

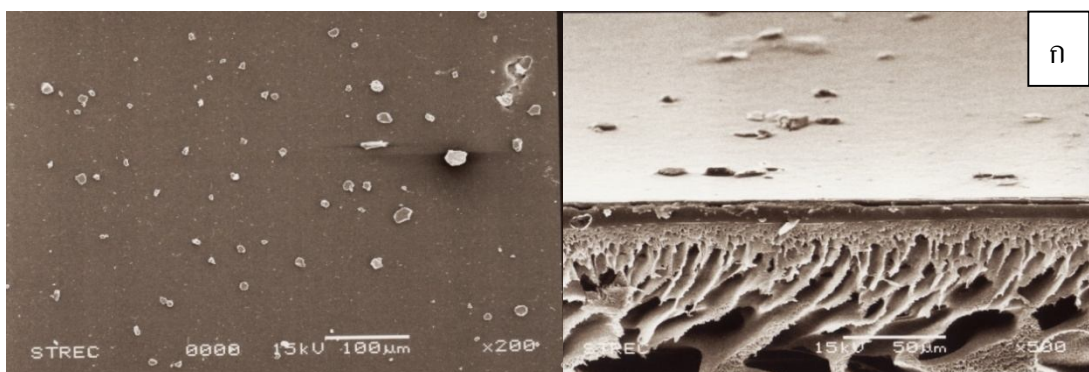
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย CS และการเชื่อมขวางที่มีต่อความคงทนในการใช้งานของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย Al_2O_3 และผลต่อการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น โดยจะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนด้วยกันดังนี้ ส่วนที่ 1 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ CS และ ส่วนที่ 2 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารเชื่อมขวาง โดยทำการศึกษาคูณสมบัติดังนี้ คือ ทดสอบความคงทนของเยื่อแผ่น สมบัติเชิงกล ลักษณะโครงสร้างของเยื่อแผ่น ค่า MWCO ค่า contact angle ค่าฟลักซ์น้ำ ค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนและการเกิดฟาวลิง ตามลำดับ

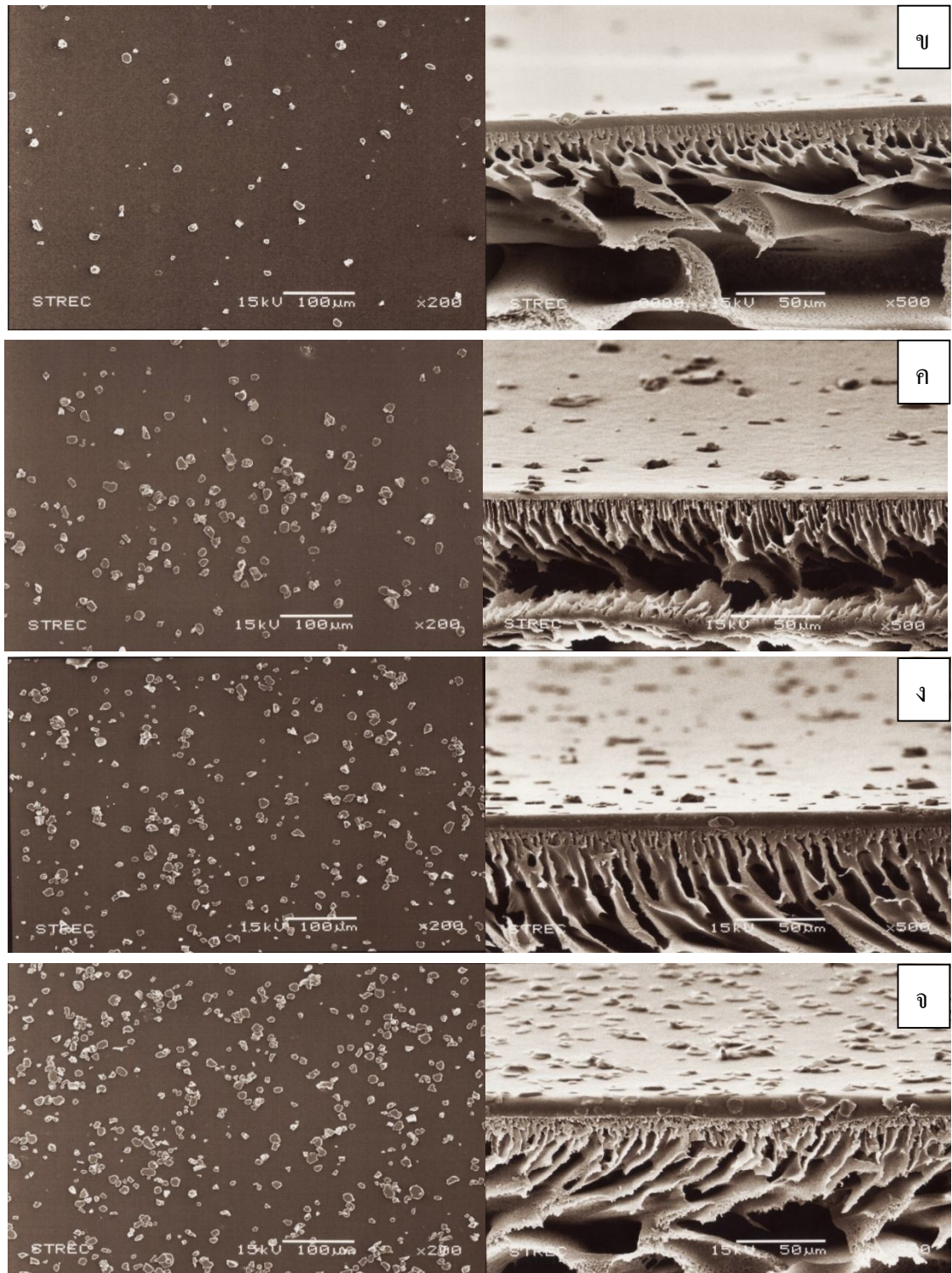
4.1 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไคโตซาน

4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเยื่อแผ่น PES

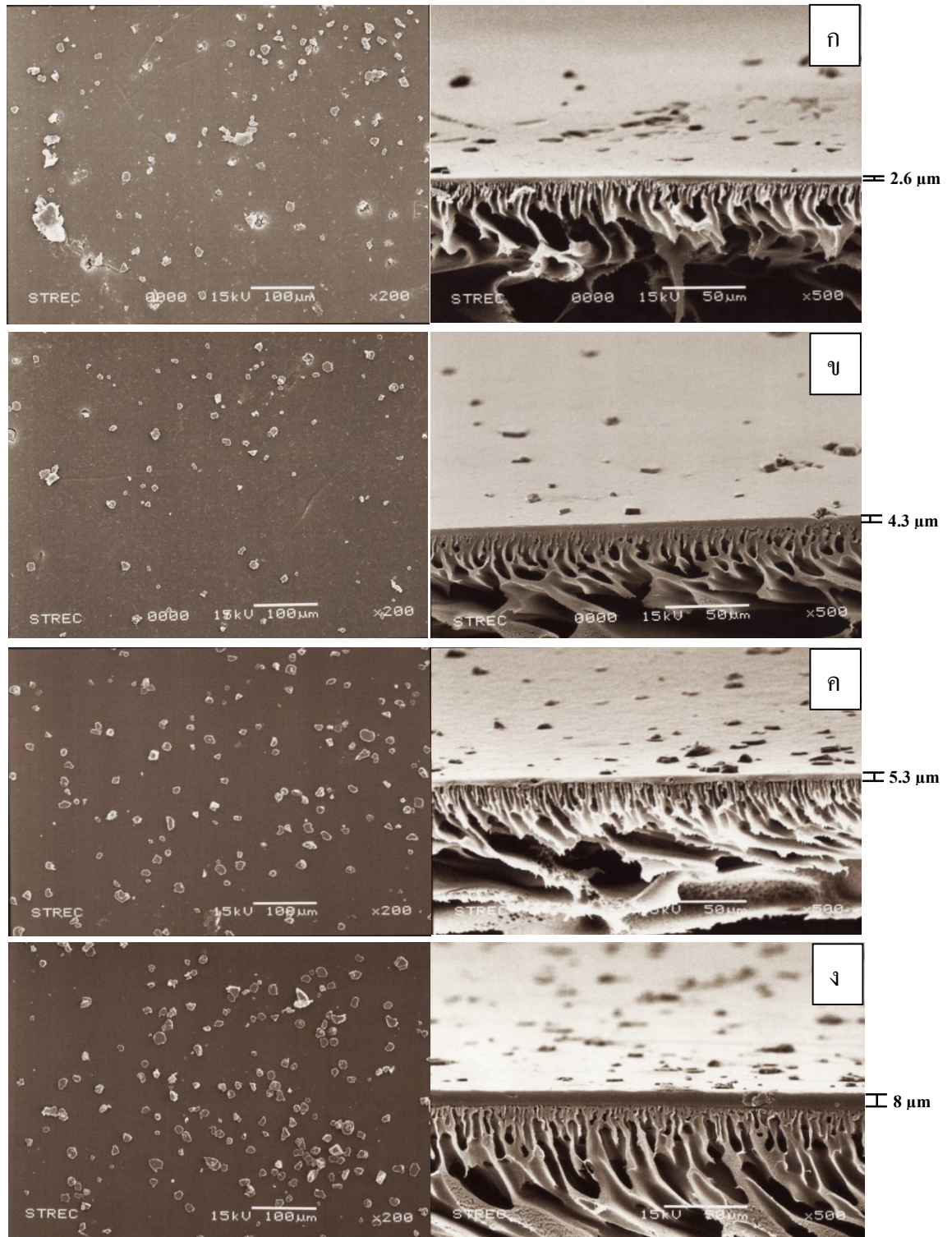
การศึกษาพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางด้วย SEM ก่อนและหลังกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย Al_2O_3 /CS โดยใช้ความเข้มข้นของ CS 0.1- 0.5 % wt/v และปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น CS 0.1 กับ 0.2 %wt/v ชั้นเคลือบซึ่งประกอบไปด้วยทั้ง Al_2O_3 และ CS สามารถหลุดออกจากเยื่อแผ่นได้บางส่วนหลังจากกรองน้ำผ่านเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.2 (ก), (ข) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น CS 0.3- 0.5 % wt/v พบว่าชั้นเคลือบหลุดออกจากเยื่อแผ่นน้อยมากดังรูปที่ 4.2 (ค, ง และ จ) เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้น CS ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความหนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก-จ) โดยที่ CS 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5% wt/v ชั้นเคลือบจะมีความหนาเพิ่มขึ้นดังนี้คือ 2.6, 4.3, 5.3, 8 และ 8.3 μm ตามลำดับ โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้ Al_2O_3 สามารถแทรกตัวอยู่ในชั้นเคลือบได้ดี ดังนั้นการยึดกันระหว่าง CS และ Al_2O_3 บนเยื่อแผ่นจึงดีขึ้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS / Al_2O_3 โดยไม่มีการเติมสารเชื่อมขวางก่อนกรองน้ำผ่าน ที่ความเข้มข้นของ CS (ก) 0.1%, (ข) 0.2 %, (ค) 0.3 %, (ง) 0.4% และ (จ) 0.5% โดยควบคุมปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05%wt
: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า

