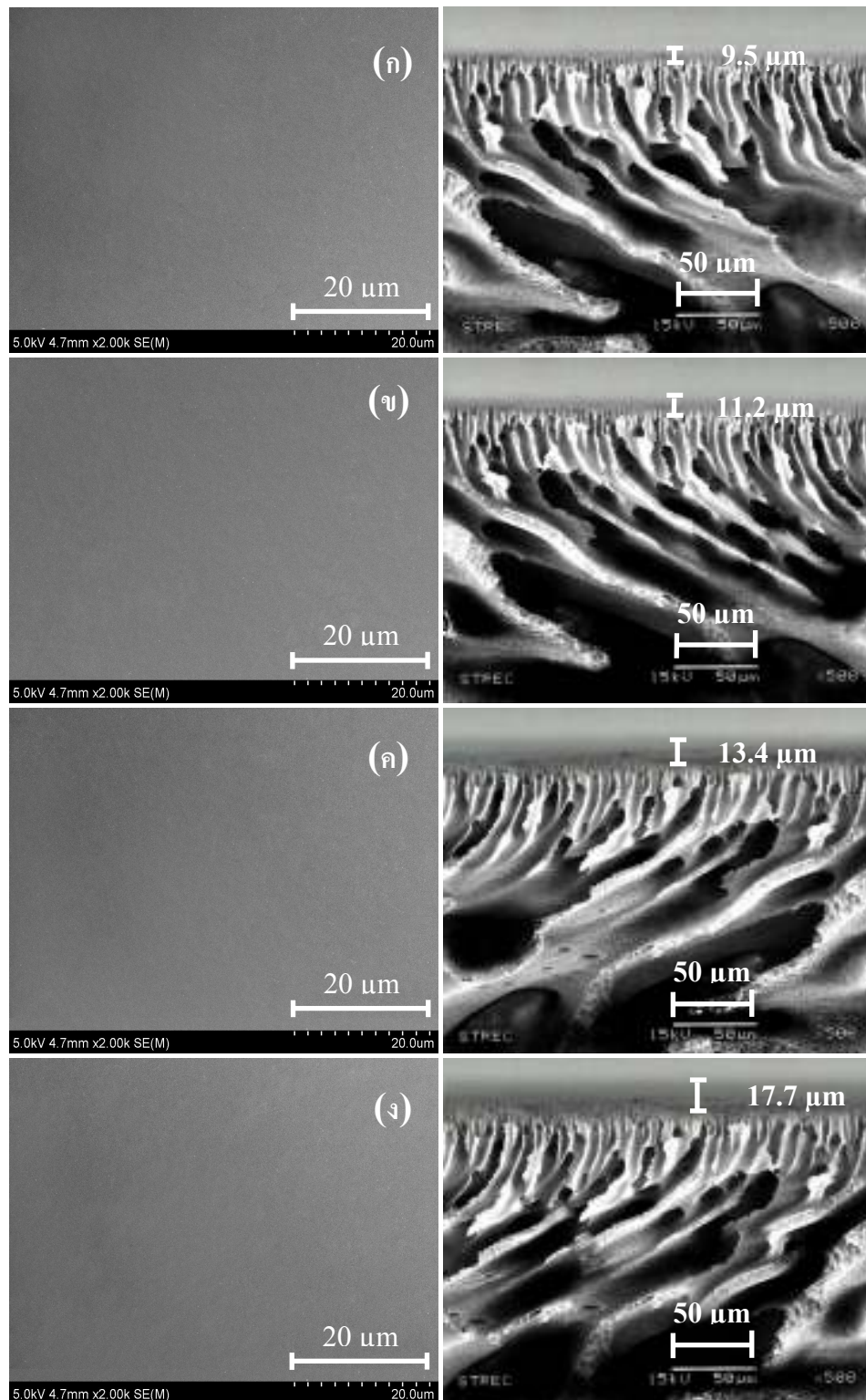
(ก) 0.01%wt (ข) 0.03 %wt (ค) 0.05 %wt และ (ง) 0.1 %wt

สภาวะ : พื้นผิวด้านบน: กำลังขยาย 1000 เท่า และภาพตัดขวาง: กำลังขยาย 500 เท่า



**รูปที่ 4.4** ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES 14 %wt ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0 %wt (ข) 0.5 %wt (ค) 1.0 %wt และ (ง) 1.5 %wt หลังจากนั้นเคลือบด้วย PVA 0.01 %wt

สภาวะ : พื้นผิวด้านบน: กำลังขยาย 1000 เท่า และภาพตัดขวาง: กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt หลังจากนั้นเคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 0.01%wt (ข) 0.03 %wt (ค) 0.05 %wt และ (ง) 0.1 %wt

สภาวะ : พื้นผิวด้านบน: กำลังขยาย 1000 เท่า และภาพตัดขวาง: กำลังขยาย 500 เท่า

ตารางที่ 4.1 ความหนาของชั้น PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่น

สัญลักษณ์	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )
วิธีเคลือบ PVA	
PES14/PVA0.01	9.5
PES14/PVA0.03	11.2
PES14/PVA0.05	13.4
PES14/PVA0.1	17.7
วิธี (ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ชั้นตอนผสม	
PES14/PVA0.01	9.5
PES14+PVA0.5/PVA0.01	9.5
PES14+PVA1.0/PVA0.01	9.5
PES14+PVA1.5/PVA0.01	9.5
วิธี (ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ชั้นตอนเคลือบผิว	
PES14+PVA1.0/PVA0.01	9.5
PES14+PVA1.0/PVA0.03	11.2
PES14+PVA1.0/PVA0.05	13.4
PES14+PVA1.0/PVA0.1	17.7

#### 4.2 ค่า Molecular weight cut-off (MWCO)

การทดลองหาค่า MWCO เป็นการทดสอบว่าเยื่อแผ่นที่ผลิตขึ้นนั้น มีความสามารถในการกักกันสารในช่วงขนาดโมเลกุล 500–300000 ซึ่งเป็นช่วงการแยกของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันหรือไม่ ทำการทดลองหาค่า MWCO โดยใช้สารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 4, 15, 35, 100 และ 400 kDa ตามลำดับ โดยกำหนดให้ MWCO มีค่าเท่ากับขนาดโมเลกุลของ PEG ที่เล็กที่สุด ซึ่งเยื่อแผ่นสามารถกักกันไว้ได้เกิน 90 %

สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม จากตารางที่ 4.2 พบว่า เยื่อแผ่นมีค่า MWCO ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PVA สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณโพลิเมอร์รวมในสารละลายโพลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับการควบคุมสารพองตัว (PVP) ไว้ที่ 2 %wt ทำให้สัดส่วนสารพองตัวต่อโพลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเล็กลง

สำหรับวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนเคลือบผิว จากตารางที่ 4.2 พบว่า เยื่อแผ่นมีค่า MWCO ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ PVA สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นมากขึ้น เยื่อแผ่นจะมีความหนาของชั้นเคลือบ PVA ที่หนาขึ้น (ดังรูปที่ 4.3, 4.5 และตารางที่ 4.1) ไปปิดกั้นการแพร่ผ่านของ PEG ส่งผลให้โมเลกุลของ PEG ที่ใช้ในการหาค่า MWCO แพร่ผ่านได้น้อยลง ค่า MWCO จึงลดลง

สำหรับวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม พบว่า MWCO มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน (11.4-11.7 kDa) เนื่องจากเมื่อทำการเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้นเท่ากันที่ 0.01 %wt เยื่อแผ่นจะมีความหนาของชั้นเคลือบ PVA ที่เท่ากัน (ดังตารางที่ 4.1) ส่งผลให้ค่า MWCO มีค่าใกล้เคียงกัน และจากการทดลองพบว่า PVA ที่ชั้นเคลือบส่งผลต่อค่า MWCO มากกว่า PVA ที่ผสมอยู่ในเยื่อแผ่น

เมื่อเปรียบเทียบค่า MWCO ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบ และผสม/เคลือบ จะให้ค่า MWCO ต่ำกว่าวิธีผสม เนื่องจากเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ จะมีชั้นความหนาของ PVA ที่ใช้เคลือบผิวเยื่อแผ่น ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของ PEG ที่ใช้ในการวัดค่า MWCO แพร่ผ่านได้ยากขึ้น ซึ่งเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่า MWCO ต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.2 ค่า MWCO ของเยื่อแผ่นหลังจากเพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีการต่างๆ

สัญลักษณ์	MWCO (kDa)
วิธีผสม PVA	
PES14	14.1
PES14+PVA0.5	13.4
PES14+PVA1.0	12.7
PES14+PVA1.5	12.2
วิธีเคลือบ PVA	
PES14/PVA0.01	11.7
PES14/PVA0.03	11.3
PES14/PVA0.05	11
PES14/PVA0.1	10.4
วิธี (ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ชั้นตอนผสม	
PES14/PVA0.01	11.7
PES14+PVA0.5/PVA0.01	11.6
PES14+PVA1.0/PVA0.01	11.5
PES14+PVA1.5/PVA0.01	11.4
วิธี (ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ชั้นตอนเคลือบผิว	
PES14+PVA1.0/PVA0.01	11.5
PES14+PVA1.0/PVA0.03	11.1
PES14+PVA1.0/PVA0.05	10.8
PES14+PVA1.0/PVA0.1	10

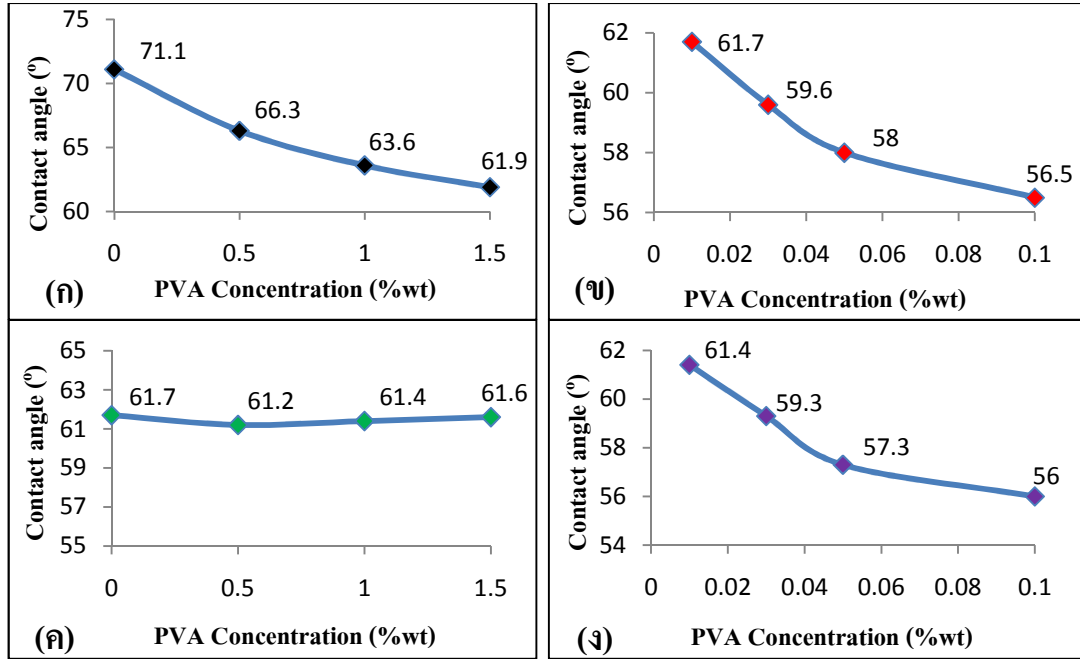
### 4.3 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle, $\theta$ )

Contact angle เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ของผิวเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเยื่อแผ่นที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ และความสามารถในการต้านการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น โดยในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเยื่อแผ่นที่มีค่า Contact angle สูงจะมีแนวโน้มในการเกิดการคุดจับโปรตีน และฟาวลิงสูงกว่าเยื่อแผ่นที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ หรือมีค่า Contact angle ต่ำ

จากผลการทดสอบค่า Contact angle ด้วยเครื่อง Contact angle measurement พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม, วิธีเคลือบ, และวิธีผสม/เคลือบ ที่ปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการเคลือบ ให้ผลเหมือนกัน ดังรูปที่ 4.6 (ก), (ข) และ (ง) กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น ค่า Contact angle จะลดลง แสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก PVA เป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ไม่ว่าจะเป็นในขั้นตอนการผสมหรือขั้นตอนการเคลือบ จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [6] ที่ศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน PES โดยวิธีการเคลือบผิวด้วย PVA และทำการเชื่อมขวางด้วยสารละลาย Borax พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น ค่า Contact angle มีค่าลดลง จาก  $64.1^{\circ}$  เป็น  $42.8^{\circ}$  เนื่องจากโมเลกุลของ PVA ดูดซับบนพื้นผิวของเยื่อแผ่นมากขึ้น ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำสูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม พบว่าค่า Contact angle ของเยื่อแผ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $61.2^{\circ}$  -  $61.7^{\circ}$  ดังรูปที่ 4.6 (ค) เนื่องจากการวัดค่า Contact angle จะวัดมุมตกกระทบของน้ำกับผิวของเยื่อแผ่นโดยตรง ซึ่งเยื่อแผ่นดังกล่าวทำการเคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้นเดียวกันคือ 0.01 %wt จึงมีปริมาณ PVA ที่อยู่บนผิวของเยื่อแผ่นใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเยื่อแผ่นดังกล่าวจึงมีค่า Contact angle ใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า Contact angle ของการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่นด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ, และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt เคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14/PVA0.1) ให้ค่า Contact angle  $56.5^{\circ}$  และวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt หลังจากนั้นเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่า Contact angle  $56^{\circ}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการวัดค่า Contact angle จะวัดมุมตกกระทบระหว่างน้ำกับผิวของเยื่อแผ่น และเยื่อแผ่นทั้ง 2 ชนิด เคลือบด้วย PVA 0.1 %wt ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน และมีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นอื่นๆ ซึ่งหมายความว่า จะมีปริมาณโมเลกุลของ PVA เกาะติดที่บริเวณ ผิวเยื่อแผ่นมากกว่าเยื่อแผ่นอื่น แสดงได้จากความหนาของชั้น PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่นดังตารางที่ 4.1 ดังนั้นน้ำจึงสัมผัสกับ PVA โดยตรง จึงส่งผลให้ค่า Contact angle ของเยื่อแผ่นดังกล่าวมีค่าต่ำสุด เยื่อแผ่นจึงมีความชอบน้ำสูงสุด