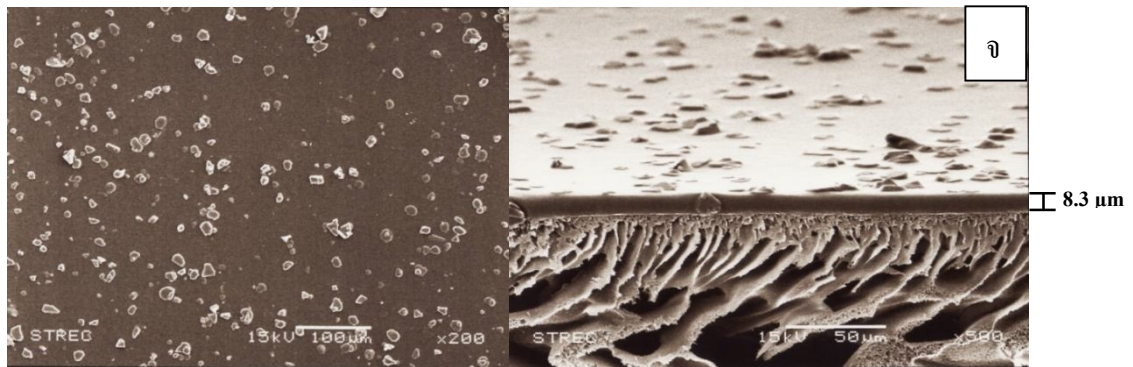


รูปที่ 4.1 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS/ Al_2O_3 โดยไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง ก่อนกรองน้ำผ่าน ที่ความเข้มข้นของ CS (ข) 0.1%, (ค) 0.2 %, (ค) 0.3 %, (ง) 0.4% และ (จ) 0.5% โดยควบคุมปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05%wt : พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS/ Al_2O_3 โดยไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง หลังกรองน้ำผ่านเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของ CS (ก) 0.1%, (ข) 0.2 %, (ค) 0.3 %, (ง) 0.4% และ (จ) 0.5% โดยควบคุมปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05% wt.

: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS/ Al_2O_3 โดยไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง หลังกรองน้ำผ่านเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของ CS (ก) 0.1%, (ข) 0.2 %, (ค) 0.3 %, (ง) 0.4% และ (จ) 0.5% โดยควบคุมปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05% wt.
: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า

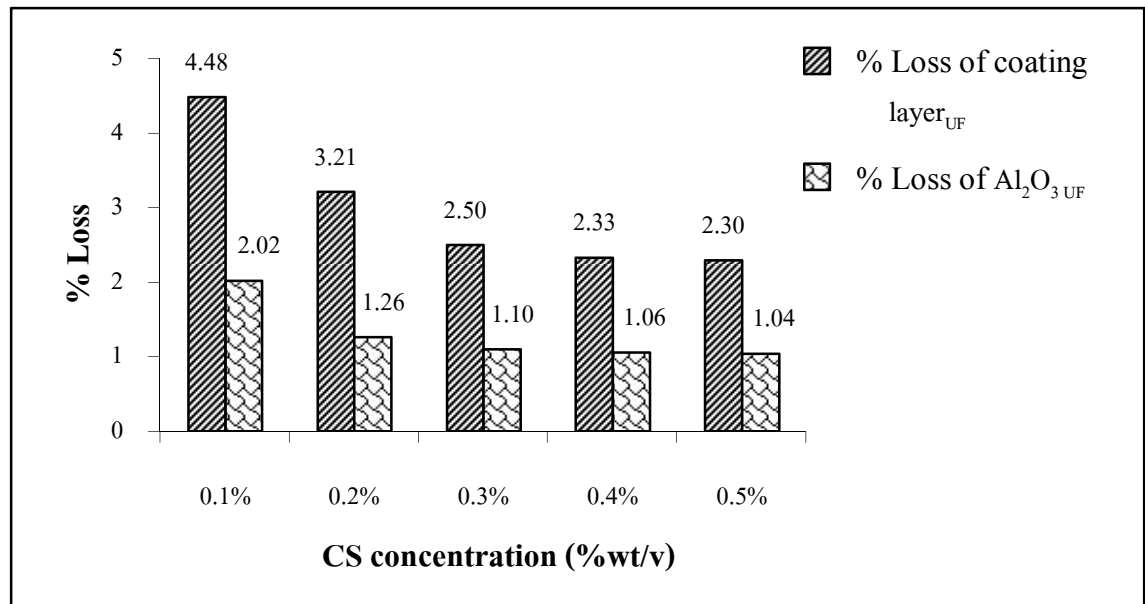
4.1.2 ผลของการหลุดของชั้นเคลือบ (% Loss of coating layer_{UF}) และการหลุดของ Al_2O_3 บนชั้นเคลือบ (% Loss of Al_2O_3 _{UF}) หลังกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น

การทดสอบความคงทนของเยื่อแผ่น โดยการวัดค่า % Loss สามารถแยกออกได้เป็น 2 กรณี คือ 1) การหา % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of Al_2O_3 _{UF} ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การหลุดของชั้นเคลือบและ Al_2O_3 หลังกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น (ระบบ UF ดังรูปที่ 3.1) และ 2) การหา % Loss of coating layer ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การหลุดของชั้นเคลือบหลังการแช่เยื่อแผ่นในน้ำ (ไม่ได้กรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น)

ในตอนนี้จะเป็นการหา % Loss of coating layer_{UF} โดยนำเยื่อแผ่นที่เคลือบด้วย Al_2O_3 /CS ไปทดสอบกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมงแล้วชั่งน้ำหนักเยื่อแผ่นก่อนและหลังการกรองน้ำผ่าน และคำนวณหา % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of Al_2O_3 _{UF} จากผลการทดลองการหา % Loss of coating layer_{UF} พบว่าชั้นเคลือบสามารถหลุดออกจากเยื่อแผ่นได้เมื่อได้รับแรงเฉือนจากน้ำหรือสารละลาย ซึ่งการหลุดของชั้นเคลือบนี้เกิดขึ้นจาก Al_2O_3 ที่ผสมอยู่ในชั้นเคลือบได้รับแรงเฉือนจากน้ำในขณะที่กรองน้ำผ่าน เนื่องจาก Al_2O_3 มีอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคของ Al_2O_3 ไม่สามารถแทรกตัวลงไปบนชั้นเคลือบได้มิดทุกส่วน หรือมีบางส่วนของ Al_2O_3 ที่โผล่ขึ้นมาจากชั้นเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก-จ) ซึ่งแสดงถึงลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น ดังนั้น Al_2O_3 เมื่อโดนแรงเฉือนจากน้ำก็จะส่งผลให้ชั้นเคลือบทั้ง Al_2O_3 และ CS บางส่วนหลุดออกไปได้ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น CS 0.1- 0.5% wt/v พบว่า % Loss of coating layer_{UF} จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่

4.3 เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ CS จะส่งผลให้ชั้นเคลือบบนเยื่อแผ่นมีความหนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก-จ) โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยให้ Al_2O_3 สามารถแทรกตัวอยู่ในชั้นเคลือบได้ดี และลดการหลุดของ Al_2O_3 บนชั้นเคลือบจากแรงเสียดทานของน้ำที่มีต่อ Al_2O_3 บนชั้นเคลือบได้

ในส่วนการหา % Loss of $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{UF}}$ ทำได้โดยหาเปอร์เซ็นต์ของ Al_2O_3 ก่อนและหลังกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น โดยใช้เครื่อง XRF ในการวิเคราะห์ โดยที่เครื่อง XRF นี้จะสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหรือสารประกอบ ซึ่งค่าที่ออกมาจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุหรือสารประกอบที่ต้องการวิเคราะห์นั้นนั้น จากการทดลองพบว่าจะให้ผลในทำนองเดียวกับผลของการหลุดของชั้นเคลือบหลังกรองน้ำ คือ % Loss of $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{UF}}$ จะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น CS โดยผลการทดลองที่ได้ก็จะสอดคล้องกับผลของ SEM (ดังรูปที่ 4.2)



รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การหลุดของหลุดของสารเคลือบ (CS/ Al_2O_3) และการหลุดของ Al_2O_3 บนสารเคลือบโดยไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง หลังจากกรองน้ำผ่านเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของ CS 0.1%, 0.2 %, 0.3 %, 0.4% และ 0.5% โดยควบคุมปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05%wt

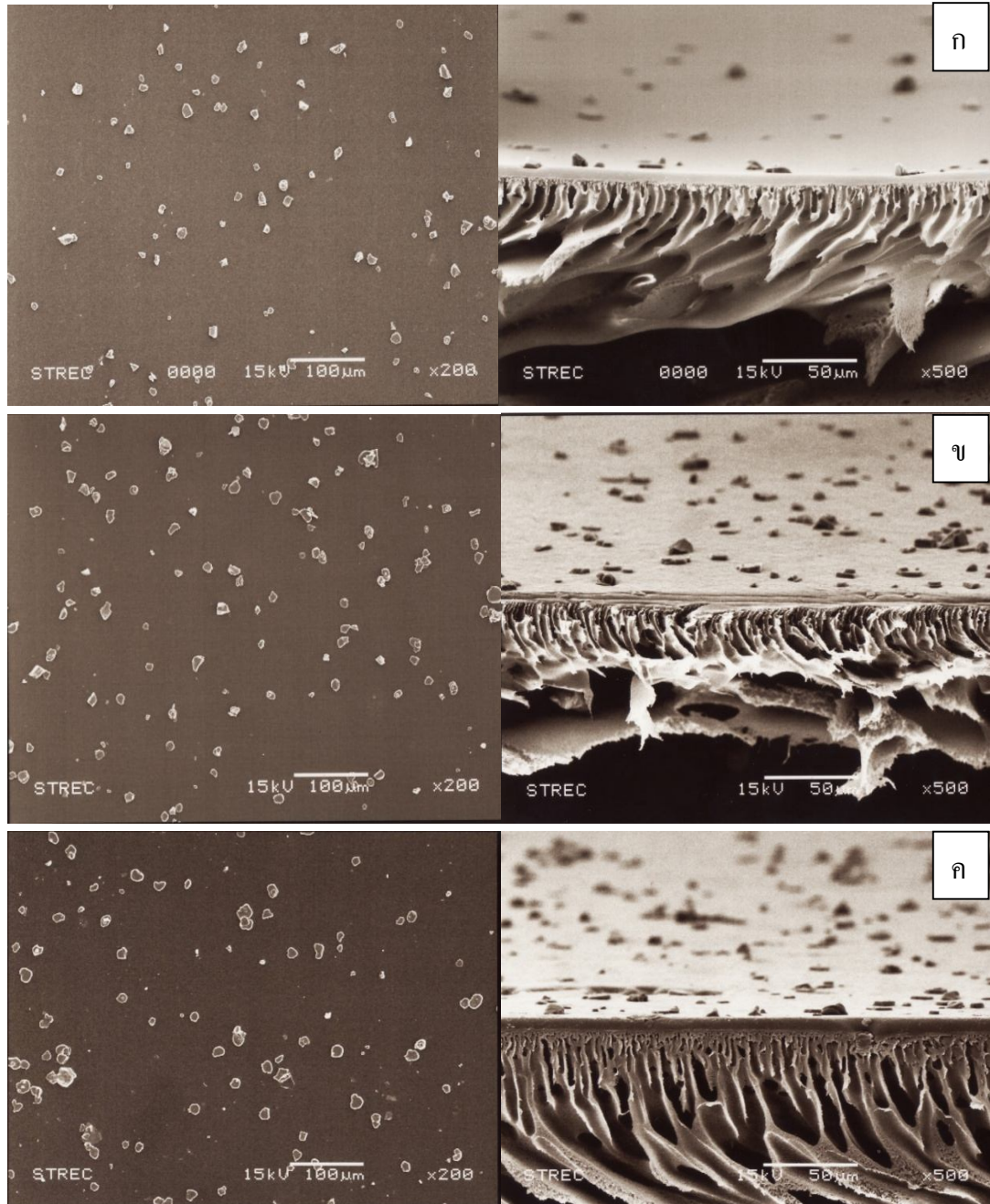
จากการหาความเข้มข้นของ CS ที่มีความหนาเหมาะสมที่ทำให้ Al_2O_3 สามารถแทรกตัวในชั้น CS บนเยื่อแผ่น PES โดยศึกษาพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของชั้นเคลือบด้วย SEM ผลของ % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of Al_2O_3 _{UF} พบว่าความเข้มข้นของ CS ที่เหมาะสมในการยัด Al_2O_3 บนเยื่อแผ่น PES คือ CS 0.3%wt/v เนื่องจากถ้าดูจากพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของชั้นเคลือบด้วย SEM พบว่าที่ความเข้มข้น CS 0.3-0.5%wt/v ชั้นเคลือบหลุดออกจากเยื่อแผ่นน้อยมาก เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้น CS มากขึ้น ชั้นเคลือบมีความหนาขึ้น Al_2O_3 สามารถแทรกตัวอยู่ในชั้นเคลือบได้ดี ดังนั้นการยัดกันระหว่าง CS และ Al_2O_3 บนเยื่อแผ่นจะดีขึ้น และเมื่อพิจารณา % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of Al_2O_3 _{UF} พบว่าที่ CS 0.3-0.5%wt/v % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of Al_2O_3 _{UF} ที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม CS โดยที่ % Loss มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในการเลือกความเข้มข้น CS ที่เหมาะสมสำหรับนำไปเชื่อมขวางกับ GA ได้พิจารณาถึงปัจจัยหลายๆ ด้านด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นด้านปริมาณสารเคมีที่นำมาเคลือบ หรือความหนาของชั้นเคลือบที่จะส่งผลต่อค่าฟลักซ์ เป็นต้น ดังนั้นความเข้มข้น CS 0.3 % wt/v จึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำการเชื่อมขวางด้วย GA ในขั้นตอนต่อไป

4.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารเชื่อมขวาง

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเยื่อแผ่น PES

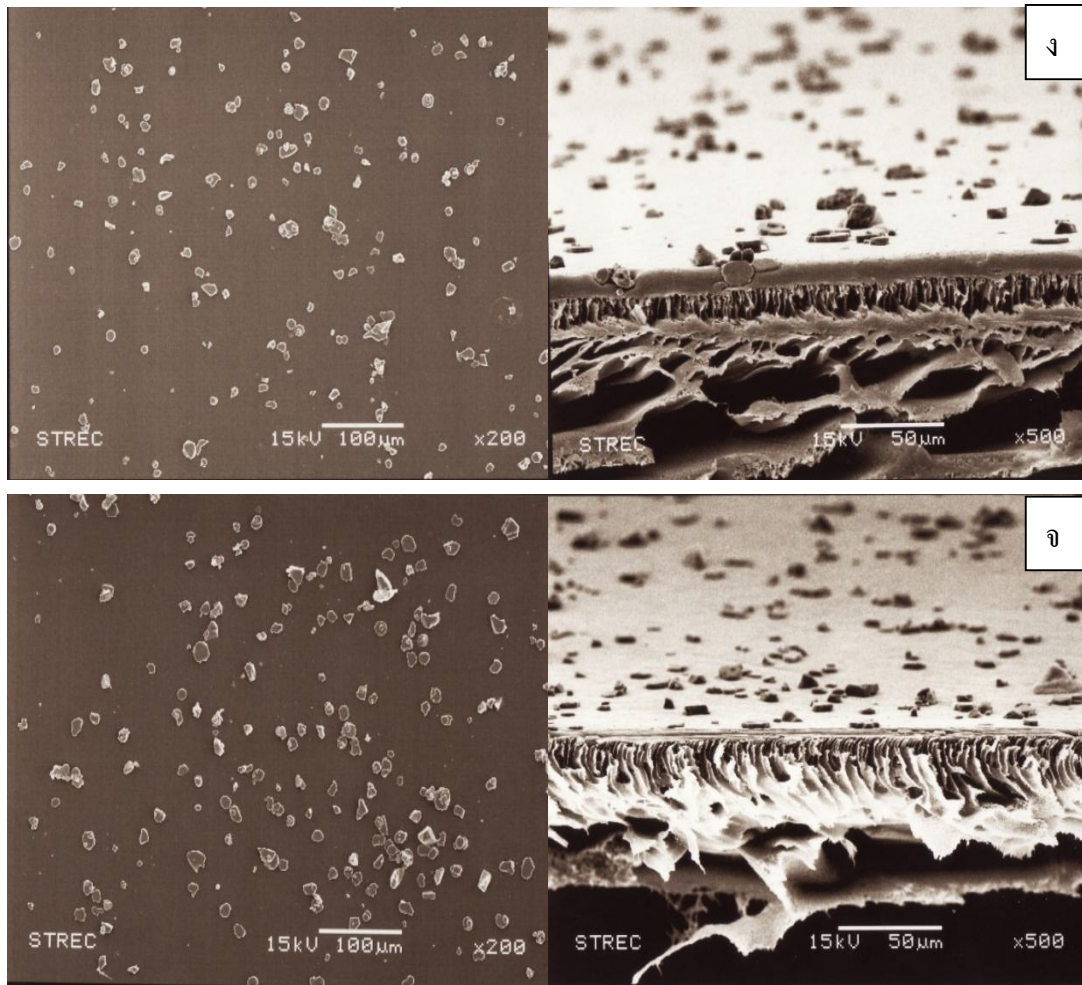
การศึกษาพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางด้วย SEM ก่อนและหลังกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย Al_2O_3 /CS/GA ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v จากผลการทดลองพบว่า เมื่อไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง (GA 0 % wt/v) ลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ คือ Al_2O_3 และ CS อาจหลุดออกจากเยื่อแผ่นเล็กน้อยเนื่องจาก Al_2O_3 ที่ผสมอยู่ในชั้นเคลือบได้รับแรงเหวี่ยงจากน้ำหลังจากกรองน้ำผ่านเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ก และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น GA 0.1 - 1.5 % wt/v พบว่าลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบบนเยื่อแผ่นจะมีลักษณะที่แน่นขึ้น และ Al_2O_3 หลุดออกจากชั้นเคลือบบนเยื่อแผ่นได้น้อยลงเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 4.5 (ข-ค) ซึ่งเหตุผลที่ชั้นเคลือบมีลักษณะที่แน่นขึ้นนี้เนื่องจาก GA เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ CS เป็นโครงร่างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยถ้าปริมาณ GA มากขึ้น การเชื่อมขวางก็จะเกิดขึ้นมาก ทำให้ชั้นเคลือบมีความแน่นขึ้นและการยัดกันระหว่าง Al_2O_3 กับ CS บนชั้นเคลือบก็ดียิ่งขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจึงช่วยลดการหลุดของชั้นเคลือบบนเยื่อแผ่นได้ดียิ่งขึ้น (ดังรูปที่ 4.5 ข-ง) อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของ GA ในปริมาณที่มากเกินไป (GA 1.5 %wt/v) พบว่าชั้นเคลือบ (Al_2O_3 /CS/GA) เกิดการแตกหลังกรองน้ำผ่าน (ดังรูปที่ 4.5 จ) เนื่องจากการใส่ GA ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ชั้นเคลือบเกิดการเชื่อมขวางในปริมาณที่มากเกินไป โดยจะส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความ

แน่นและเปราะมากยิ่งขึ้น [16] ดังนั้นชั้นเคลือบจึงสามารถแตกออกได้เมื่อได้รับแรงดันจากน้ำในขณะที่ยืดน้ำผ่าน

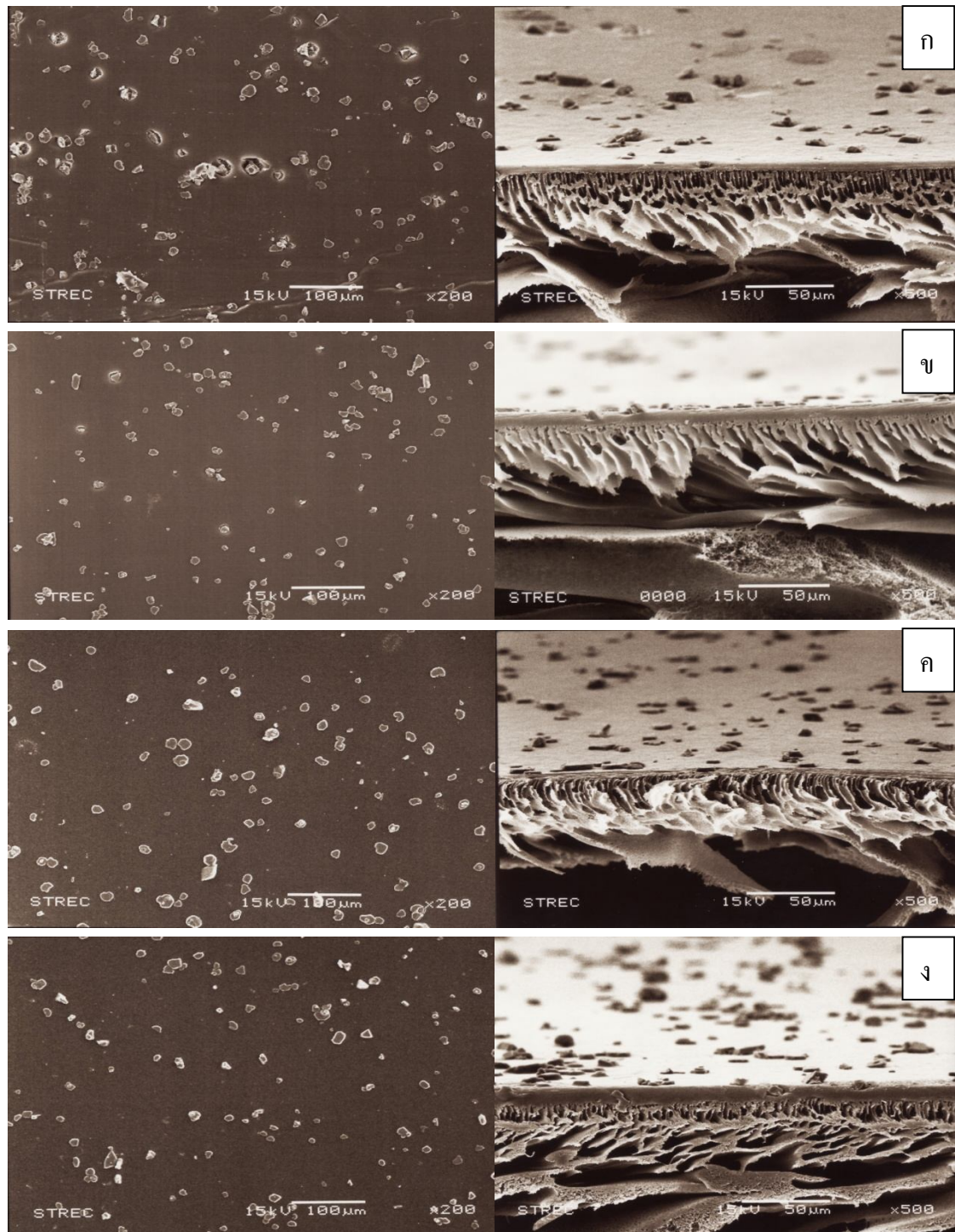


รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS/Al₂O₃ ซึ่งเชื่อมขวางด้วย GA ก่อนกรองน้ำผ่าน โดยใช้ความเข้มข้นของ GA (ก) 0 %, (ข) 0.1 %, (ค) 0.5%, (ง) 1% และ (จ) 1.5% โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al₂O₃ คงที่ที่ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