รูปที่ 4.6 ค่า Contact angle ของเยื่อแผ่น (ก) PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ, (ข) PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ, (ค) PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt และ (ง) PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.4 คุณสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่น (Mechanical properties)

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีความสำคัญอย่างสูงต่อการนำวัสดุไปใช้งานและเป็นสิ่งที่จะบอกว่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุสามารถที่จะรับหรือทนทานแรงภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ช่วยให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและเลือกนำไปใช้ใช้งานได้เหมาะสม คุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญนำมาใช้พิจารณาคือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวค่า (% Elongation at break) คือปริมาณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่างภายใต้แรงดึง โดยทั่วไปถ้าวัสดุมีความเปราะ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดจะมีค่าน้อย

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Tensile strength และ % Elongation at break) ของเยื่อแผ่นด้วยเครื่อง Universal testing machine สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น ค่า Tensile strength และ % Elongation at break จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PVA มีโครงสร้างเหมือนผลึก (Crystalline) มีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความเหนียว เมื่อนำ PVA ผสมกับ PES จึงมีผลทำให้ชิ้นรูพรุน

ของเยื่อแผ่นมีลักษณะโครงสร้างที่แน่นขึ้น จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นมีค่า Tensile strength และ % Elongation at break ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของ PVA ที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะทำให้เยื่อแผ่นมีชั้นเคลือบของ PVA ที่หนาขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นมีค่า Tensile strength และค่า % Elongation Break สูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [21] จากการนำเยื่อแผ่น PVA (เตรียมจาก PVA 10 %wt ละลายในน้ำ) มาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล พบว่า ค่า Tensile strength และ % Elongation at break มีค่าสูง คือ 14 MPa และ 339.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจาก PVA มีโครงสร้างเหมือนผลึก มีความเหนียว

เมื่อนำเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าค่า Tensile strength และ % Elongation at break ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ จะมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม หรือเคลือบ PVA เพียงอย่างเดียว และเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt หลังจากนั้นเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลสูงสุด เนื่องจากการผสม PVA ไปในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่น PES จะส่งผลให้โครงสร้างชั้นรูพรุนของเยื่อแผ่นมีลักษณะโครงสร้างที่แน่นขึ้น และทำให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้นด้วย และเมื่อความเข้มข้นของ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่นสูงขึ้น PVA ก็จะสามารถเกาะติดบนเยื่อแผ่นได้แน่นขึ้นด้วยแรง Hydrophilic interaction และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ PVA ที่ผิวเยื่อแผ่นและ PVA ในเยื่อแผ่นด้วย GA จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นดังกล่าวมีค่า Tensile strength และ % Elongation at break สูงที่สุด

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ

สัญลักษณ์	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
วิธีผสม PVA		
PES14	3.063	7.632
PES14+PVA0.5	3.355	9.894
PES14+PVA1.0	3.515	11.149
PES14+PVA1.5	3.639	12.575
วิธีเคลือบ PVA		
PES14/PVA0.01	3.253	8.865
PES14/PVA0.03	3.433	10.534
PES14/PVA0.05	3.534	12.951
PES14/PVA0.1	3.688	14.676
วิธี (ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ชั้นตอนผสม		
PES14/PVA0.01	3.253	8.865
PES14+PVA0.5/PVA0.01	3.440	10.883
PES14+PVA1.0/PVA0.01	3.639	12.265
PES14+PVA1.5/PVA0.01	4.110	15.261
วิธี (ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ชั้นตอนเคลือบผิว		
PES14+PVA1.0/PVA0.01	3.639	12.265
PES14+PVA1.0/PVA0.03	3.718	13.291
PES14+PVA1.0/PVA0.05	3.805	14.066
PES14+PVA1.0/PVA0.1	4.341	16.681

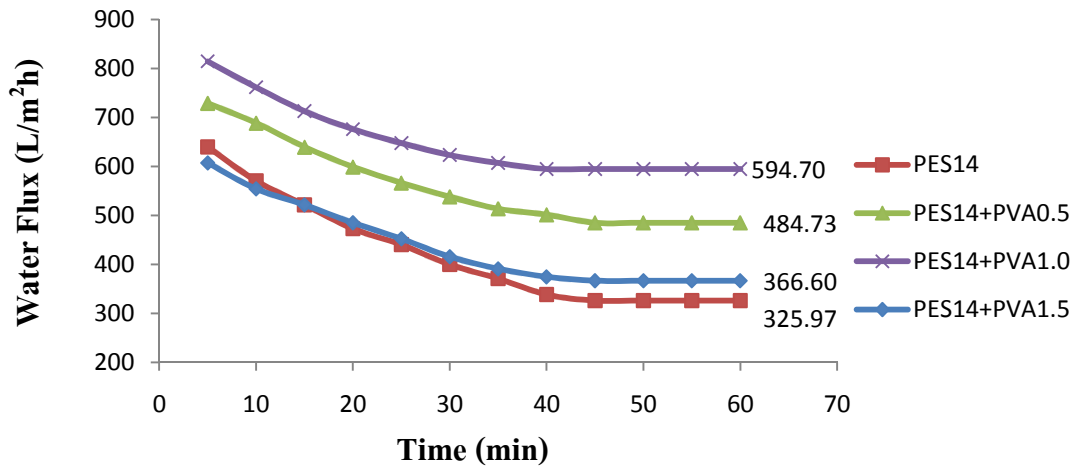
#### 4.5 ค่าฟลักซ์น้ำ (Water flux)

การทดสอบค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นสามารถทำได้โดยนำเยื่อแผ่นที่เพิ่มความขบหน้ำด้วยวิธีการต่างๆ ที่ผลิตได้ไปติดตั้งในชุดการทดลองอัลตราฟิลเตรชันดังรูปที่ 3.1 ป้อนน้ำ DI ผ่าน โดยปรับความดันที่ 2 bar วัดอัตราการไหลของเพอมีเอท ทุกๆ 5 min บันทึกผล จนกระทั่งฟลักซ์เข้าสู่สภาวะคงตัว เพื่อนำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์น้ำ ซึ่งค่าฟลักซ์น้ำที่ได้นี้ เป็นค่าเฉลี่ยของเยื่อแผ่น 3 แผ่น

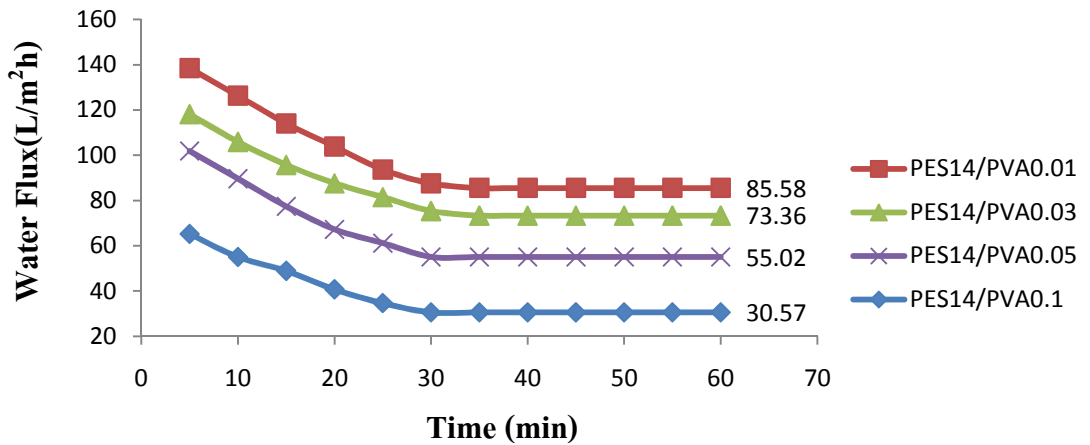
สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม และวิธีผสม/เคลือบผิว โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากรูปที่ 4.7 และ 4.9 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0-1.0 %wt จะส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PVA มีหมู่ -OH ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำสูงขึ้น ค่า Contact angle จึงลดลง (ดังรูปที่ 4.6 ก) ค่าฟลักซ์น้ำจึงสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA เป็น 1.5 %wt ค่าฟลักซ์น้ำกลับมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าเยื่อแผ่นจะมีคุณสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้นก็ตาม (ค่า Contact angle ลดลง, จากรูป 4.6 ก) ซึ่งเกิดจากปริมาณโพลีเมอร์รวมในสารละลายโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้นประกอบกับการควบคุมสารพองตัว (PVP) ไว้ที่ 2 %wt ทำให้สัดส่วนสารพองตัวต่อโพลีเมอร์ลดลง ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเล็กลง เยื่อแผ่นมีความต้านทานการไหลสูงขึ้น ค่าฟลักซ์น้ำจึงมีค่าลดลง แต่เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จะมีค่าฟลักซ์น้ำต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสมค่อนข้างมาก เนื่องจากชั้นฟิล์มของ PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่น (ดังรูปที่ 4.4) ไปปิดกั้นรูพรุนของเยื่อแผ่น ส่งผลให้เกิดความต้านทานไหลที่สูงขึ้น น้ำจึงแพร่ผ่านได้ยาก

สำหรับวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการเคลือบผิวเยื่อแผ่น จากรูปที่ 4.8 และ 4.10 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0-0.1 %wt จะส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผลความหนาของชั้นฟิล์ม PVA ที่ไปปิดกั้นชั้นรูพรุนที่ผิวของเยื่อแผ่น (ดังรูปที่ 4.3, 4.5 และตารางที่ 4.1) ทำให้ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลสูงขึ้น จึงส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลง ถึงแม้ว่าเยื่อแผ่นที่เคลือบด้วย PVA จะมีคุณสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้นก็ตาม (ค่า Contact angle ลดลง, ดังรูปที่ 4.6 ข และ ง) แต่เนื่องจากชั้นฟิล์มที่หนาขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) มีผลต่อค่าฟลักซ์น้ำมากกว่าความชอบน้ำของเยื่อแผ่น จึงส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Na และคณะ [9] ซึ่งทำการเคลือบ PVA บนเยื่อแผ่นต่างๆ พบว่า ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม PVA จาก 0 ถึง 6 %wt

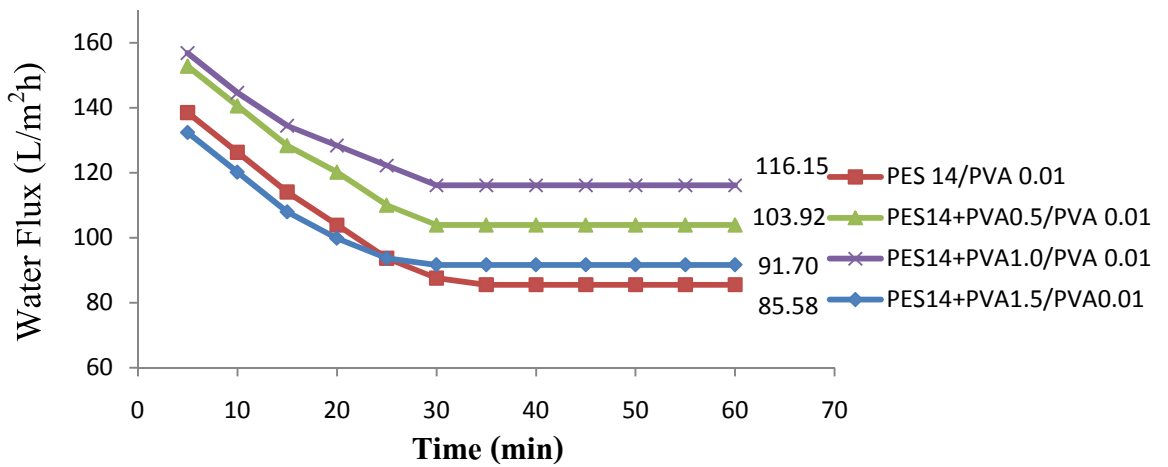
เมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม ให้ค่าฟลักซ์น้ำสูงที่สุด เนื่องจากการเพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสมจะไม่มีชั้นความหนาของ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่น (จากรูปที่ 4.1 และ 4.2) ที่ไปปิดกั้นรูพรุนของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นดังกล่าวจึงมีค่าฟลักซ์น้ำที่สูงกว่าการเพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีอื่น