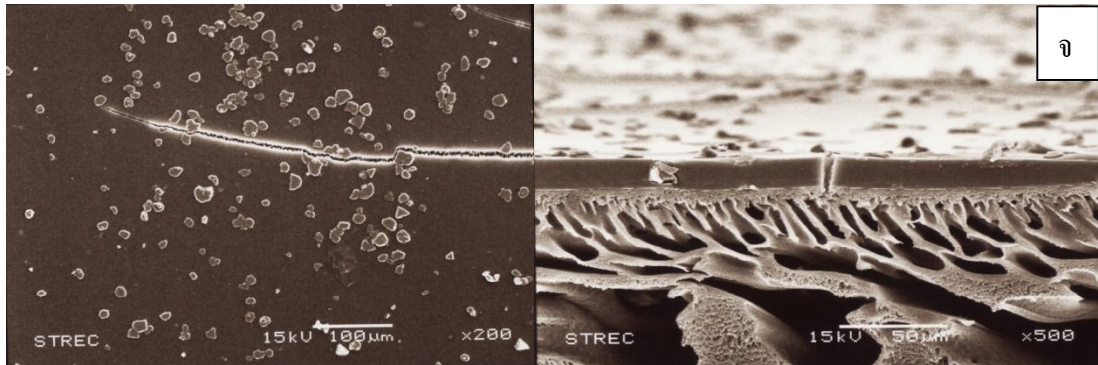
: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.4 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS / Al_2O_3 ซึ่งเชื่อมขวางด้วย GA ก่อนกรองน้ำผ่าน โดยใช้ความเข้มข้นของ GA (ก) 0 %, (ข) 0.1 %, (ค) 0.5%, (ง) 1% และ (จ) 1.5% โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ที่ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ
: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS/ Al_2O_3 ซึ่งเชื่อมขวางด้วย GA หลังกรองน้ำผ่าน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นของ GA (ก) 0 %, (ข) 0.1 %, (ค) 0.5%, (ง) 1% และ (จ) 1.5% โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ที่ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ
: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า



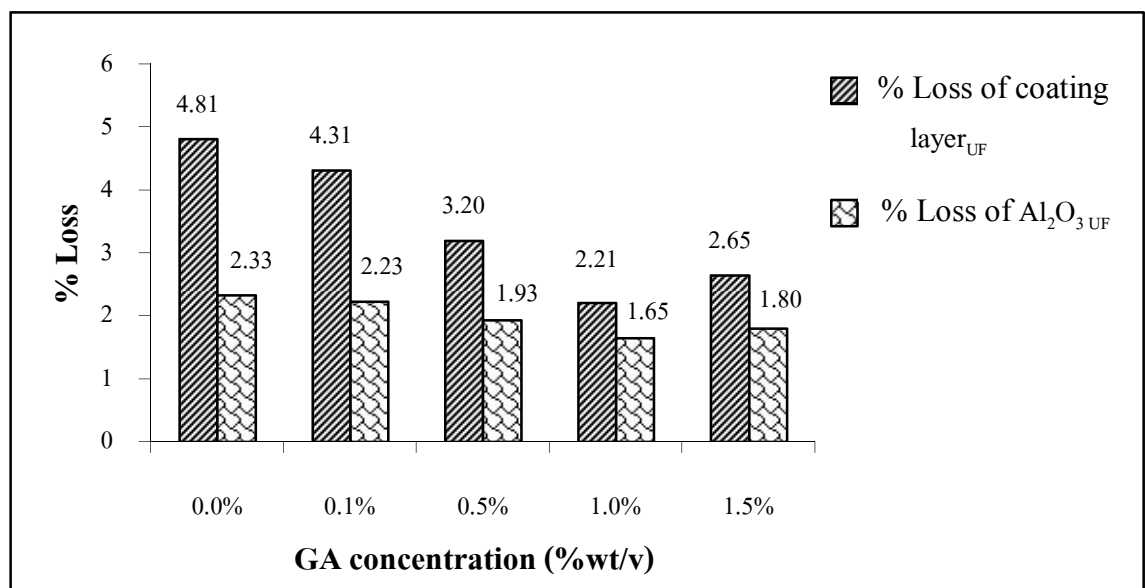
รูปที่ 4.5 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบผิวด้วย CS/ Al_2O_3 ซึ่งเชื่อมขวางด้วย GA หลังกรองน้ำผ่าน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นของ GA (ก) 0 %, (ข) 0.1 %, (ค) 0.5%, (ง) 1% และ (จ) 1.5% โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ที่ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ
: พื้นผิวด้านบน : กำลังการขยาย 200 เท่า และภาพตัดขวาง : กำลังการขยาย 500 เท่า

4.2.2 ผลของการหลุดของสารเคลือบ (% Loss of coating layer_{UF}) และการหลุดของ Al_2O_3 บนชั้นเคลือบ (% Loss of Al_2O_3 _{UF}) หลังกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่น

จากผลการทดลองหา % Loss ของชั้นเคลือบและ Al_2O_3 เมื่อมีการเติมสารเชื่อมขวาง เพื่อทดสอบความคงทนของชั้นเคลือบของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย Al_2O_3 /CS/GA ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ที่ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v โดยกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหา % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of Al_2O_3 _{UF} ดังวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว จากผลการทดลองเมื่อไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง (GA 0 %wt/v) พบว่าชั้นเคลือบซึ่งประกอบด้วย Al_2O_3 และ CS จะสามารถหลุดออกไปได้เนื่องจาก Al_2O_3 ได้รับแรงเฉือนจากน้ำในขณะที่กรองน้ำผ่าน ซึ่ง % Loss of coating layer_{UF} ในกรณีที่ไม่มีเติม GA นั้น % Loss of coating layer_{UF} จะหลุดได้ถึง 4.81% และเมื่อเติม GA 0.1-1.0 %wt/v พบว่า % Loss of coating layer_{UF} จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.6 โดยการเติม GA จะทำให้ชั้นเคลือบมีลักษณะที่แน่นมากยิ่งขึ้น เนื่องจาก GA จะเชื่อมขวางกับโมเลกุลของ CS เป็นโครงร่างตาข่าย การเติม GA ในปริมาณที่มาก การเชื่อมขวางที่ชั้นเคลือบก็จะมากยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นชั้นเคลือบจึงมีความแน่นและทนต่อแรงเฉือนมากขึ้น ซึ่งสามารถช่วยลดการหลุดของชั้นเคลือบบนเยื่อแผ่นได้ดี อย่างไรก็ตามการเติม GA ในปริมาณที่มากเกินไป (GA 1.5% wt/v) จะส่งผลให้ชั้นเคลือบมีลักษณะที่แน่นมากเกินไปและมีลักษณะที่เปราะมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดันจากน้ำในขณะที่กรองน้ำผ่าน จะส่งผลให้ชั้นเคลือบแตกและหลุดออกมาได้ จึงเป็นเหตุผลให้ % Loss of coating layer_{UF} ในกรณีที่เติม GA มาก

เกินไปมีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองนี้ก็จะสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของ SEM ด้วย ดังรูปที่ 4.5 (ก-จ)

เมื่อดูผลของการหลุดของ Al_2O_3 เพียงอย่างเดียว ซึ่งได้วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 ก่อนและหลังกรองน้ำผ่านด้วยเครื่อง XRF และคำนวณเป็น % Loss of $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{UF}}$ ซึ่งผลการทดลองจะให้ผลในทำนองเดียวกับผลของการหลุดออกของสารเคลือบ คือเมื่อไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง % Loss of $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{UF}}$ จะหลุดออกจากชั้นเคลือบไปได้ 2.33% และเมื่อเติม GA มากขึ้น การเชื่อมขวางที่ชั้นเคลือบมากขึ้น ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีลักษณะที่แน่นและแข็งแรงขึ้น % Loss of $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{UF}}$ จึงมีค่าลดลง และในกรณีที่เติม GA ในปริมาณที่มากเกินไป % Loss of $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{UF}}$ จะเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองก็มีความสอดคล้องกับ Uragami และคณะ [16] ซึ่งทำการศึกษาโครงสร้างของเยื่อแผ่นเมื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติของเยื่อแผ่น โดยได้ใช้ GA เชื่อมขวางกับ CS พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ GA ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความแน่นขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อได้เพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวาง (GA) ในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าเยื่อแผ่นจะมีแข็งและเปราะขึ้น



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การหลุดของหลุดของสารเคลือบ ($\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$) และ Al_2O_3 บนชั้นเคลือบโดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v หลังจากกรองน้ำผ่านเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

4.2.3 ผลของการดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น (water absorption of membrane) และการหลุดของสารเคลือบ (% Loss of coating layer) หลังการแช่น้ำ

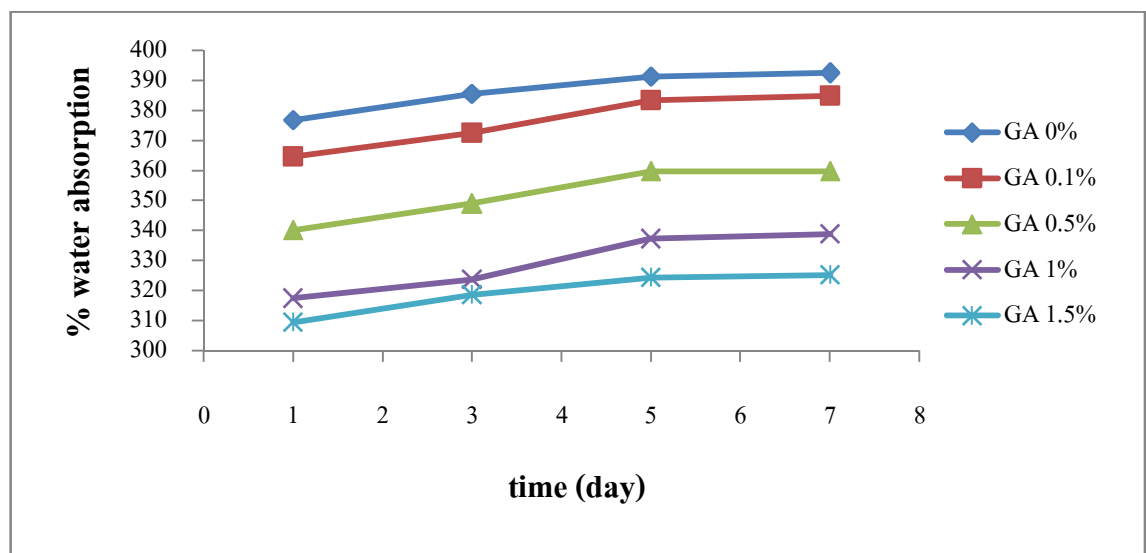
การทดสอบการดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น โดยนำเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v ไปชั่งน้ำหนักแห้งก่อนแช่ในน้ำ DI จากนั้นนำเยื่อแผ่นเปียกที่ผ่านการแช่ในน้ำ DI ที่เวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน ไปชั่งน้ำหนักเปียก นำเยื่อแผ่นที่ผ่านการชั่งน้ำหนักเปียกมาทำให้แห้ง โดยการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 2 วัน ทำการชั่งน้ำหนักเยื่อแผ่นแห้งแล้วนำน้ำหนักของเยื่อแผ่นเปียกและแห้ง (หลังการแช่ในน้ำ DI) ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%water absorption) ดังสมการที่ 3.1

จากผลการทดลองพบว่าการเติม GA 0.1-1.5%wt/v พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำบนเยื่อแผ่นมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม GA ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจาก GA เกิดการเชื่อมขวางกับ CS ซึ่งในการเชื่อมขวางนี้จะเกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชัน $-\text{NH}_2$ ของ CS และหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CHO}$ ของ GA ดังรูปที่ 2.6 ในการเชื่อมขวางนี้จะส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำของ CS คือหมู่ $-\text{NH}_2$ มีจำนวนลดลงเมื่อเกิดการเชื่อมขวาง ดังนั้นความชอบน้ำของเยื่อแผ่นจึงลดลงเมื่อเติม GA ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้การดูดซึมน้ำบนเยื่อแผ่นลดลงไปด้วย

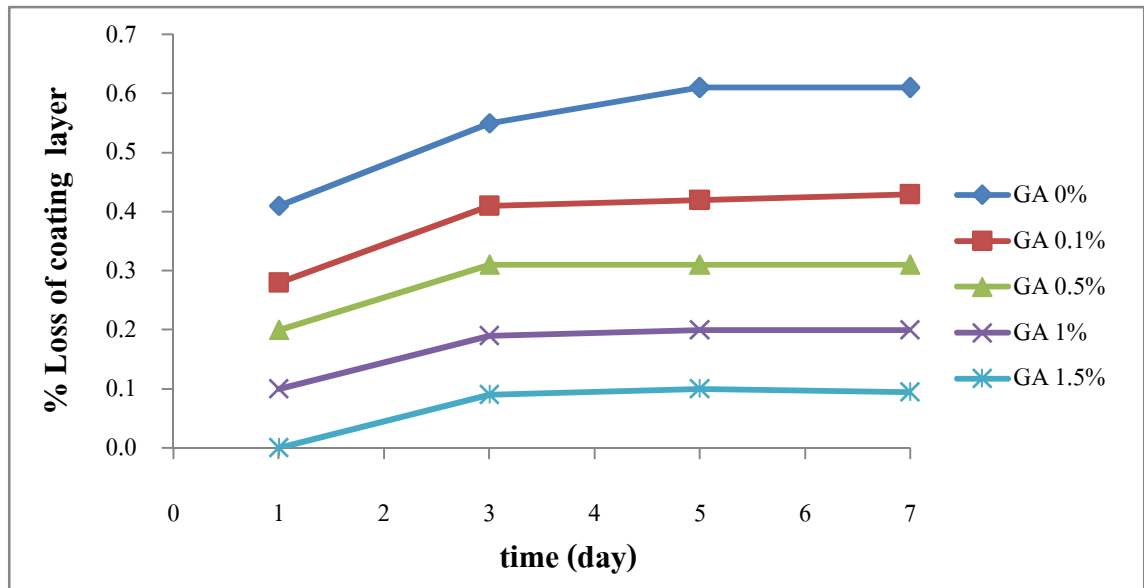
เมื่อนำเยื่อแผ่นเปียกหลังการทดสอบการดูดซึมน้ำมาทำให้แห้งเพื่อหา % Loss of coating layer ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การหลุดของชั้นเคลือบหลังการแช่น้ำโดยที่ไม่ผ่านการกรองน้ำในอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ UF ซึ่งจะใช้สมการที่ 3.2 ในการคำนวณหา % Loss of coating layer โดยชั้นเคลือบซึ่งประกอบด้วย Al_2O_3 และ CS อาจหลุดออกไปได้เมื่อแช่เยื่อแผ่นในน้ำหรือสารละลาย เนื่องจากชั้นเคลือบอาจพองตัวและละลายไปกับน้ำหรือสารละลายได้บางส่วน และ Al_2O_3 ที่แทรกตัวอยู่ใน CS แบบหลวมๆ ก็สามารถที่จะหลุดออกจากชั้นเคลือบได้เช่นเดียวกัน จากการทดลองเมื่อไม่ใส่ GA % Loss of coating layer มีค่าสูงสุด แต่เมื่อเติม GA 0.1-1.5%wt/v % Loss of coating layer มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง % Loss of coating layer_{UF} และ % Loss of coating layer พบว่าที่ความเข้มข้นของ GA ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ค่า % Loss จะให้ผลที่เหมือนกันคือมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้น GA เพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของ GA มากๆ ค่า % Loss of coating layer_{UF} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น GA (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) เนื่องจากเยื่อแผ่นมีลักษณะที่แข็งและเปราะมาก ดังนั้น Al_2O_3 ที่ผสมอยู่ในชั้นเคลือบเมื่อโดนแรงเฉือนจากน้ำจะทำให้ Al_2O_3 และ CS บางส่วนหลุดออกไปได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่า % Loss of coating layer_{UF} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ GA มากเกินไป ในส่วน

ของเยื่อแผ่นที่แช่น้ำนั้นจะไม่มีผลของแรงเฉือน ดังนั้น % Loss of coating layer จึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น GA และสาเหตุที่ % Loss of coating layer มีค่าลดลงเมื่อเติม GA คือ เยื่อแผ่นหลังผ่านการเชื่อมขวาง ความชอบน้ำของเยื่อแผ่นจะลดลง ดังนั้นการดูดซึมน้ำบนเยื่อแผ่นจึงลดลง ซึ่งสามารถช่วยลดการพองตัวและการละลายของชั้นเคลือบเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือสารละลายได้ และจากผลของการเชื่อมขวางนี้ยังส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความแน่นขึ้น และเมื่อ GA มากขึ้นการเชื่อมขวางก็จะมากยิ่งขึ้น ซึ่งความแน่นของชั้นเคลือบนั้นก็จะเป็นอีกเหตุผลที่หนึ่งที่อธิบายผลของการหลุดของชั้นเคลือบที่มีค่าลดลงได้ด้วย และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเชื่อมขวางด้วย GA จะช่วยลดการหลุดออกของสารเคลือบเนื่องจากการพองตัวและการละลายของชั้นเคลือบในขณะที่แช่น้ำได้



รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย CS/Al₂O₃ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v ที่ทำการแช่เยื่อแผ่นในน้ำ DI 1, 3, 5, 7 วัน โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al₂O₃ คงที่ที่ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การหลุดของสารเคลือบหลังแช่น้ำของของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย $\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v ที่ทำการแช่เยื่อแผ่นในน้ำ DI 1, 3, 5, 7 วัน โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

4.2.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่น

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีความสำคัญอย่างสูงต่อการนำวัสดุไปใช้งานและเป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรงภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ช่วยให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและเลือกนำไปใช้ได้งานได้เหมาะสม คุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญนำมาใช้พิจารณาคือความเค้นแรงดึง (tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (fracture) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวค่า (% elongation at break) คือปริมาณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่างภายใต้แรงดึง และยังเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความเหนียว (ductile) ของวัสดุ โดยทั่วไปถ้าวัสดุมีความเปราะ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดจะมีค่าน้อย

การทดสอบค่าความแข็งแรงเชิงกลคือค่า tensile strength และค่า % elongation at break ของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v จากผลการทดลองพบว่าเมื่อไม่มีการใส่สารเชื่อมขวางจะมีค่า tensile strength 3.08 MPa และค่า % elongation at break 4.03% และเมื่อใส่ GA จาก 0.1- 1% wt/v ค่า tensile strength และค่า % elongation at break มีค่ามากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ในการเพิ่มปริมาณ GA นั้นจะทำให้ชั้นของชั้นเคลือบมีความแข็งแรงและแน่นขึ้น เนื่องจาก GA เกิดการเชื่อมขวางกับ CS เป็น

โครงร่างตาข่าย ซึ่งส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความสามารถทนต่อแรงดึงได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้น GA 1.5 % wt/v ค่า tensile strength และ % elongation at break กลับมีค่าลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณ GA ที่มากเกินไป GA สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้มากขึ้น ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีลักษณะที่แข็งแน่นและเปราะมาก ดังนั้นความคงทนเมื่อโดนแรงดึงหรือแรงกระทำจากภายนอกก็จะน้อยลงด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aminabhavi และคณะ [31] โดยทำการศึกษาการเตรียมเยื่อแผ่นที่ผสมด้วย CS และ PVA แล้วทำการเชื่อมขวางด้วย GA เมื่อใส่สารเชื่อมขวาง คุณสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นคือ ค่า tensile strength และ % elongation at break จะมีค่าที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.1 ค่า tensile strength และ % elongation at break ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย CS/ Al_2O_3 โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

ปริมาณ GA	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break
GA 0.0%	3.08	4.03
GA 0.1%	3.16	5.15
GA 0.5%	3.75	7.06
GA 1.0%	4.28	10.79
GA 1.5%	3.97	9.63

4.3 ผลของการทดสอบเยื่อแผ่น

4.3.1 ค่า Molecular Weight Cut-Off (MWCO)

การทดลองหาค่า MWCO เป็นการทดสอบว่าเยื่อแผ่นที่ผลิตขึ้นนั้น มีความสามารถในการกักกันสาร ในช่วงขนาดโมเลกุล 500 – 300,000 ซึ่งเป็นช่วงการแยกของกระบวนการ UF หรือไม่ โดยในการทดลองหาค่า MWCO ได้ใช้สารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 4, 15, 35, 100 และ 400 kDa ตามลำดับ โดยกำหนดให้ MWCO มีค่าเท่ากับขนาดโมเลกุลของ PEG ที่เล็กที่สุด ซึ่งเยื่อแผ่นสามารถกักกันไว้ได้ 90%

เมื่อทำการเคลือบผิวเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v พบว่าเมื่อไม่ได้ใส่ GA ค่า MWCO มีค่า 11.6 kDa และเมื่อใส่ GA 0.1-1.5 % wt/v ค่า MWCO มีค่าลดลงเล็กน้อยและใกล้เคียงกันดังนี้ 11.2, 10.8, 10.5 และ 10.2 kDa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่า MWCO ที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากการที่ชั้นเคลือบมีลักษณะที่แน่นขึ้น เนื่องมาจากผลการเชื่อมขวางด้วย GA โดย GA จะเชื่อมขวางกับ CS เป็นโครงร่างตาข่าย และเมื่อ GA มากขึ้นชั้นเคลือบก็ยิ่งแน่นขึ้น เยื่อแผ่นมีความต้านทานการไหลสูงขึ้น ดังนั้นสารละลาย PEG ที่ใช้หา MWCO จึงแพร่ผ่านได้ยากส่งผลให้ค่าที่ได้ลดลงตามลำดับ