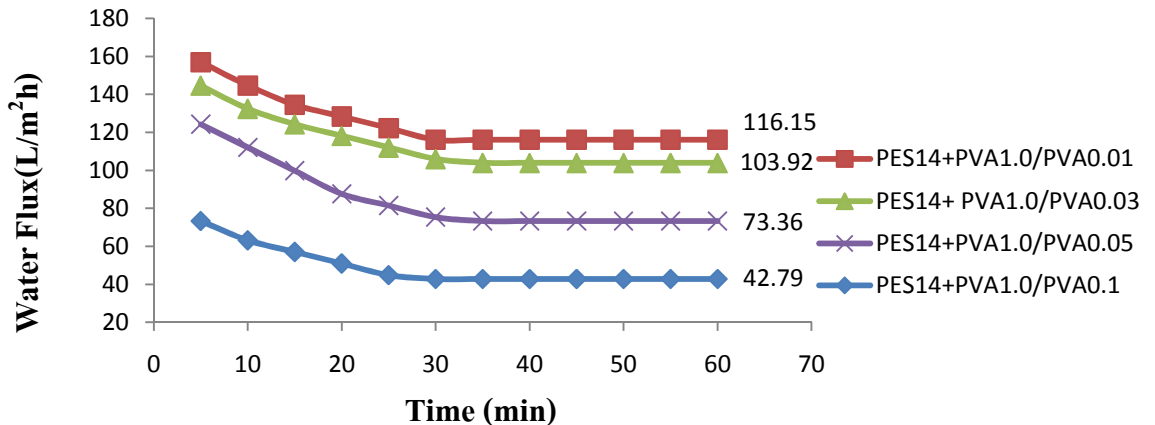
รูปที่ 4.7 ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt



รูปที่ 4.8 ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03 0.05 0.1 %wt



รูปที่ 4.9 ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0, 1.5 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %



รูปที่ 4.10 ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt

#### 4.6 การทดสอบความคงทนของเยื่อแผ่น (Membrane stability)

ความคงทนของเยื่อแผ่นสามารถแสดงด้วยเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ (% Flux reduction) และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA ( $PVA\ Loss_{UF}$ , %wt) หลังจากกรองน้ำเป็นเวลา 20 ชั่วโมง สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสมและวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่น พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น เยื่อแผ่นจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.4 เนื่องจาก PVA มีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น PVA จึงมีโอกาสละลายน้ำและหลุดออกไปสูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นการเคลือบเยื่อแผ่น PES ที่มีความไม่ชอบน้ำสูงด้วย PVA ที่มีความชอบน้ำสูง ทำให้การเกาะติดของ PVA ไม่คงทน เมื่อผ่านการกรองเป็นระยะเวลาานาน จึงเกิดการหลุดออกของ PVA ได้ และเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ PVA หลุดออกได้มากขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบความคงทนของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำระหว่างวิธีผสมและวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่น พบว่า เยื่อแผ่นที่ความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบผิวมีค่าความคงทนต่ำกว่าวิธีผสม เนื่องจากเมื่อกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่นเป็นเวลานานๆ เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบผิวมีการละลายน้ำและหลุดออกของ PVA ในปริมาณที่มากกว่าวิธีผสม จึงส่งผลให้ PVA ที่อยู่บนผิวเคลือบสามารถละลายน้ำและหลุดออกไปกับน้ำได้ เนื่องจากชั้นเคลือบได้รับแรงเฉือนจากน้ำหรือสารละลายที่ไหลผ่านผิวหน้าเยื่อแผ่นโดยตรง

สำหรับวิธีผสม/เคลือบผิว โดยศึกษาความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0-1.0 %wt จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการผสม ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้น ค่า Contact angle ลดลง (ดังรูปที่ 4.6 ก และ ค) จึงทำให้ PVA ที่นำมาเคลือบบนเยื่อแผ่นเกิดการยึดติดได้ดีขึ้น เนื่องจากเกิดแรง Hydrophilic

interaction ระหว่าง PVA ในเยื่อแผ่น กับ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่น รวมทั้งผลของการเชื่อมขวางระหว่าง PVA ในเยื่อแผ่นกับ PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วยสาร GA อีกด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสมเท่ากับ 1.5 %wt ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA กลับมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการเติมสารเชื่อมขวาง GA ในขั้นตอนผสมครั้งที่ 1.0 %wt ส่งผลให้การเชื่อมขวาง PVA ที่ความเข้มข้น 1.5 %wt เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ มีปริมาณ PVA บางส่วนไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง PVA จึงมีโอกาสละลายน้ำและหลุดไปกับน้ำได้

สำหรับวิธีผสม/เคลือบผิว โดยศึกษาความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการเคลือบผิวเยื่อแผ่น จากตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0-0.1 %wt จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผลของ Hydrophilic interaction และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA ที่ผิวเยื่อแผ่นและในเยื่อแผ่นด้วย GA จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA มีแนวโน้มลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความคงทนของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ พบว่า เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของ PVA ต่ำสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นดังกล่าวมีค่าความคงทนสูงสุด เนื่องจากผลของ Hydrophilic interaction และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA ที่ผิวเยื่อแผ่นและ PVA ในเยื่อแผ่นด้วย GA ดังกล่าวข้างต้น

ดังนั้นจากการทดลองเพื่อหาค่าความคงทนจากการกรองน้ำเป็นเวลา 20 ชั่วโมง จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่นโดยวิธีผสม/เคลือบ สามารถเพิ่มความคงทนให้กับเยื่อแผ่นได้จริง ซึ่งวัดได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเยื่อแผ่นที่ลดลง ซึ่งแสดงว่า PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่นสามารถเกาะติดเยื่อแผ่นได้ดีขึ้น เมื่อปรับสภาพเยื่อแผ่นก่อนการเคลือบผิวให้มีความชอบน้ำมากขึ้นด้วยการผสม PVA ลงไปในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่น

ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์น้ำ และเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเยื่อแผ่นหลังกรองน้ำเป็นเวลา 20 ชั่วโมง

สัญลักษณ์	Initial Water Flux (L/m <sup>2</sup> h)	Final Water Flux 20 h (L/m <sup>2</sup> h)	Flux reduction (%)	PVA Loss <sub>UF</sub> (%wt)
วิธีผสม PVA				
PES14+PVA0.5	484.70	435.40	10.17	7.88
PES14+PVA1.0	594.70	505.60	14.98	9.93
วิธีเคลือบ PVA				
PES14/PVA0.01	85.58	65.35	23.64	12.13
PES14/PVA0.1	30.57	20.55	32.78	17.23
วิธี(ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ขึ้นตอนผสม				
PES14+PVA0.5/PVA0.01	103.92	95.00	8.58	7.06
PES14+PVA1.0/PVA0.01	116.15	110.00	5.29	3.49
PES14+PVA1.5/PVA0.01	91.70	80.00	12.75	11.05
วิธี(ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ขึ้นตอนเคลือบผิว				
PES14+PVA1.0/PVA0.01	116.15	110.00	5.29	3.49
PES14+PVA1.0/PVA0.1	42.79	40.60	5.12	3.25

#### 4.7 การทดสอบการดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่นและการหลุดออกของ PVA

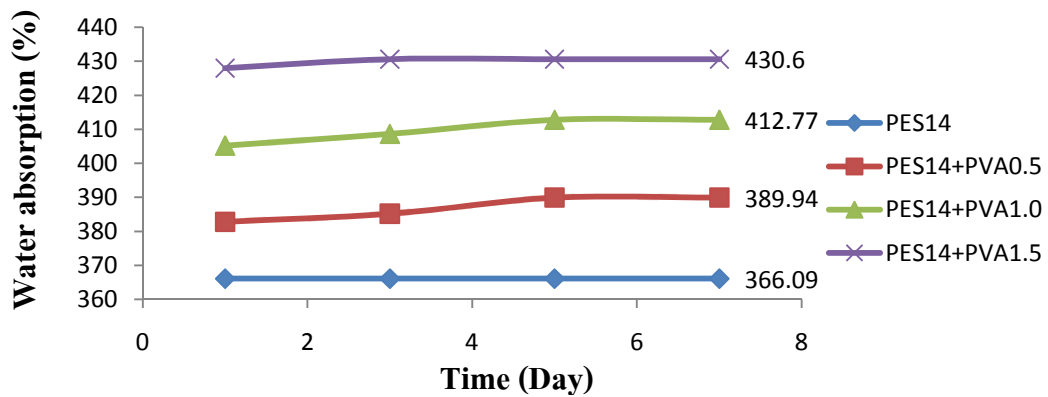
การทดสอบการดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่นทำได้โดยนำเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีต่างๆ ไปซังน้ำหนักแห้งก่อนแช่ในน้ำ DI จากนั้นนำเยื่อแผ่นเปียกที่ผ่านการแช่ในน้ำ DI ที่เวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน ไปซังน้ำหนักเปียก จากนั้นนำเยื่อแผ่นที่ผ่านการซังน้ำหนักเปียกมาทำให้แห้ง โดยการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ( $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) เป็นเวลา 2 วัน แล้วชั่งน้ำหนักเยื่อแผ่นแห้ง จากนั้นนำน้ำหนักของเยื่อแผ่นเปียกและแห้ง (หลังการแช่ในน้ำ DI) ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (% Water absorption) และเปอร์เซ็นต์ของ PVA ที่หายไป (PVA Loss, %wt)

##### 4.7.1 การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น (Water absorption)

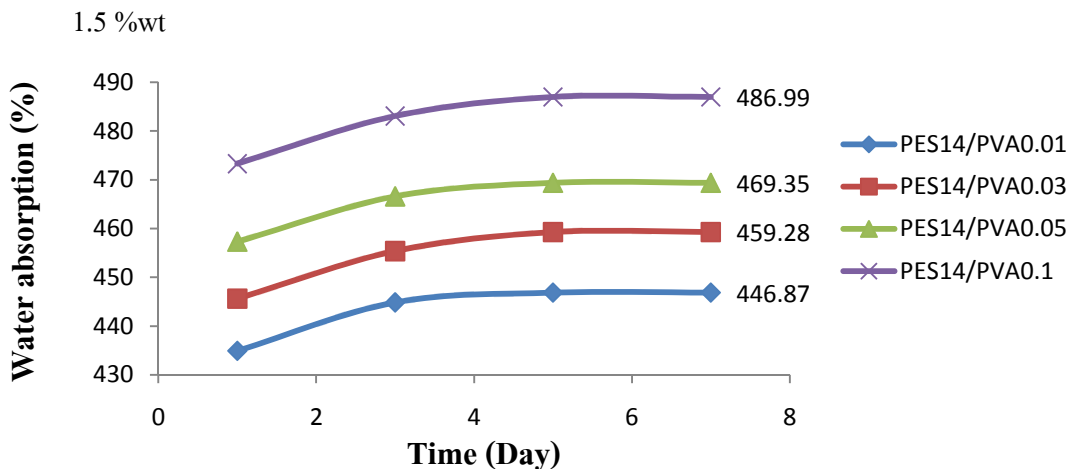
สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำทั้งวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ จากรูปที่ 4.11 – 4.14 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เนื่องจาก PVA เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำสูง และการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA เป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลของ PVA ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่น ดังนั้นเยื่อแผ่นจึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่เยื่อแผ่นในน้ำ DI จะพบว่าเยื่อแผ่นมีแนวโน้มในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและจะเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ระยะเวลาหนึ่งๆ

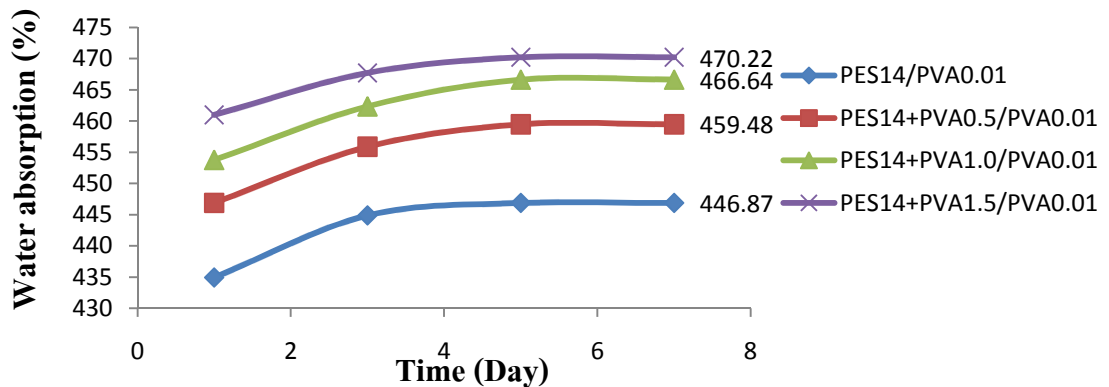
เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำสูงที่สุด เนื่องจาก PVA มีคุณสมบัติชอบน้ำ เมื่อผสม PVA ลงไปในเยื่อแผ่น PES จะทำให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำมากขึ้น (ค่า Contact angle มีค่าลดลง, จากรูปที่ 4.6) PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่นจะสะสมและเกาะติดเยื่อแผ่นได้ดีขึ้นด้วยแรง Hydrophilic interaction จึงทำให้เยื่อแผ่นดังกล่าวมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด