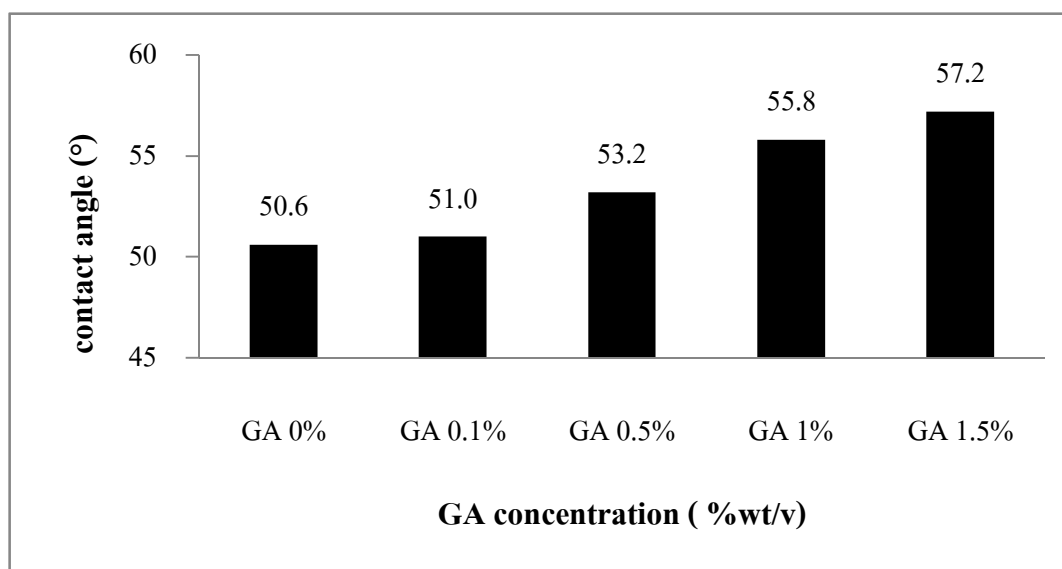
ตารางที่ 4.2 ค่า MWCO ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย $\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

ปริมาณ GA	MWCO (kDa)
GA 0.0%	11.6
GA 0.1%	11.2
GA 0.5%	10.8
GA 1.0%	10.5
GA 1.5%	10.2

4.3.2 ค่ามุมสัมผัส (contact angle)

ค่า contact angle (θ_c) คือ ค่าที่แสดงถึงความชอบน้ำ (hydrophilic) ของพื้นผิวสัมผัส โดยผิวที่ค่า θ_c ต่ำจะชอบน้ำมากกว่าผิวที่มีค่า θ_c สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเยื่อแผ่นที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ และความสามารถในการต้านการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น

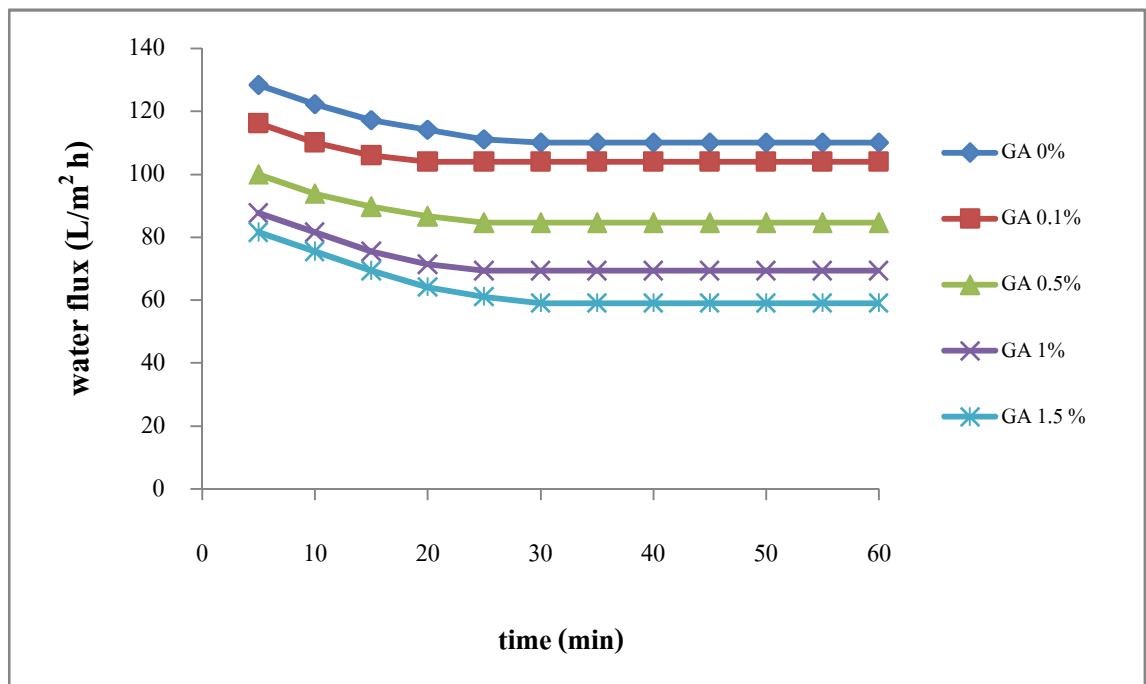
จากรูปที่ 4.9 พบว่าเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v เมื่อเพิ่มความเข้มข้น GA ค่า contact angle มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า contact angle ที่เพิ่มขึ้นนี้บ่งบอกว่าเยื่อแผ่นหลังจากการเติม GA มีความชอบน้ำน้อยลง เนื่องจาก GA เกิดการเชื่อมขวางกับโมเลกุลของ CS ซึ่งในการเชื่อมขวางนี้จะเกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชัน $-\text{NH}_2$ ของ CS และหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CHO}$ ของ GA และจะส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันที่แสดงถึงความชอบน้ำของ CS คือหมู่ $-\text{NH}_2$ มีจำนวนลดลงหลังจากเกิดการเชื่อมขวาง ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของ GA มากสามารถที่จะเกิดการเชื่อมขวางได้มาก ความชอบน้ำของเยื่อแผ่นจึงลดลง



รูปที่ 4.9 ค่า contact angle ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย $\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

4.3.3 ค่าฟลักซ์น้ำ

นำเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v มาหาค่าฟลักซ์น้ำ โดยใช้ชุดการทดลอง UF ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้สภาวะการทดลองที่ความดัน 2 bar อัตราการไหล 0.887 L/min และทำการเก็บปริมาตรน้ำทุก 5 นาที เพื่อนำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์ ซึ่งค่าฟลักซ์น้ำที่ได้นี้ เป็นค่าเฉลี่ยของเยื่อแผ่น 3 แผ่น ซึ่งผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย $\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05wt ตามลำดับ

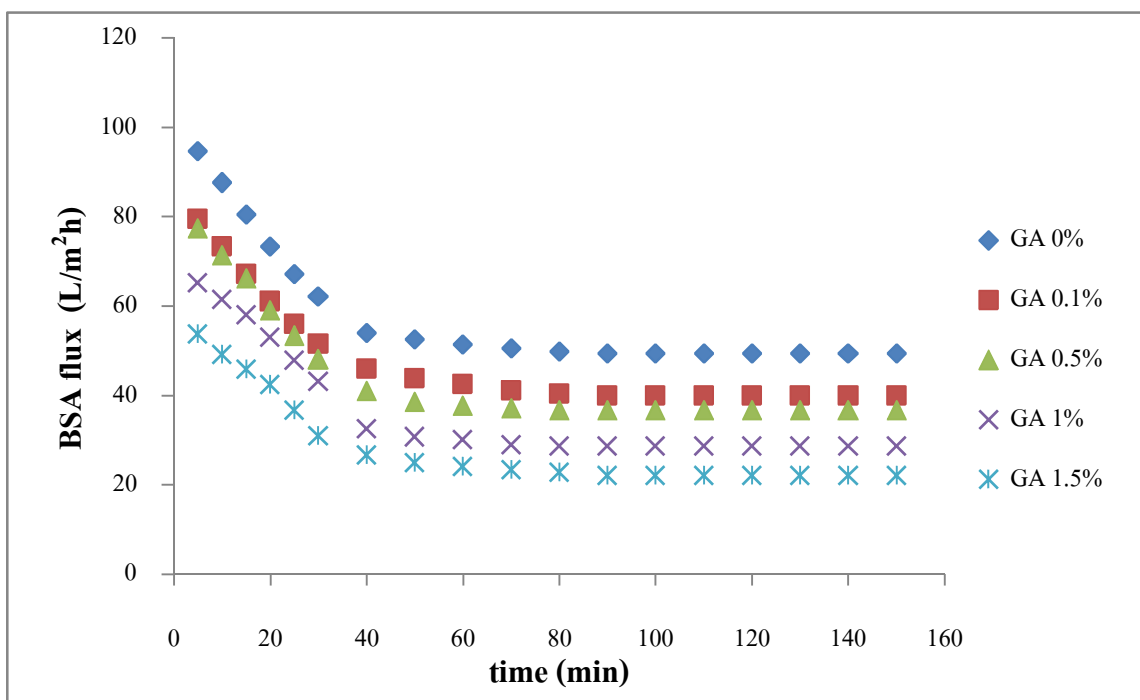
จากผลการทดลองเมื่อพบว่าเมื่อไม่มีการเติม GA ค่าฟลักซ์น้ำมีค่า 110 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ และเมื่อใส่ GA 0.1-1.5 %wt/v พบว่าค่าฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นมีแนวโน้มลดลง ดังนี้ 103.89, 84.54, 69.26, และ 59.07 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ตามลำดับ การที่ค่าฟลักซ์น้ำลดลงเนื่องมาจาก GA เกิดการเชื่อมขวางกับ CS และทำให้หมู่ที่ขบหน้ำของ CS ลดลง ดังนั้นการใส่ GA ในปริมาณที่มาก GA เกิดการเชื่อมขวางได้มากขึ้น ดังนั้นความขบหน้ำของเยื่อแผ่นก็จะลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อค่าฟลักซ์น้ำด้วย โดยผลการทดลองก็จะสอดคล้องกับค่า contact angle คือการเพิ่ม GA ค่า contact angle ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งก็บ่งบอกว่าเยื่อแผ่นมีความขบหนำน้อยลง