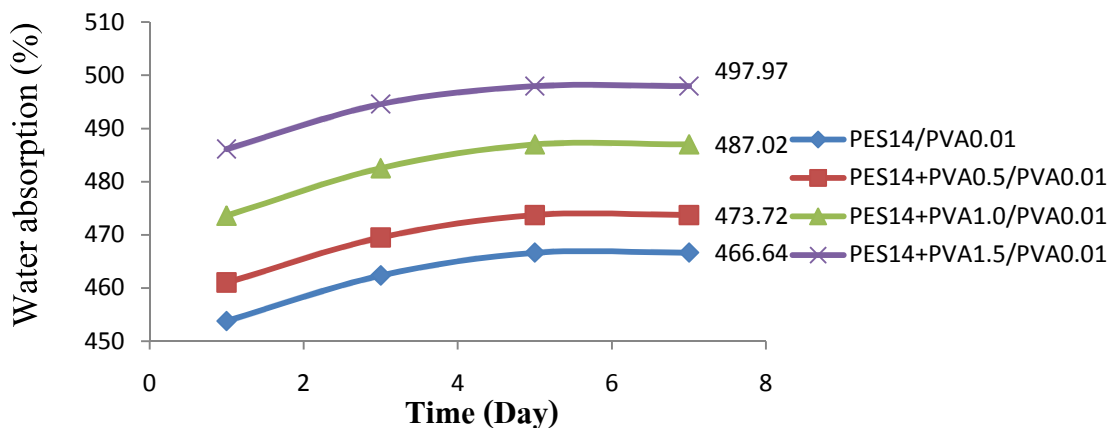
รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt



รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt



รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt



รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt

#### 4.7.2 การหลุดของ PVA (PVA Loss, %wt)

สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม และวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่น จากรูปที่ 4.15 – 4.16 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น เยื่อแผ่นจะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PVA มีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น PVA จึงมีโอกาสละลายน้ำและหลุดออกสูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นการเคลือบเยื่อแผ่น PES ที่มีความไม่ชอบน้ำสูงด้วย PVA ที่มีความชอบน้ำสูง ทำให้การเกาะติดของ PVA ไม่คงทน และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่เยื่อแผ่นในน้ำ DI จะพบว่า PVA มีแนวโน้มในการละลายน้ำและหลุดออกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับ PVA นานขึ้น

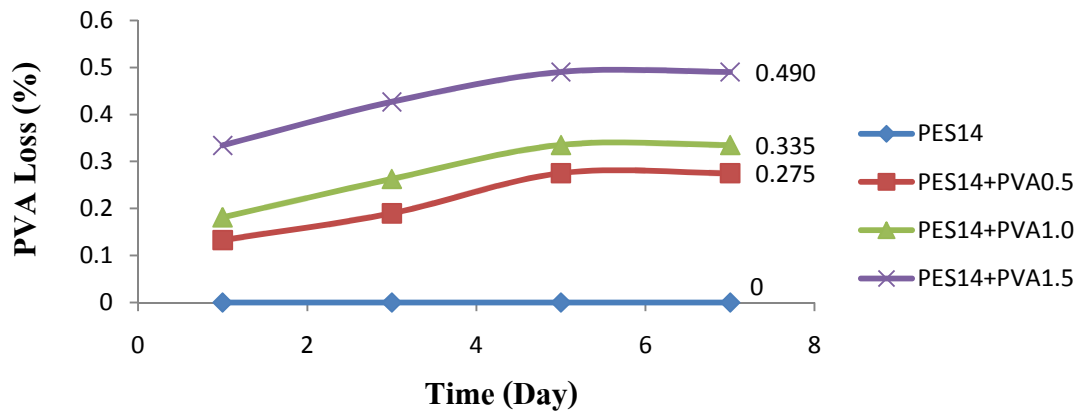
สำหรับวิธีผสม/เคลือบผิว ด้วย PVA โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากรูปที่ 4.17 พบว่า พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA จาก 0-1.0 %wt จะส่งผลให้เยื่อแผ่นมีแนวโน้มในการหลุดออกของ PVA ต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการผสม ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้นจึงทำให้ PVA ที่นำมาเคลือบบนเยื่อแผ่นเกิดการยึดติดได้ดีขึ้น จากแรง Hydrophilic interaction และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA ที่ผิวเยื่อแผ่นและ PVA ในเยื่อแผ่น ด้วย GA ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ แต่ที่ความเข้มข้น PVA ในขั้นตอนผสมเท่ากับ 1.5 %wt การหลุดหายไปของ PVA กลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเติมสารเชื่อมขวาง GA ในขั้นตอนผสมครั้งที่ 1.0 %wt ส่งผลให้การเชื่อมขวาง PVA ที่ความเข้มข้น 1.5 %wt เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ มีปริมาณ PVA บางส่วนไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง PVA จึงมีโอกาสละลายน้ำและหลุดไปกับน้ำได้

สำหรับวิธีผสม/เคลือบผิว ด้วย PVA โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการเคลือบผิว เยื่อแผ่น จากรูปที่ 4.18 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA จาก 0.01-0.1 %wt จะส่งผลให้เยื่อแผ่นมีแนวโน้มในการหลุดหายไปของ PVA ต่ำลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ PVA ในขั้นเคลือบเพิ่มขึ้น จะทำให้เยื่อแผ่นเกิดการเกาะติดมากขึ้น เนื่องจากแรง Hydrophilic interaction และปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง PVA ในเยื่อแผ่นกับ PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วยสาร GA ดังกล่าวข้างต้น จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA มีแนวโน้มลดลง

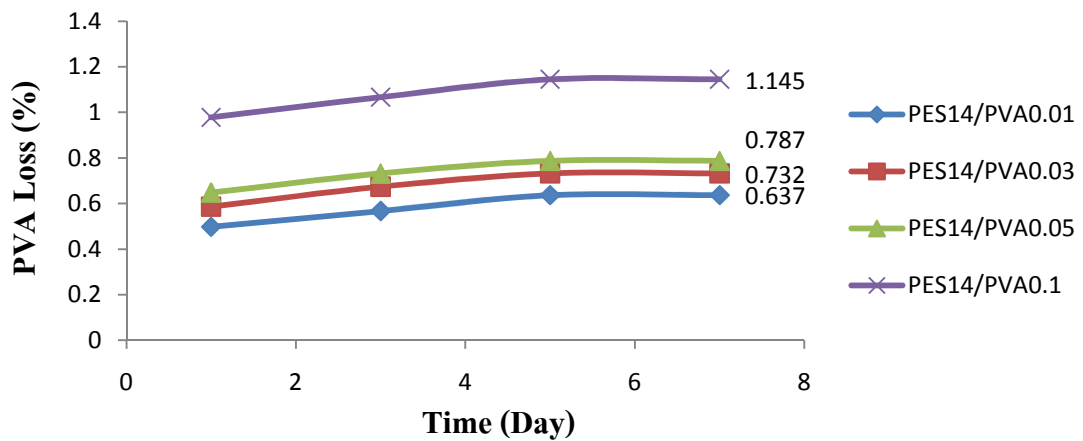
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การการหลุดออก PVA ต่ำสุด เนื่องจากการผสม PVA ไปในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่น PES เพื่อให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำมากขึ้น จะช่วยให้ PVA ที่นำมาเคลือบบนเยื่อแผ่นเกิดการเกาะติดได้ดีขึ้นด้วยแรง Hydrophilic interaction และปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง PVA ในเยื่อแผ่นกับ PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วยสาร GA จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การการหลุดออก PVA ต่ำสุด

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA ที่เกิดจากการแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน (PVA Loss, %wt จากรูปที่ 4.15-4.18) และเปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA จากการกรองน้ำเป็นเวลา 20 ชั่วโมง (PVA Loss<sub>UF</sub>, %wt จากตารางที่ 4.4) ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำในทุกวิธี พบว่ามีค่าสอดคล้องกันในทุกๆ เยื่อแผ่น แต่เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA จากการกรองน้ำเป็นเวลา 20 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่า เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA จากการแช่น้ำ 7 วัน เนื่องจากการกรองน้ำมีผลของแรงเฉือน

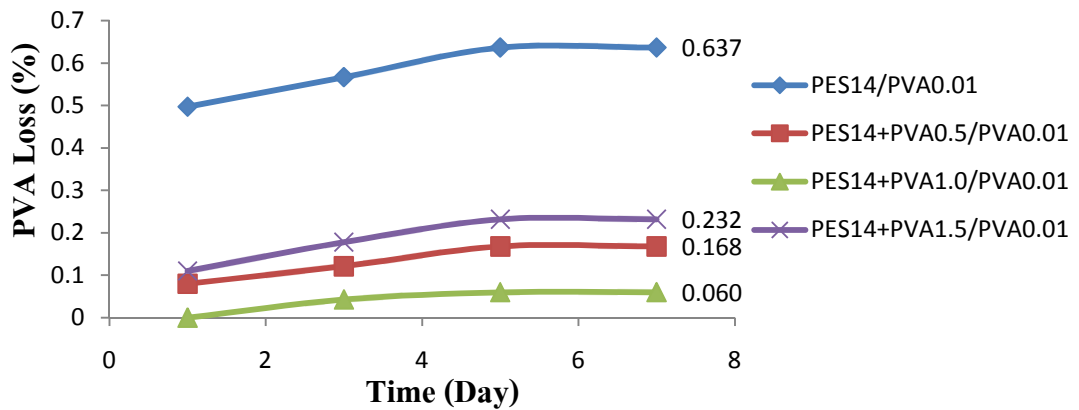
ระหว่างน้ำกับเยื่อแผ่น จึงส่งผลให้ PVA ในเยื่อแผ่นและที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นสามารถละลายน้ำและหลุดออกได้ง่ายกว่าการแช่น้ำที่เวลา 7 วัน



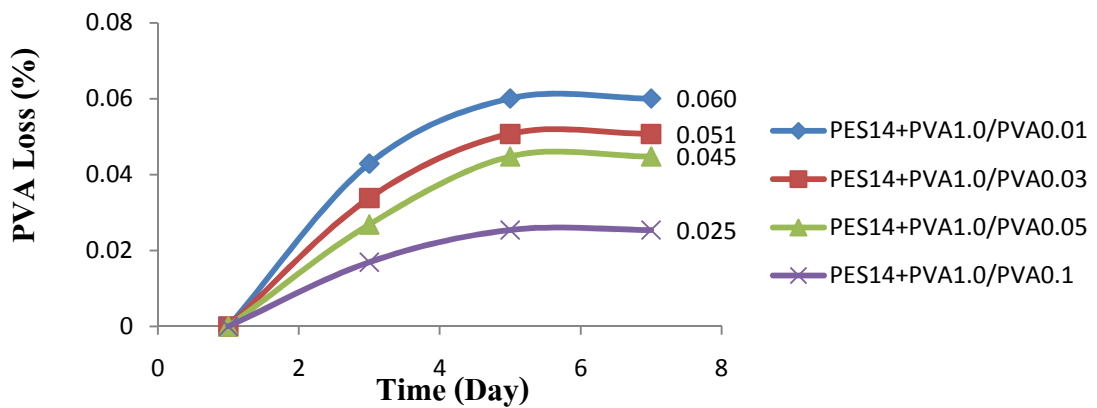
รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์หลุดของ PVA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt



รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์หลุดของ PVA ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt



รูปที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์หลุดของ PVA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt



รูปที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์หลุดของ PVA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt

## 4.8 การทดสอบการกรองโปรตีนของเยื่อแผ่น

### 4.8.1 ฟลักซ์ของสารละลายโปรตีน

สารละลายโปรตีนที่นำมาใช้ในการทดสอบคุณสมบัติการต้านการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น คือ สารละลายโปรตีน BSA ความเข้มข้น 1.0 g/l และมี pH เท่ากับ 4.7 (Isoelectric point) จากการทดลองโดยวัดค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีน BSA เทียบกับเวลา พบว่า เยื่อแผ่นที่ผลิตได้นี้มีการลดลงของฟลักซ์อย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของโปรตีนเคลื่อนที่มาสะสมที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นและจะค่อยๆ สะสมมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 150 นาที ค่าฟลักซ์จะต่ำที่สุด

สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม จากรูปที่ 4.19 พบว่า ฟลักซ์สารละลายโปรตีนของเยื่อแผ่น PES ที่ไม่ได้ผสม PVA จะมีค่าฟลักซ์ต่ำที่สุด เนื่องจากเกิดการอุดตันและสะสมของโมเลกุลโปรตีนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นด้วยแรงกระทำ Hydrophobic interaction ทำให้เกิดความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อผสม PES กับ PVA 0.5 และ 1.0 %wt ส่งผลให้ฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นลดลง ซึ่งเป็นผลมาจาก PVA เป็นสารที่มีความชอบน้ำ เมื่อผสมในสารละลายโพลีเมอร์ PES ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ทำให้เยื่อแผ่นที่เตรียมได้มีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้น (ค่า Contact angle ลดลง ดังรูปที่ 4.6) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น PVA เป็น 1.5 %wt ฟลักซ์สารละลายโปรตีนกลับมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของโพลีเมอร์รวมในสารละลายโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเล็กลง ค่า MWCO มีค่าลดลง (ดังตารางที่ 4.2) เยื่อแผ่นจึงมีความต้านทานต่อการไหลเพิ่มขึ้น