4.4 การทดสอบการกรองโปรตีนของเยื่อแผ่น

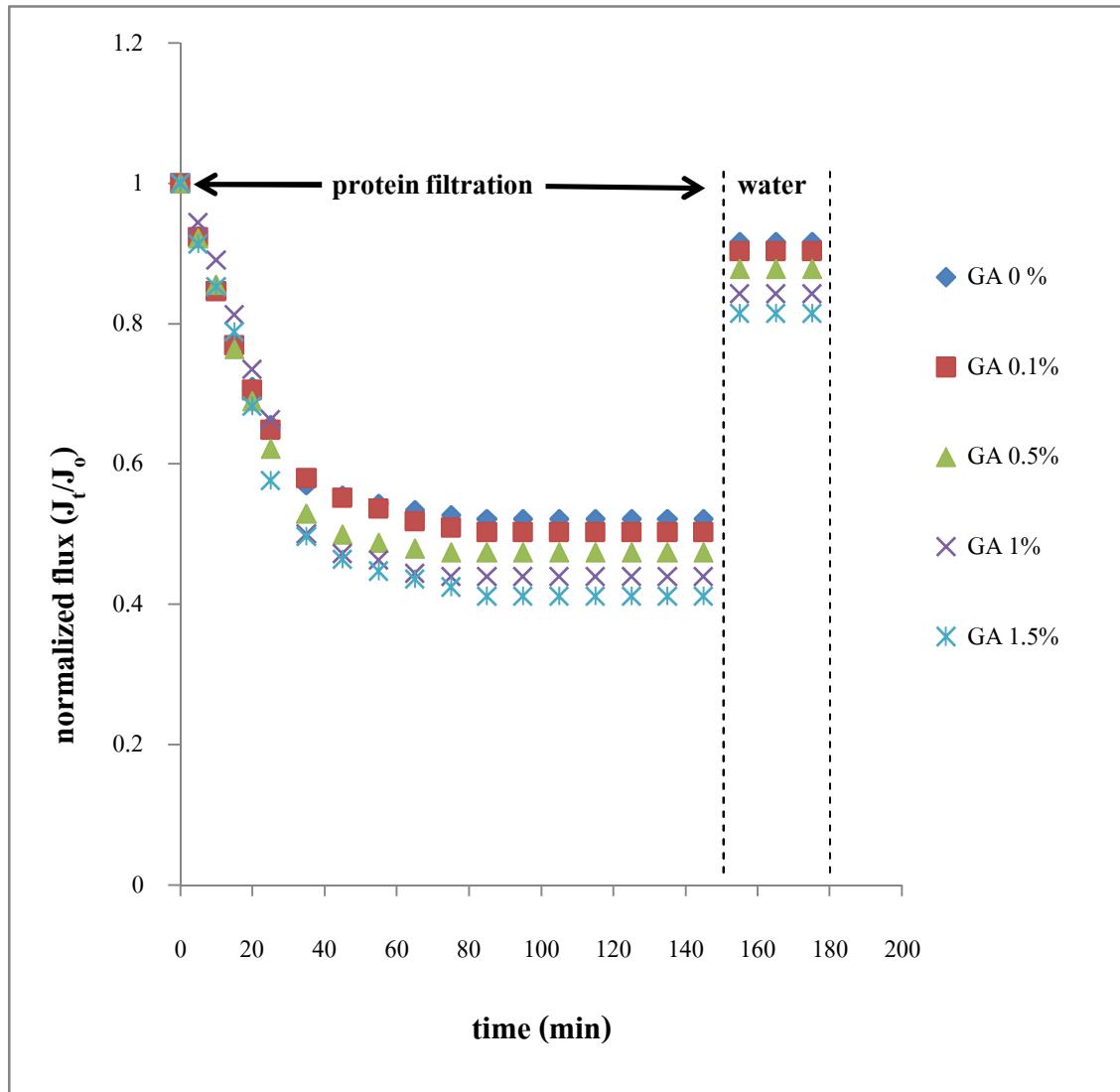
4.4.1 ฟลักซ์สารละลายโปรตีน

ในการทดสอบการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น เลือกใช้โปรตีน BSA เป็นตัวทดสอบ เนื่องจากโปรตีนชนิดนี้เป็นโปรตีนมีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 66 kDa มีค่า iep ที่ pH 4.7

เมื่อนำเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v มาทดสอบหาค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีน จากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนมีการลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลของโปรตีนเคลื่อนที่มาอัดแน่นกันอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นโดยจะค่อยๆ อัดแน่นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนจะมีค่าต่ำสุดเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที จากรูปที่ 4.11 พบว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายโปรตีนจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ GA เนื่องจาก GA จะเชื่อมขวางกับ CS ที่หมู่ $-\text{NH}_2$ ของ CS ส่งผลให้หมู่ $-\text{NH}_2$ ของ CS ซึ่งแสดงคุณสมบัติชอบน้ำลดลง และเมื่อ GA มากการเชื่อมขวางก็จะเกิดขึ้นได้มาก ดังนั้นเยื่อแผ่นมีความชอบน้ำลดลง ดังนั้นเยื่อแผ่นสามารถเกิดฟาวลิงได้ง่ายเมื่อเติม GA ในปริมาณที่มากขึ้นไป



รูปที่ 4.11 ค่าฟลักซ์สารละลายโปรตีน BSA ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย $\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ค่า normalized flux สารละลายโปรตีน BSA ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย CS/ Al_2O_3 โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า normalized flux ซึ่งเป็นอัตราส่วนของฟลักซ์สารละลายโปรตีนที่เวลาใดๆ ต่อฟลักซ์สารละลายโปรตีนเริ่มต้น โดยการคิดค่า normalized flux จะเป็นการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของเยื่อแผ่นแต่ละแผ่น ซึ่งค่าฟลักซ์ของเยื่อแผ่นแต่ละชนิดมีค่าฟลักซ์ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบเยื่อแผ่นแต่ละแผ่นที่เชื่อมขวางด้วย GA (0 -1.5%wt/v) พบว่าค่า normalized flux มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ GA และมีค่าต่ำสุดที่ความเข้มข้น GA 1.5%wt/v เป็นผลมาจากความขรุขระของเยื่อแผ่นที่ลดลงเนื่องมาจากการเชื่อมขวาง โดยผลการทดลองก็จะสอดคล้องกับ

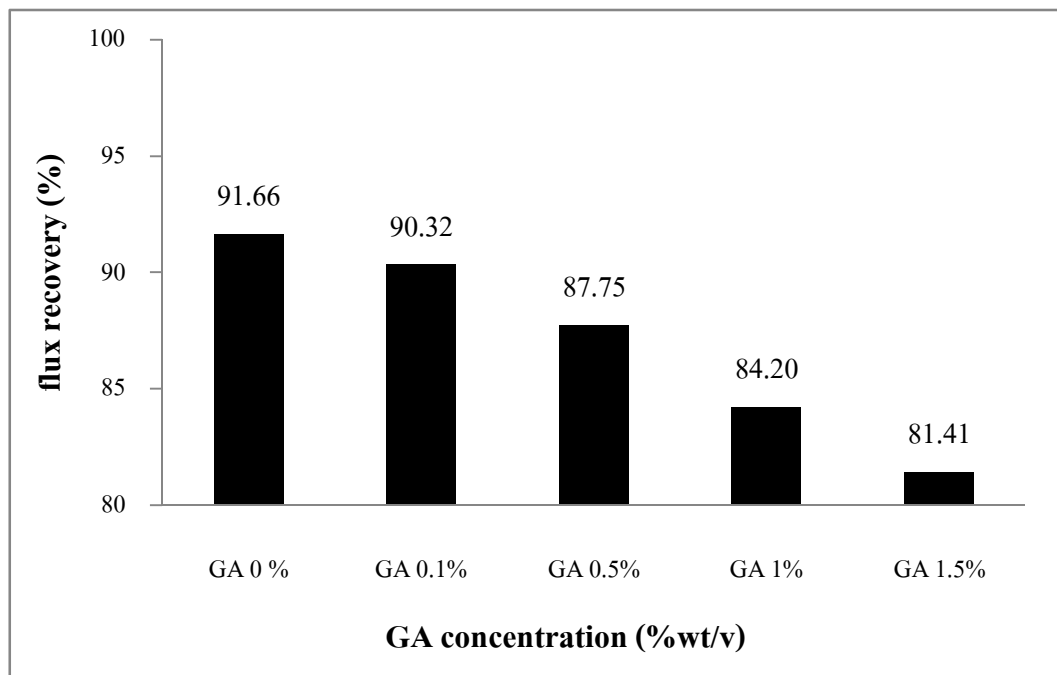
ผลของค่า contact angle ดังรูปที่ 4.9 ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า GA จะส่งผลต่อค่าความชอบน้ำของเยื่อแผ่น และการที่ค่า normalized flux ค่านี้จะบ่งบอกว่าเยื่อแผ่นสามารถที่จะเกิดฟาวลิงได้ง่าย

4.4.2 การกลับคืนของค่าฟลักซ์น้ำ

การประเมินค่าการกลับคืนของค่าฟลักซ์หลังจากกรองโปรตีนผ่านเยื่อแผ่น หาได้จากค่า flux recovery ratio, FRR: ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$FRR (\%) = \frac{J_{w2}}{J_{w1}} \times 100$$

ซึ่งค่า FRR เป็นค่าที่แสดงถึงการกลับคืนของค่าฟลักซ์น้ำ ถ้า FRR มีค่าสูง หมายถึง สามารถกำจัดโปรตีนที่ติดซับบนเยื่อแผ่นออกได้มากโดยการล้างด้วยน้ำ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าฟาวลิงที่เป็นแบบผันกลับได้ (reversible fouling) ถูกกำจัดออกได้มาก ซึ่งแสดงว่าเยื่อแผ่นนั้นมีคุณสมบัติในการต้านฟาวลิงและมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ โดยที่ J_{w1} คือ ฟลักซ์น้ำก่อนทดสอบโปรตีนและ J_{w2} คือค่าฟลักซ์น้ำหลังจากการทำความสะอาดเยื่อแผ่นด้วยน้ำสะอาดหลังจากทดสอบโปรตีน

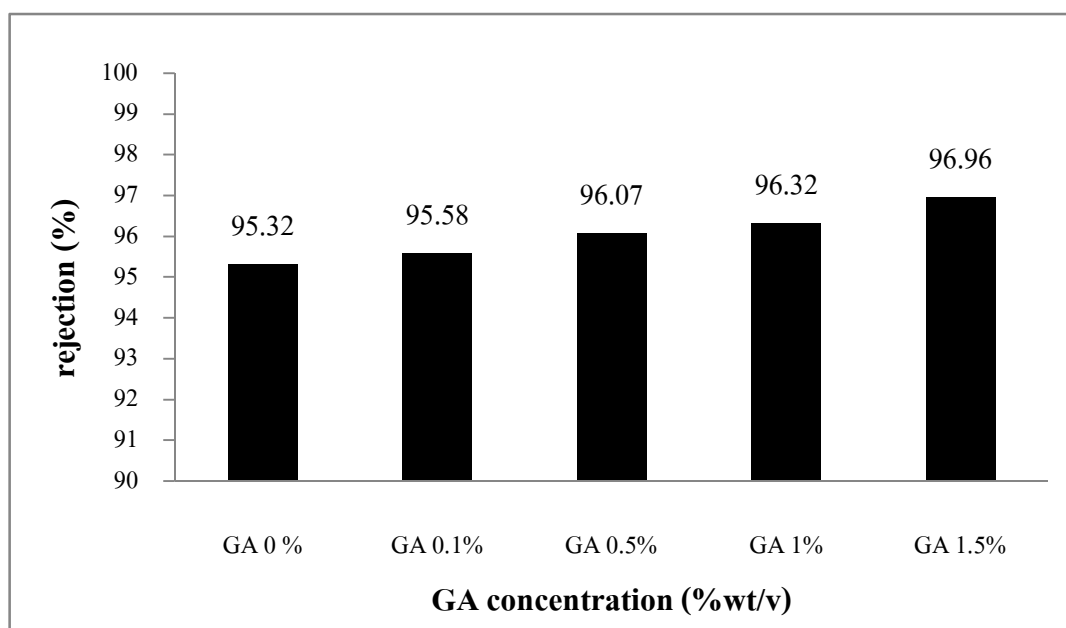


รูปที่ 4.13 ค่า flux recovery ของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย CS/Al₂O₃ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al₂O₃ คงที่ที่ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