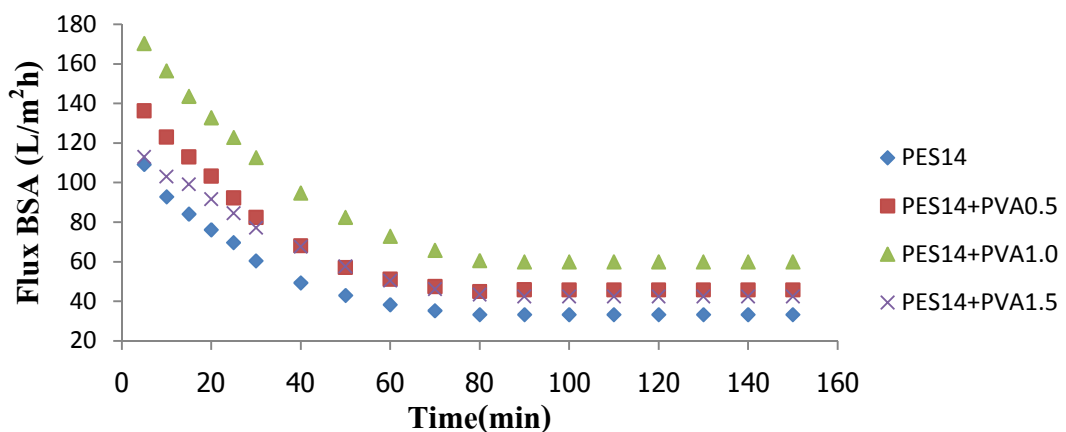
แต่เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสมและผสม/เคลือบผิว ด้วย PVA โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากรูปที่ 4.21 พบว่าเยื่อแผ่นจะมีค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีนต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสมค่อนข้างมาก เนื่องจากความหนาของชั้นฟิล์ม PVA ที่เคลือบผิว (ดังรูปที่ 4.4) ไปปิดกั้นรูพรุนของเยื่อแผ่น ส่งผลให้เกิดความต้านทานการไหล สารละลายโปรตีน BSA จึงแพร่ผ่านได้ยาก ฟลักซ์สารละลายจึงมีค่าค่อนข้างต่ำ

สำหรับวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบผิว ด้วย PVA โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการเคลือบผิวเยื่อแผ่น จากรูปที่ 4.20 และ 4.22 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0-0.1 %wt จะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนของเยื่อแผ่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ชั้นฟิล์ม PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่นหนาขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) และชั้นฟิล์มของ PVA ที่หนาขึ้นจะไปปิดกั้นรูพรุนของเยื่อแผ่น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการไหลสูงขึ้น ทำให้เยื่อแผ่นมีค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีนลดลง ถึงแม้ว่าเยื่อแผ่นที่เคลือบผิวด้วย PVA จะมีความชอบน้ำจะเพิ่มขึ้นก็ตาม (ค่า Contact angle ลดลง, ดังรูปที่ 4.4) แต่เนื่องจากความหนาของชั้นฟิล์ม PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่นส่งผลต่อค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนมากกว่าความชอบน้ำของเยื่อแผ่น จึงทำให้ค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนมีแนวโน้มลดลง

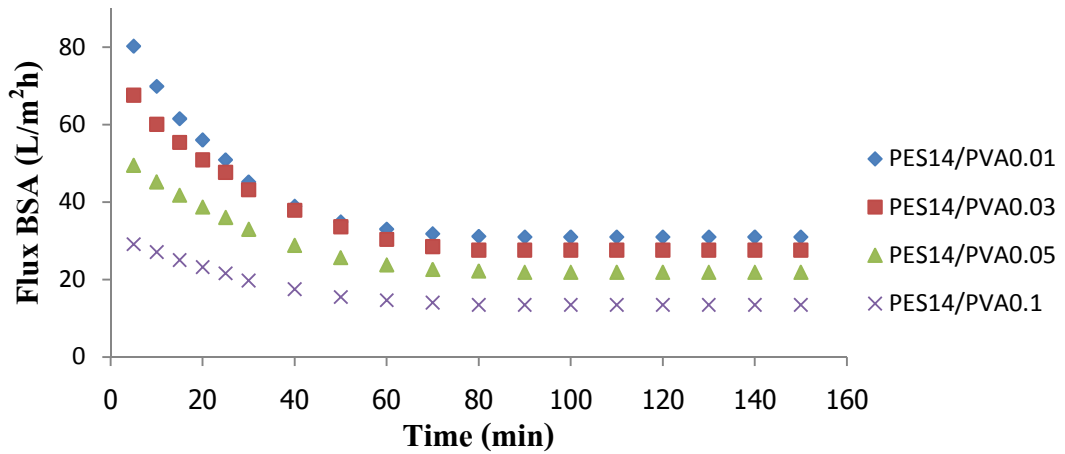
เมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีนของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสมให้ค่าฟลักซ์สารละลายสูงที่สุด เนื่องจากไม่มีความต้านทานที่เกิดจากชั้นฟิล์มของ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่น จึงส่งผลให้สารละลายโปรตีนแพร่ผ่านได้มาก ค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีนจึงมีค่าสูงที่สุด ส่วนเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่นให้ค่าฟลักซ์สารละลายต่ำสุด เนื่องจากในเยื่อแผ่นมีคุณสมบัติ

ชอบน้ำต่ำ และผลของความหนาของชั้นฟิล์ม PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่น ส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหลที่สูง

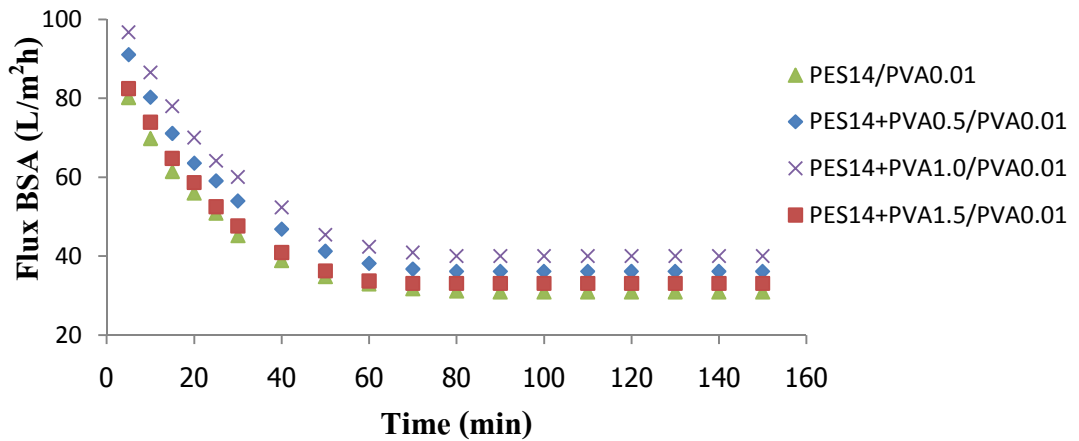
เมื่อทำการเปรียบเทียบด้วยค่า Normalized flux ซึ่งเป็นอัตราส่วนของฟลักซ์สารละลายโปรตีนที่เวลาใดๆ เทียบกับฟลักซ์สารละลายโปรตีนเริ่มต้น จากรูปที่ 4.23 - 4.26 พบว่า เยื่อแผ่นที่ไม่ได้เพิ่มความชอบน้ำ (PES14) จะมีค่า Normalized flux ต่ำสุด เนื่องจากเกิดการอุดตันและสะสมของโมเลกุลโปรตีนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นด้วยแรงกระทำ Hydrophobic interaction ทำให้ความต้านทานต่อการไหลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่นด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ ด้วย PVA ค่า Normalized flux มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติความชอบน้ำที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahimpour และคณะ [11] ศึกษาการเตรียมเยื่อแผ่น PES และปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความชอบน้ำ ด้วยการผสม PAI พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PAI เพิ่มขึ้น ค่า Normalized flux ของเยื่อแผ่นมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากฟาวลิงที่เกิดจากการสะสมและอุดตันของโปรตีน BSA ที่ผิวหน้าและภายในรูพรุน มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคุณสมบัติความชอบน้ำที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่า Normalized flux ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำทั้ง 3 วิธี พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt หลักจากนั้นเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) มีค่า Normalized flux สูงสุด เนื่องจากมีค่าความชอบน้ำสูงสุด (Contact angle ต่ำสุด ดังรูปที่ 4.4)



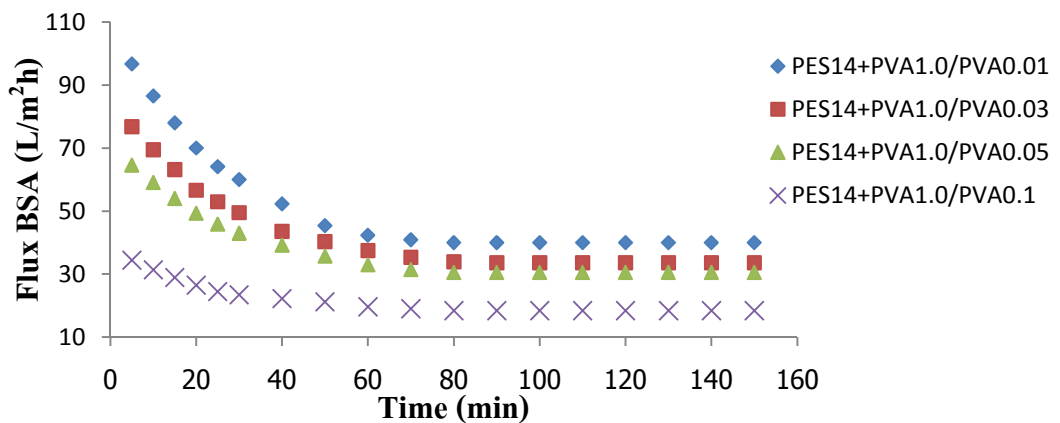
รูปที่ 4.19 ค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีน BSA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt



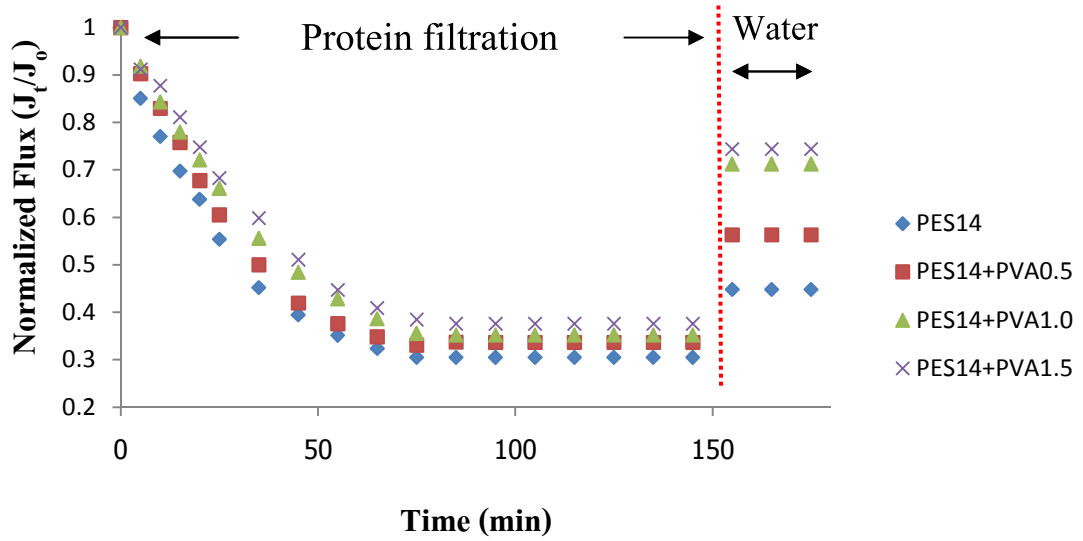
รูปที่ 4.20 ค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีน BSA ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt



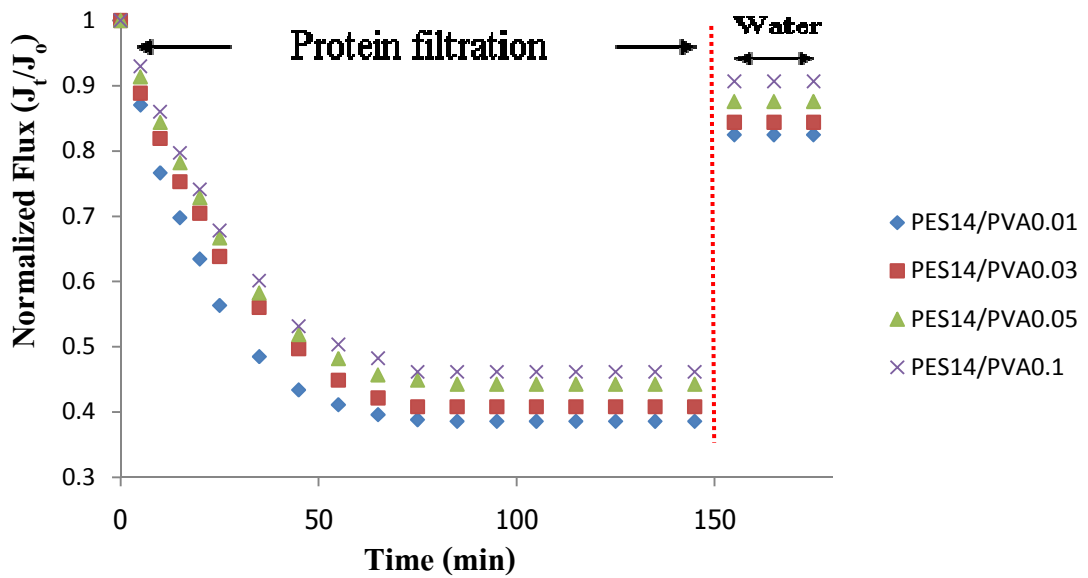
รูปที่ 4.21 ค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีน BSA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt



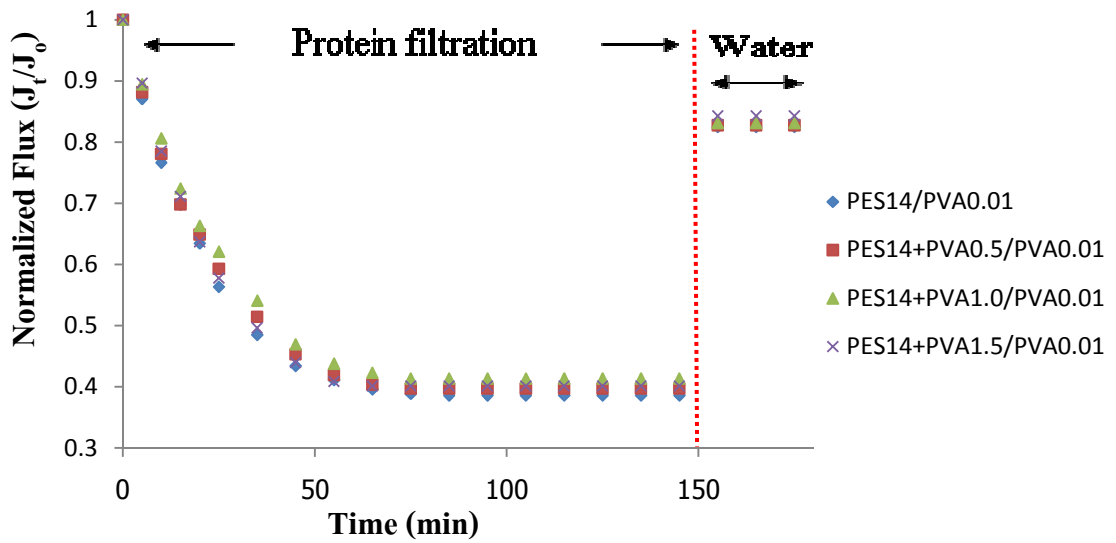
รูปที่ 4.22 ค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีน BSA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt



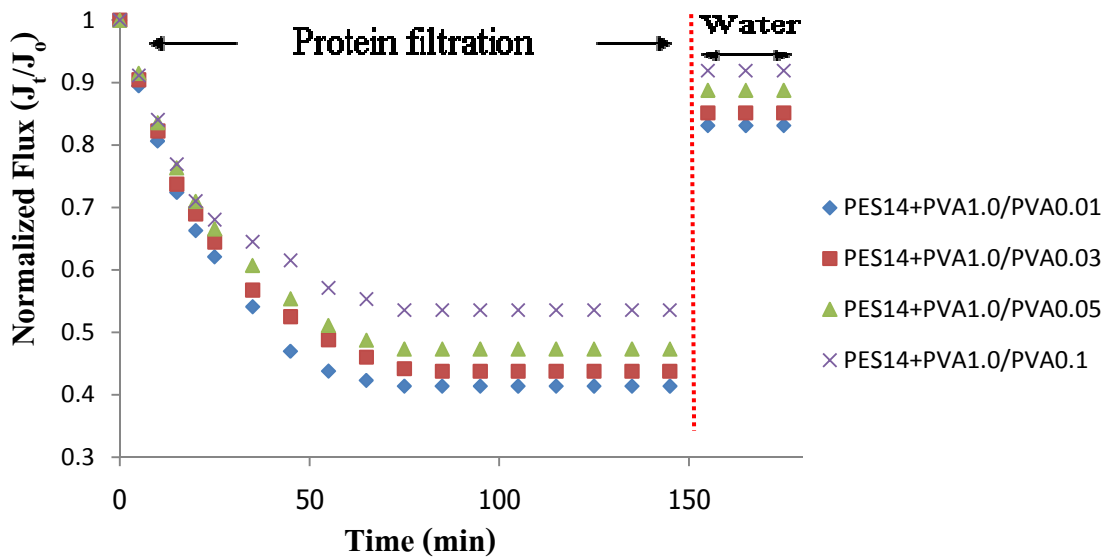
รูปที่ 4.23 ค่า Normalized flux BSA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt



รูปที่ 4.24 ค่า Normalized flux BSA ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt



รูปที่ 4.25 ค่า Normalized flux BSA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt



รูปที่ 4.26 ค่า Normalized flux BSA ของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt

#### 4.8.2 คุณสมบัติการนำกลับมาใช้ใหม่ของเยื่อแผ่น

ค่าการกลับคืนของฟลักซ์ (Flux recovery, FRR) สามารถคำนวณได้จากค่า

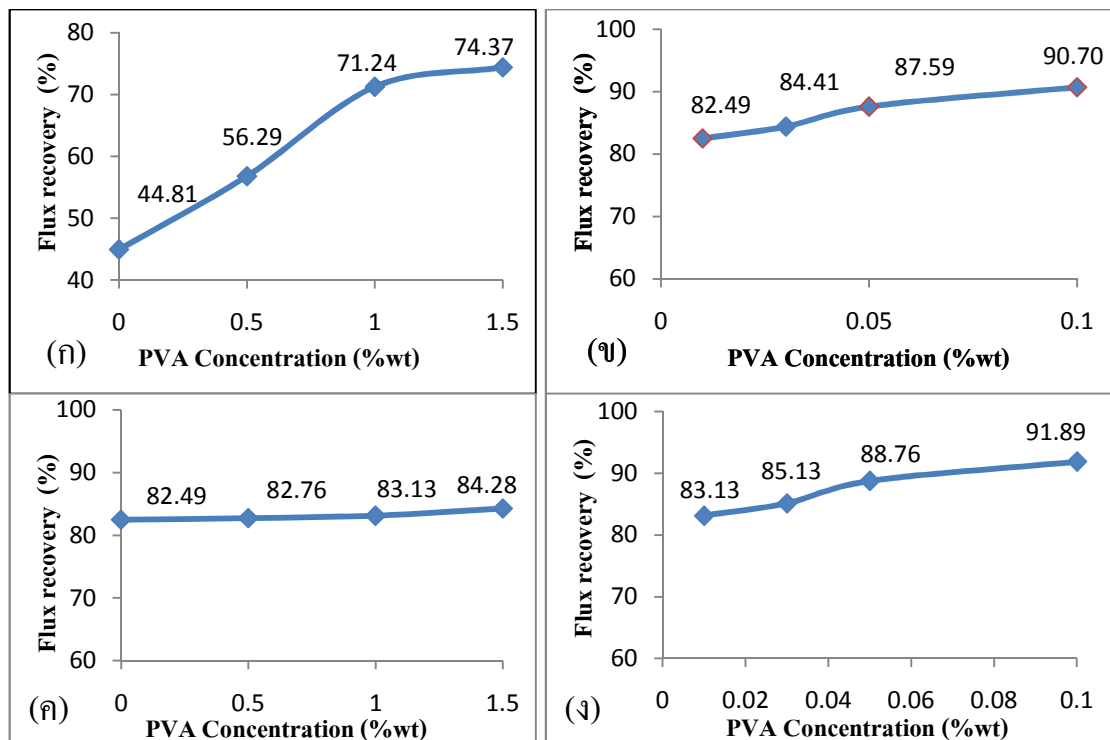
$$FRR (\%) = \frac{J'_w}{J_w} \times 100$$

FRR เป็นค่าที่แสดงถึงการกลับคืนของฟลักซ์น้ำ ถ้า FRR มีค่าสูง หมายความว่า สามารถกำจัดโปรตีนที่คูลงบนเยื่อแผ่นออกได้มากโดย Hydraulic cleaning ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าฟาวลิงที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับได้ (Reversible fouling) ถูกกำจัดออกได้มาก ซึ่งแสดงว่าเยื่อแผ่นนั้นมีคุณสมบัติในการต้านฟาวลิงและมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยที่  $J_w$  คือค่าฟลักซ์น้ำก่อนทดสอบโปรตีน และ  $J'_w$  คือ ค่าฟลักซ์น้ำหลังจากทำความสะอาดเยื่อแผ่นด้วยน้ำสะอาดหลังจากทดสอบโปรตีน

จากผลการทดสอบเพื่อหาค่า FRR พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม, วิธีเคลือบ, และวิธีผสม/เคลือบ ที่ปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนการเคลือบให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.27 (ก), (ข) และ (ง) กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น ค่า FRR จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PVA เป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ทั้งในขั้นตอนผสมและขั้นตอนเคลือบผิวเยื่อแผ่นจะทำให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้น (Contact angle ลดลง, ดังรูปที่ 4.6) จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นดังกล่าวสามารถลดการเกิดฟาวลิงอันเนื่องจากการสะสมและอุดตันของสารละลายโปรตีนที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [11] ได้ทำการเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน PES ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วย PVA และทำการเชื่อมขวางด้วยสารละลาย Borax พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA สูงขึ้น ค่า Contact angle มีค่าลดลง มีผลทำให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำมากขึ้น ค่า FRR สูงขึ้น

แต่เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากรูปที่ 4.27 (ค) พบว่าค่า FRR มีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $61.2^\circ - 61.7^\circ$  ดังรูปที่ 4.6 (ค) เนื่องจากการวัดค่า Contact angle จะวัดมุมตกกระทบของน้ำกับผิวของเยื่อแผ่นโดยตรง ซึ่งเยื่อแผ่นดังกล่าวทำการเคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้นเดียวกันคือ 0.01 %wt จึงมีปริมาณ PVA ที่อยู่บนผิวของเยื่อแผ่นใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเยื่อแผ่นดังกล่าวจึงมีค่า Contact angle ใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า FRR ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ, และวิธีผสม/เคลือบ พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่า FRR สูงสุด ที่ 91.89 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเยื่อแผ่นดังกล่าวมีค่าความชอบน้ำสูงที่สุด (ค่า Contact angle ต่ำสุด ดังรูปที่ 4.6) และมีความคงทนสูงสุด รองลงมาคือเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบผิว ให้ค่า FRR 90.70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเยื่อแผ่นที่ให้ค่า FRR ต่ำสุด คือเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม โดยให้ค่า FRR 74.37 เปอร์เซ็นต์

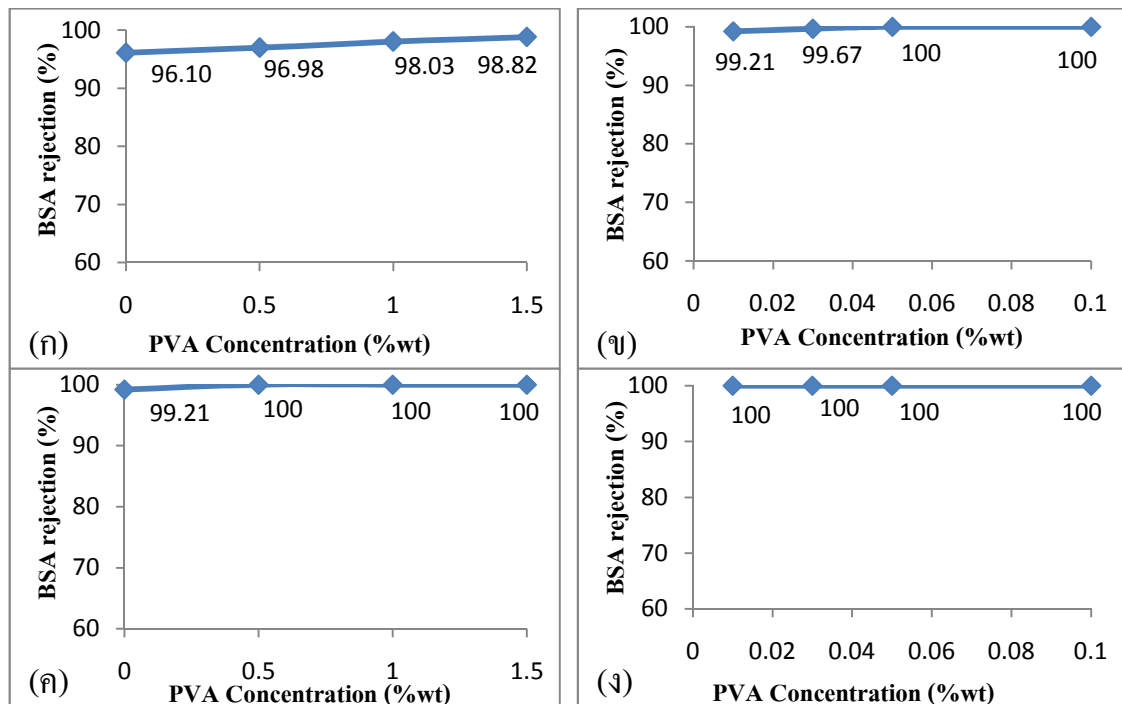


รูปที่ 4.27 ค่า Flux recovery (ก) PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ, (ข) PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ, (ค) PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt และ (ง) PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.8.3 ค่าการกักกัน (Rejection)

ค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักสารของเยื่อแผ่น มีค่าในช่วง 0 – 100 % ซึ่งค่าการกักกันหาได้จากการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโปรตีน BSA ในเฟอมีเอทและในรีเทนเทท ดังสมการที่ 2.9 และการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายโปรตีน BSA ได้จากการวัดความเข้มข้นโปรตีนด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ใช้ความยาวคลื่น 280 nm

จากผลการทดลองเพื่อหาค่าการกักกันของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม, วิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ จากรูปที่ 4.28 (ก) พบว่า เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม มีค่าการกักกันในช่วง 96.10 – 98.82 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเยื่อแผ่นเหล่านี้มีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าขนาดของน้ำหนักโมเลกุลโปรตีนมาก จึงมีค่าการกักกันใกล้เคียงกัน แต่การกักกันไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเยื่อแผ่นที่ได้จากการคาส์นี้คาดว่ามีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ซึ่งเกิดจากการระเหยตัวทำละลายในขณะที่คาส์แต่ละจุดไม่เท่ากัน จึงทำให้โมเลกุลโปรตีนบางส่วนหลุดรอดมาด้านเพอมีเอทได้ ค่าการกักกันจึงไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ Wang และคณะ [22] ที่ทำการผลิตเยื่อแผ่น PES ให้มีคุณสมบัติชอบน้ำด้วยการผสม Pluronic ที่มีปริมาณและอัตราส่วน PES:Pluronic แตกต่างกัน พบว่าเยื่อแผ่นแต่ละแผ่นมีค่าการกักกันเกิน 97 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.28 ค่าการกักกัน (ก) PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ, (ข) PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ, (ค) PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt และ (ง) PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของ เยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.8.4 ค่าความต้านทาน (Resistance)

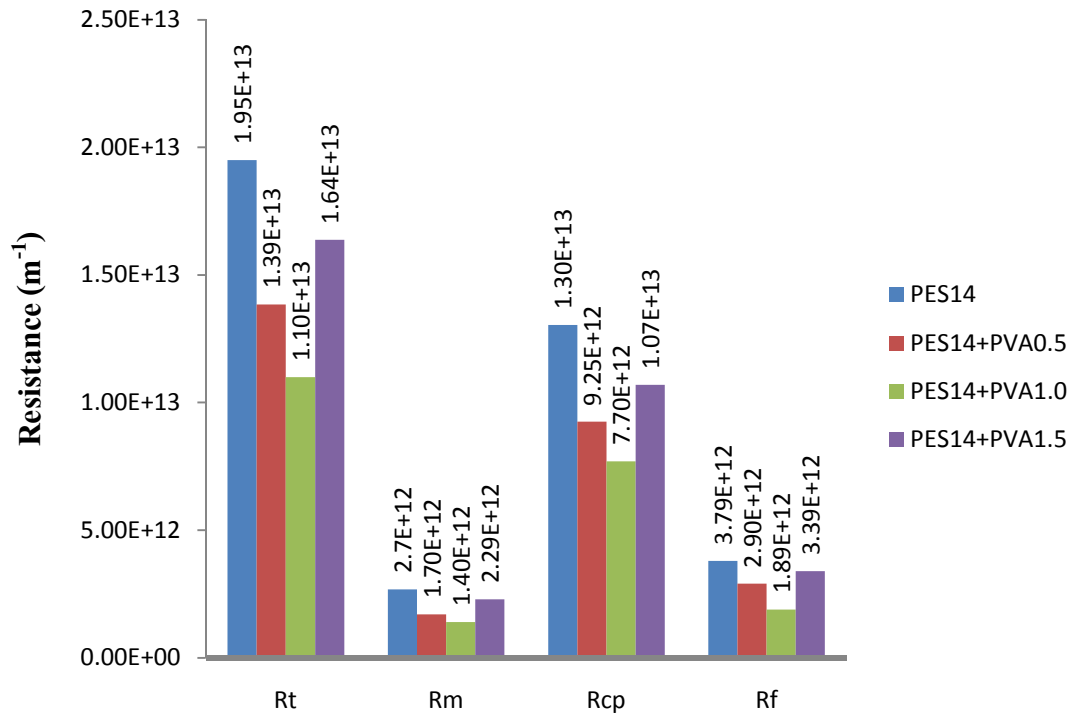
คุณสมบัติในการต้านฟาวลิงของเยื่อแผ่น หาได้จากการคำนวณหาความต้านทานรวมต่อการไหลของเยื่อแผ่น ( $R$ ) อธิบายโดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model) ดังสมการที่ 2.4 อันประกอบด้วยความต้านทานเยื่อแผ่น ( $R_m$ ) ความต้านทานคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ( $R_{cp}$ ) และความต้านทานฟาวลิง ( $R_f$ )

สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนผสม จากรูปที่ 4.29 และ 4.31 พบว่า ความต้านทาน  $R_p$ ,  $R_m$ ,  $R_{cp}$  และ  $R_f$  มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้นจาก 0-1.0 %wt เนื่องจากการผสม PVA กับ PES จะช่วยให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติชอบน้ำสูงขึ้น (ค่า Contact angle ลดลง ดังรูปที่ 4.6) ส่งผลให้ Hydrophobic interaction ระหว่างเยื่อแผ่น PES (เยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำ) กับสารละลายโปรตีนลดลง นั่นก็คือ เป็นการลดการเกาะติดหรือการดูดซับของโปรตีนบนเยื่อแผ่นนั่นเอง ซึ่งค่าความต้านทานที่ลดลงนี้สอดคล้องกับการงานวิจัยของ Rahimpour และ Madaeni [23] ที่ศึกษาผลของการเติม CAP ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำ ในการเตรียมเยื่อแผ่น PES ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการต้านทานการเกิดฟาวลิง พบว่า การผสม CAP กับ PES ส่งผลให้ค่า  $R_m$ ,  $R_f$  และ  $R_{cp}$  ของเยื่อแผ่นลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA เป็น 1.5 %wt พบว่า ค่าความต้านทาน  $R_p$ ,  $R_m$ ,  $R_{cp}$  และ  $R_f$  มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของโพลีเมอร์รวมในสารละลายโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเล็กลง ค่า MWCO มีค่าลดลง (ดังตารางที่ 4.2) มีผลทำให้เยื่อแผ่นมีความต้านทานในการไหลสูงขึ้น (ค่า  $R_m$  เพิ่มขึ้น) ส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นมาก จึงเกิด CP สูง เมื่อทำการล้างเยื่อแผ่น จึงไม่สามารถล้างชั้นของ CP ออกได้หมด ซึ่งการเกิด CP จะนำไปสู่การเกิดฟาวลิงในที่สุด มีผลทำให้ ค่า  $R_p$ ,  $R_{cp}$  และ  $R_f$  สูงขึ้นด้วย

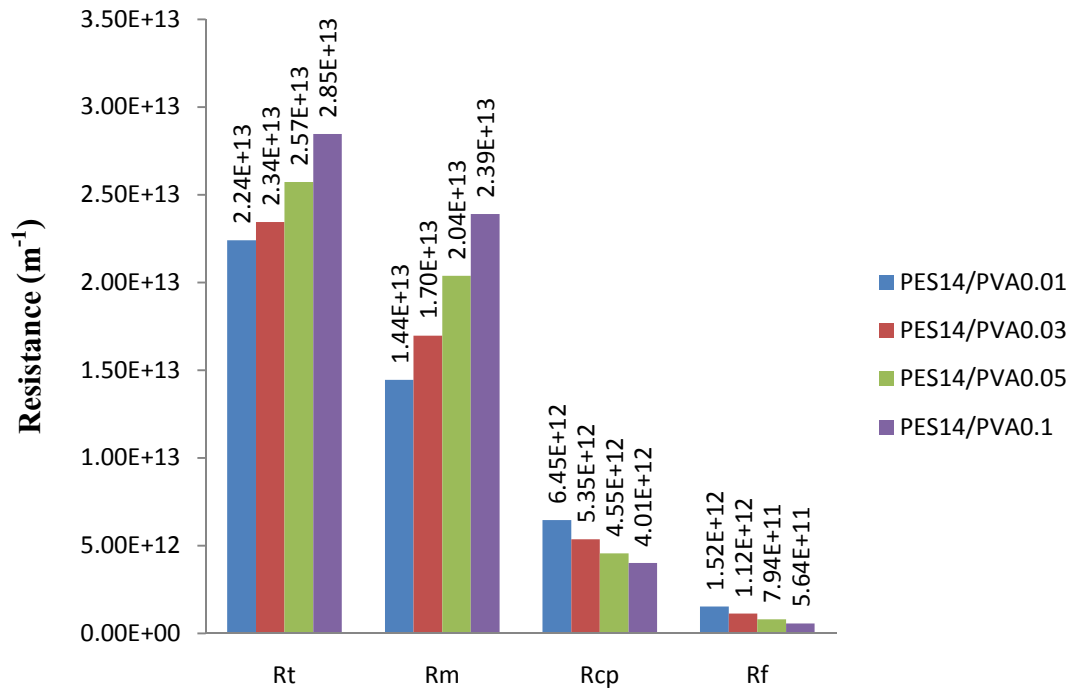
สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบ และวิธีผสม/เคลือบ โดยปรับความเข้มข้นของ PVA ในขั้นตอนเคลือบผิว จากรูป 4.30 และ 4.32 พบว่า ค่า  $R_p$ ,  $R_m$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความหนาของชั้นฟิล์ม PVA ที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นมากขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) ทำให้เยื่อแผ่นมีความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PVA เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เยื่อแผ่นมีค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  ลดลง เนื่องจากเยื่อแผ่นมีค่าความชอบน้ำมากขึ้น (ค่า Contact angle ลดลง ดังรูปที่ 4.6) จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของฟลักซ์น้ำได้สูงขึ้นด้วย ซึ่งแสดงว่า สามารถกำจัดฟาวลิงที่ผันกลับได้มากกว่า ค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  จึงมีค่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีการต่างๆ พบว่า เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสมจะมีค่า  $R_m$  ต่ำที่สุด เนื่องจากการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่นโดยวิธีผสมจะไม่มีผลของความหนาของชั้นฟิล์ม PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่น จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นดังกล่าวมีความต้านทานการถ่ายเทมวลต่ำที่สุด ค่า  $R_m$  จึงต่ำกว่าการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่นด้วยวิธีอื่น ส่วนเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีเคลือบผิว (PES14/PVA0.1) จะให้ค่า  $R_m$  สูงที่สุด เนื่องจากความหนาของชั้นเคลือบผิวส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความต้านทานการถ่ายเทมวลที่เพิ่มขึ้น

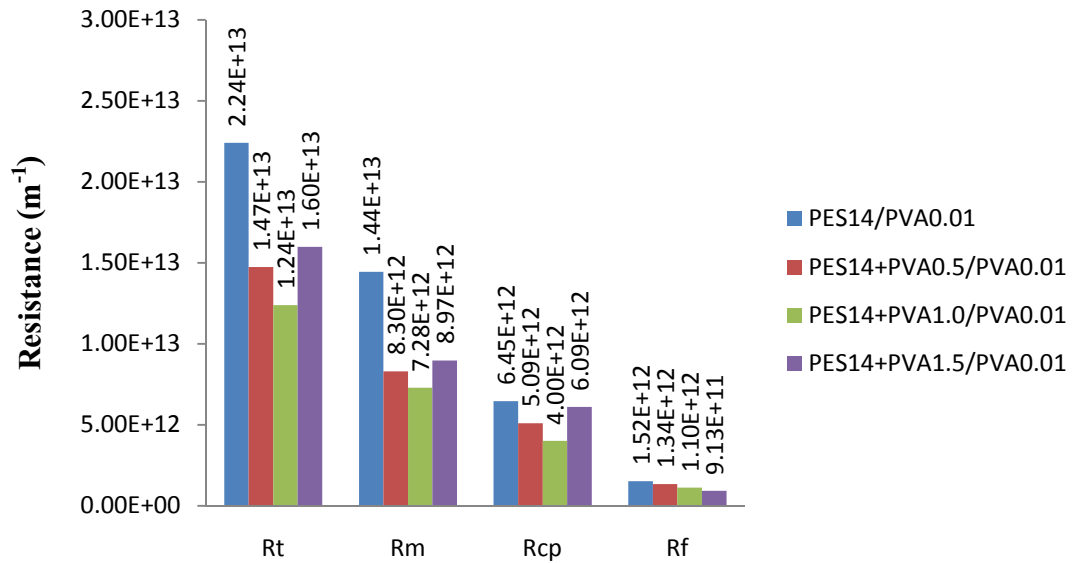
เมื่อเปรียบเทียบค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  พบว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ ให้ค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  ต่ำที่สุด เนื่องจากเยื่อแผ่นที่เพิ่มความเข้มข้นโดยวิธีผสม/เคลือบ มีคุณสมบัติชอบน้ำที่สูงที่สุด (Contact angle ต่ำสุด, จากรูปที่ 4.6) ซึ่งการเคลือบผิวเยื่อแผ่นนั้นทำให้สารละลายโปรตีนสัมผัสกับชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นที่มีความชอบน้ำสูงโดยตรง ซึ่งคุณสมบัติความชอบน้ำที่ได้จากการเคลือบผิวเยื่อแผ่นนี้จะไปช่วยลดแรง Hydrophobic interaction ระหว่างโมเลกุลของโปรตีนกับผิวหน้าของเยื่อแผ่นโดยตรง ส่งผลให้ความเข้มข้นของโมเลกุลโปรตีนบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นลดลง จึงทำให้เยื่อแผ่นมีค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  ลดลงด้วย ซึ่งเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้ค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  ต่ำที่สุด และต่ำกว่าวิธีเคลือบผิว เนื่องจากเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบผิวมีการหลุดออกของ PVA บางส่วนในชั้นเคลือบ ในระหว่างการกรองโปรตีน จึงทำให้เยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีเคลือบผิวมีค่า  $R_{cp}$  และ  $R_f$  สูงกว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ



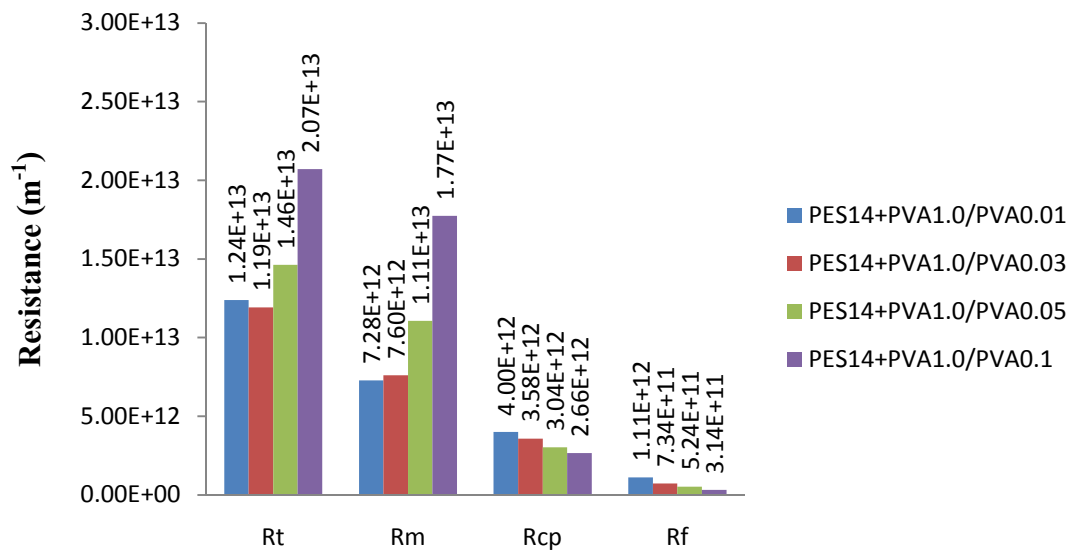
รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt



รูปที่ 4.30 ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03 0.05 และ 0.1 %wt



รูปที่ 4.31 ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01 %wt



รูปที่ 4.32 ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น PES ผสม PVA 1.0 %wt แล้วเคลือบผิวของเยื่อแผ่นด้วย PVA ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.1 %wt

เมื่อนำค่า Contact angle, เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA หลังจากกรองน้ำ 20 ชั่วโมง (PVA Loss<sub>UF</sub>, %wt), เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA หลังจากการแช่เยื่อแผ่นในน้ำเป็นเวลา 7 วัน (PVA Loss, %wt) และค่า % Flux recovery ของเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำด้วยวิธีการต่างๆ มาเปรียบเทียบกับกัน จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่า Contact angle กับค่า % Flux recovery ของเยื่อแผ่นมีค่าสอดคล้องกัน กล่าวคือเยื่อแผ่นจะมีค่า % Flux recovery เพิ่มขึ้น เมื่อเยื่อแผ่นมีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น (ค่า Contact

angle ลดลง) ส่วนเปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA ทั้ง 2 วิธี จะมีค่าสอดคล้องกัน สำหรับเยื่อแผ่นที่เพิ่มความขบน้ำด้วยวิธีผสม และวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่น กล่าวคือเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น การหลุดออกของ PVA จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA จะมีค่าลดลง สำหรับการเพิ่มความขบน้ำให้กับเยื่อแผ่นด้วยวิธีผสม/เคลือบ เนื่องจากผลของ Hydrophilic interaction ระหว่าง PVA ที่อยู่ในเยื่อแผ่น และ PVA ที่นำมาเคลือบผิวเยื่อแผ่น รวมทั้งการเชื่อมขวาง PVA ในเยื่อแผ่น กับ PVA ที่เคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย GA ตามที่กล่าวข้างต้น

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า Contact angle, เปอร์เซ็นต์การหลุดออกของ PVA หลังกรองน้ำเป็นเวลา 20 ชั่วโมง และแซ่เยื่อแผ่นในน้ำ เป็นเวลา 7 วัน, % Flux recovery ของเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ

ชนิดเยื่อแผ่น	Contact angle (°)	การหลุดออกของ PVA (PVA Loss <sub>UF</sub> %wt)	การหลุดออกของ PVA (PVA Loss %wt)	Flux recovery (%)
วิธีผสม PVA				
PES14	71.1	0	0	44.81
PES14+PVA0.5	66.3	7.88	0.275	56.29
PES14+PVA1.0	63.6	9.93	0.335	71.24
PES14+PVA1.5	61.9	-	0.490	74.37
วิธีเคลือบ PVA				
PES14/PVA0.01	61.7	12.13	0.637	82.49
PES14/PVA0.03	59.6	-	0.732	84.41
PES14/PVA0.05	58.0	-	0.787	87.59
PES14/PVA0.1	56.5	17.23	1.145	90.7
วิธี(ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ขึ้นตอนผสม				
PES14/PVA0.01	61.7	12.13	0.637	82.49
PES14+PVA0.5/PVA0.01	61.2	7.06	0.168	82.76
PES14+PVA1.0/PVA0.01	61.4	3.49	0.060	83.13
PES14+PVA1.5/PVA0.01	61.6	11.05	0.232	84.28
วิธี(ผสม/เคลือบ) โดยปรับความเข้มข้น PVA ขึ้นตอนเคลือบผิว				
PES14+PVA1.0/PVA0.01	61.4	3.49	0.060	83.13
PES14+PVA1.0/PVA0.03	59.3	-	0.051	85.13
PES14+PVA1.0/PVA0.05	57.3	-	0.045	88.76
PES14+PVA1.0/PVA0.1	56.0	3.25	0.025	91.89

#### 4.9 เปรียบเทียบงานวิจัย

จากการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้มีการปรับปรุงเยื่อแผ่นให้มีความชอบน้ำด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อลดการเกิดฟาวลิง โดยทำการทดสอบฟาวลิงของเยื่อแผ่นด้วยการกรองสารละลายโปรตีน BSA (ดังตารางที่ 4.6)

เมื่อนำเยื่อแผ่นที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำทุกวิธี ได้แก่ วิธีผสม, วิธีเคลือบผิว และวิธีผสม/เคลือบ จากงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกัน พบว่า เยื่อแผ่นที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำด้วยวิธีผสม/เคลือบ สามารถเพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำ, เพิ่มความสามารถในการต้านฟาวลิง, เพิ่มคุณสมบัติเชิงกล และเพิ่มความคงทนในการใช้งานของเยื่อแผ่น ซึ่งเยื่อแผ่นที่เพิ่มความชอบน้ำโดยวิธีผสม/เคลือบ โดยใช้ PES 14 %wt ผสมกับ PVA 1.0 %wt หลังจากนั้นเคลือบด้วย PVA 0.1 %wt (PES14+PVA1.0/PVA0.1) ให้คุณสมบัติในด้านต่างๆ สูงที่สุด โดยวัดได้จากค่า Contact angle ที่ต่ำลงเหลือเพียง 56°, ค่า % FRR ที่เพิ่มขึ้นเป็น 91.89 เปอร์เซ็นต์, ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นโดยวัดเป็นค่า Tensile strength 4.341 Mpa และ % Elongation at break 16.681 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคงทนที่เพิ่มขึ้นโดยวัดเป็นค่า % Flux reduction ที่ลดลงเหลือ 5.12 เปอร์เซ็นต์ และ PVA Loss<sub>UF</sub> ที่ลดลงเหลือ 3.25 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า งานวิจัยนี้มี % FRR 91.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของทรารูธ ราชจันทร์ [7] ที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่น PES ด้วยวิธีผสม PVA ซึ่งมีค่า % FRR เพียง 74.87 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่างานวิจัยของ Ma และคณะ [6] เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่น PES โดยวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย PVA โดยใช้ Borax เป็นสารเชื่อมขวาง ซึ่งมีค่า % FRR เพียง 84.17 สูงกว่างานวิจัยของสุรัตน์ ธารไชย [22] ที่เพิ่มความชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่น PVDF โดยวิธีเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย PVA ซึ่งมีค่า % FRR เพียง 74.99 เปอร์เซ็นต์ และยังสูงกว่างานวิจัยของ Rahimpour และ Madaeni [23] ซึ่งมีค่า % FRR 86 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำคุณสมบัติเชิงกลมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า งานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเชิงกลโดยวัดค่า Tensile strength และ % Elongation at break ได้ 4.341 Mpa และ 16.681 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของทรารูธ ราชจันทร์ [7] ที่มีค่า Tensile strength และ % Elongation at break 4.341 Mpa และ 11.348 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่างานวิจัยของปิยศักดิ์ ทองมาก [24] ที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่น PES โดยเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย CS และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยใช้ GA เป็นสารเชื่อมขวาง ซึ่งมีค่า Tensile strength และ % Elongation at break 4.28 Mpa และ 10.79 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบความคงทนของเยื่อแผ่นของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า งานวิจัยนี้มีความคงทนโดยวัดค่า % Flux reduction ได้ 5.12 เปอร์เซ็นต์ และ PVA Loss<sub>UF</sub> ได้ 3.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของทรารูธ ราชจันทร์ [7] ที่มีค่า % Flux reduction 13.22 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่างานวิจัยของสุรัตน์ ธารไชย [20] ที่มีค่า % Flux reduction 30.1 เปอร์เซ็นต์

และ % PVA Loss<sub>UF</sub> 4.37 เปอร์เซ็นต์ แต่มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของปิยศักดิ์ ทองมาก [24] เนื่องจากงานวิจัยของปิยศักดิ์ ทองมาก ใช้ปริมาณสารเชื่อมขวาง/ปริมาตรสารเคลือบที่ GA1.0/CS0.3 %wt ซึ่งทำให้สารเชื่อมขวางมีปริมาณมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับสารเคลือบได้ทุกส่วน เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรงขึ้น จึงส่งผลให้ % CS/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Loss มีค่าเพียง 2.21 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อที่ดูค่าของ % FRR ของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยของปิยศักดิ์ ทองมาก [24] พบว่าค่า % FRR ของงานวิจัยนี้ (91.89 เปอร์เซ็นต์) ยังคงสูงกว่างานวิจัยของปิยศักดิ์ ทองมาก [24] ซึ่งมีค่า % FRR 84.20 เปอร์เซ็นต์ เพราะสารเชื่อมขวางจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ขบมน้ำของสารเคลือบเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความขบมน้ำลดลง

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษากับงานวิจัยอื่นๆ

หัวข้อ	โพลีเมอร์	วิธีการ	FRR (%)	คุณสมบัติเชิงกล		ทดสอบความคงทน (กรองน้ำ 20 ชั่วโมง)	
				Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	% Flux reduction	PVA Loss <sub>UF</sub> (%wt)
งานวิจัยนี้	PES 14 %wt	ผสม PVA (0 - 1.5) %wt	PES14+PVA1.5 (%wt) 74.51	PES14+PVA1.5 (%wt) 3.639	PES14+PVA1.5 (%wt) 12.575	PES14+PVA0.5 (%wt) 10.17	PES14+PVA0.5 (%wt) 7.88
งานวิจัยนี้	PES 14 %wt	เคลือบ PVA (0.01 - 0.1) %wt	PES14/PVA0.1 (%wt) 90.70	PES14/PVA0.1 (%wt) 3.688	PES14/PVA0.1 (%wt) 14.676	PES14/PVA0.01 (%wt) 23.64	PES14/PVA0.01 (%wt) 7.06
งานวิจัยนี้	PES 14 %wt	ผสม PVA (0 - 1.5) %wt แล้วเคลือบด้วย PVA (0.01 - 0.1) %wt	PES14+PVA1.0 /PVA0.1 (%wt) 91.89	PES14+PVA1.0 /PVA0.1 (%wt) 4.341	PES14+PVA1.0 /PVA0.1 (%wt) 16.681	PES14+PVA1.0 /PVA0.1 (%wt) 5.12	PES14+PVA1.0 /PVA0.1 (%wt) 3.25
ทราวุธ ราสีจันทร์ [7]	PES 16 %wt	ผสม PVA (0 - 1.5) %wt	PES14+PVA1.5 (%wt) 74.87	PES14+PVA1.5 (%wt) 3.190	PES14+PVA1.5 (%wt) 11.348	PES16+PVA1.0 (%wt) 13.22	-
Ma และคณะ [6]	PES 18 %wt	เคลือบ PVA (0.1 - 2.0) %wt	PES18/PVA1.0 (%wt) 84.17	-	-	-	-

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) เปรียบเทียบงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยอื่นๆ

หัวข้อ	โพลีเมอร์	วิธีการ	FRR (%)	คุณสมบัติเชิงกล		ทดสอบความคงทน (กรองน้ำ 20 ชั่วโมง)	
				Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	% Flux reduction	PVA Loss <sub>UF</sub> (%wt)
สุรัตน์ ธารไชย [20]	PVDF	เคลือบ 2 ชั้นด้วย CS/PVA	PVDF/CS0.5 /PVA2.0 (%wt) 74.99	-	-	PVDF/CS0.5 /PVA2.0 (%wt) 30.1	PVDF/CS0.5 /PVA2.0 (%wt) 4.37
Rahimpour และ Madaeni [23]	PES 16 %wt	ผสม CAP (0 – 40 %wt of PES)	PES/CAP (%wt) 80:20 = 86.0	-	-	-	-
ปิยศักดิ์ ทองมาก [24]	PES 15 %wt	เคลือบด้วย Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CS โดยใช้ GA เป็นสารเชื่อมขวาง	PES15/CS0.3/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.05/GA1 (%wt) 84.20	PES15/CS0.3/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.05/GA1 (%wt) 4.28	PES15/CS0.3/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.05/GA1 (%wt) 10.79	-	PES15/CS0.3/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.05/GA1 (%wt) 2.21