จากผลของการเชื่อมขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v ค่อกำ FRR (%) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ GA เพิ่มขึ้น ค่อกำ FRR (%) มีค่าลดลงดังรูปที่ 4.13 เนื่องจาก GA จะเชื่อมขวางกับ CS ที่หมู่ $-\text{NH}_2$ ของ CS ส่งผลให้หมู่ $-\text{NH}_2$ ของ CS ที่แสดงคุณสมบัติความชอบน้ำลดลง และเมื่อปริมาณ GA มากก็สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้มาก ดังนั้นคุณสมบัติชอบน้ำของเยื่อแผ่นจึงลดลง ซึ่งการที่เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำน้อยลงนี้จะส่งผลให้เกิดการสะสมของโปรตีนที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นได้มากหลังการกรองโปรตีน และสามารถเกิดฟาวลิงได้ง่ายด้วย โดยการล้างทำความสะอาดเยื่อแผ่นด้วยน้ำก็จะยากขึ้นด้วย

4.4.3 ค่าการกักกัน (Rejection)

ค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักสารของเยื่อแผ่น มีค่าในช่วง 0 – 100 % ซึ่งค่าการกักกันหาได้จากการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโปรตีน BSA (น้ำหนักโมเลกุล 66 kDa) ในเฟอมีอเทและไนรีเทนเทท ดังสมการที่ 2.8



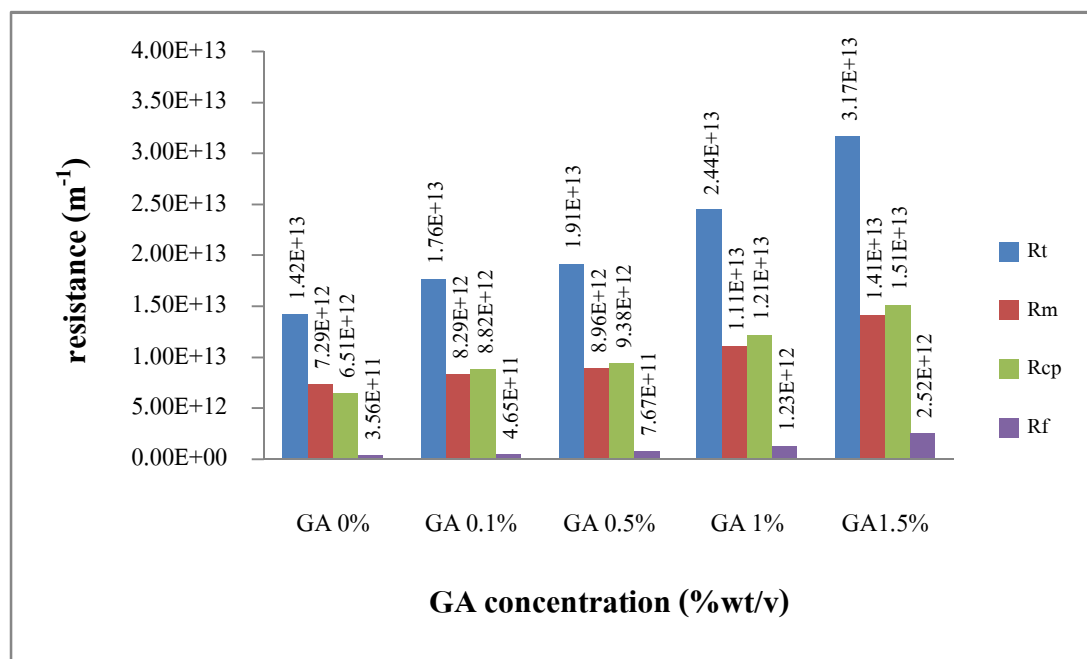
รูปที่ 4.14 การกักกันของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย $\text{CS}/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CS}/\text{GA}$ ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al_2O_3 คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v จากการทดลองพบว่าค่าการกักกันมีค่าใกล้เคียงกันคือ (95-97%) และมีค่าการกักกันมากที่สุดที่ความเข้มข้น GA 1.5 %wt/v คือ 96.96% ดังแสดงในรูปที่

4.14 ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้น GA นั้นจะส่งผลให้ค่าการกักกันมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก GA เกิดการเชื่อมขวางกับ CS เป็นโครงร่างตาข่าย และการเติม GA มากขึ้นการเชื่อมขวางก็เกิดมากขึ้น ดังนั้นเยื่อแผ่นจะมีความแน่นขึ้นตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองก็สอดคล้องกับผลของค่า MWCO โดยจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ GA ดังตารางที่ 4.2

4.4.4 ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น

คุณสมบัติในการต้านฟาวลิงของเยื่อแผ่นหาได้จากการคำนวณหาความต้านทานรวมต่อการไหลของเยื่อแผ่น (R_t) อธิบายโดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (resistance-in-series model) ดังสมการที่ 2.3 อันประกอบด้วยความต้านทานเยื่อแผ่น (R_m) ความต้านทานคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{cp}) ซึ่งสามารถดึงออกได้โดยใช้น้ำกลั่น และความต้านทานฟาวลิง (R_f)



รูปที่ 4.15 ความต้านทานของเยื่อแผ่น PES เคลือบด้วย CS/Al₂O₃ โดยเติมสารเชื่อมขวาง (GA) 0.0, 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 %wt/v โดยควบคุมความเข้มข้น CS และ Al₂O₃ คงที่ๆ 0.3 wt/v และ 0.05%wt ตามลำดับ

จากผลของการเชื่อมขวางของเยื่อแผ่น PES ที่เคลือบด้วย Al₂O₃/CS/GA ที่ CS 0.3 % wt/v ปริมาณ Al₂O₃ คงที่ๆ 0.05 g และ GA 0.1 - 1.5 % wt/v ต่อค่าความต้านทานต่างๆ ดังรูปที่ 4.15 จากการทดลองพบว่าเมื่อนำเยื่อแผ่นมาทดสอบฟาวลิงด้วยสารละลายโปรตีน BSA ค่าความต้านทาน R_t , R_m , R_{cp} และ R_f มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ GA ซึ่งการเพิ่มปริมาณ GA จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ชั้นเคลือบมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เยื่อแผ่นมีความขบหน้าน้อยลง เมื่อเยื่อแผ่นมีความขบหน้าน้อยลงโอกาสที่จะเกิด

การสะสมของชั้นโปรตีนบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นได้มากขึ้นเมื่อกรองโปรตีนผ่าน ดังนั้นค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{cp}) และค่าการต้านทานการเกิดฟาวลิง (R_p) จึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อ GA เพิ่มขึ้น และการที่เยื่อแผ่นมีความขบมน้ำน้อยลงนี้เป็นผลทำให้เยื่อแผ่นสามารถที่จะเกิดฟาวลิงได้ง่ายขึ้น

ผลของการเชื่อมขวางนี้จะส่งผลต่อค่าความต้านทานการไหล (R_m) โดยจะมีค่าความต้านทานการไหลมากขึ้น เนื่องจากเยื่อแผ่นหลังจากการเชื่อมขวางมีลักษณะที่แน่นขึ้นซึ่งผลการทดลองจะสอดคล้องกับค่า MWCO ดังในตารางที่ 4.2 แม้ว่าการเติม GA มากขึ้นนี้จะส่งผลต่อการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมขวางด้วย GA ก็จะช่วยเพิ่มความคงทนต่อการใช้งานของเยื่อแผ่นให้มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

4.5 เปรียบเทียบงานวิจัย

จากงานวิจัยของ Ma และคณะ [14] ได้ทำการเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น PES โดยวิธีการเคลือบผิวด้วย PVA โดยได้ทำการเชื่อมขวางด้วยสารละลาย Borax ส่วนงานวิจัยของ ปิ่นนภา หาญณรงค์ [13] ได้ทำการปรับสภาพของเยื่อแผ่น UF ให้มีความขบมน้ำ โดยใช้วิธีการเคลือบ Al_2O_3 ลงบนเยื่อแผ่น PES โดยมี CS เป็นตัวยึดให้ Al_2O_3 ติดอยู่บนเยื่อแผ่น พบว่าค่างานวิจัยนี้มีค่า %FRR ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ma และคณะ คืออยู่ที่ 84-80% FRR โดยจะมีค่าที่น้อยกว่างานวิจัยของ ปิ่นนภา หาญณรงค์ ซึ่งค่าจะอยู่ที่ 94 %FRR เนื่องมาจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Ma และคณะ ได้มีการใส่สารเชื่อมขวาง ในการใส่สารเชื่อมขวางนี้จะส่งผลให้เยื่อแผ่นมีคุณสมบัติความขบมน้ำน้อยลงและเยื่อแผ่นสามารถที่จะเกิดฟาวลิงได้ง่าย

เมื่อดูผลของคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่น ของงานวิจัยนี้และเทียบกับงานวิจัยของทราวุธ ราชิจันทร์ [33] ที่ทำการศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติของเยื่อแผ่น PES ด้วยการผสม PVA และใช้ GA เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่างานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่า คือค่า tensile strength และ % elongation at break สูงกว่างานวิจัยของทราวุธ ราชิจันทร์ โดยค่าคุณสมบัติเชิงกลที่สูงนี้ก็จะบ่งบอกว่าเยื่อแผ่นสามารถทนต่อการใช้งานในระยะเวลาที่ยาวนานได้

การเปรียบเทียบ % Loss of coating layer โดยงานวิจัยนี้ได้นำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ สุรัตน์ ธารไชย [34] ซึ่งทำการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่น PVDF เคลือบด้วย CS/PVA 1% ซึ่งเป็นการเคลือบแบบ 2 ชั้นและใช้ GA 0.3% เป็นสารเชื่อมขวาง และงานวิจัยของ วนิตา ธนาสุสนธิ์ [35] ซึ่งทำการปรับสภาพ เยื่อแผ่น PVDF เคลือบด้วย CS 1.5% และเชื่อมขวางด้วย GA 0.3% จากผลการทดลองพบว่า งานวิจัยนี้จะมี % Loss อยู่ที่ 0.20 % ส่วนของ สุรัตน์ ธารไชย และ วนิตา ธนาสุสนธิ์ จะมีค่าอยู่ที่ 0.97% และ 0.44% ตามลำดับ โดย % Loss of coating layer ของงานวิจัยนี้จะลดน้อยกว่างานวิจัยอื่นๆ เนื่องจากงานวิจัยนี้ใส่ปริมาณสารเชื่อมขวางต่อสารเคลือบมากกว่างานวิจัยอื่น ซึ่งสัดส่วนของ สารเชื่อมขวางต่อสารเคลือบของงานวิจัยนี้คือ GA 1% ต่อ CS 0.3% ส่วนของ สุรัตน์ ธารไชย และ วนิตา ธนาสุสนธิ์ จะอยู่ที่ GA 0.3% ต่อ CS/PVA 1% และ GA 0.3% ต่อ CS 1.5% ตามลำดับ ส่งผลให้ งานวิจัยนี้เกิดการเชื่อมขวางบนชั้นเคลือบได้มากกว่า และการที่ชั้นเคลือบจะละลายในน้ำหรือ สารละลายจึงน้อยกว่างานวิจัยอื่นๆ ในส่วนของ % Loss of coating layer_{UF} เมื่อเปรียบเทียบกับ งานวิจัยของ สุรัตน์ ธารไชย โดยกรองน้ำผ่านเยื่อแผ่นด้วยระยะเวลาที่นาน พบว่า % Loss of coating layer_{UF} ในงานวิจัยของสุรัตน์ ธารไชย จะมีค่ามากกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากสัดส่วนระหว่างสารเชื่อม ขวากับสารเคลือบน้อยกว่างานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงเกิดการเชื่อมขวางได้น้อยที่ชั้นเคลือบ และเมื่อโดน แรงดันจากน้ำทำให้ชั้นเคลือบละลายและหลุดออกไปได้มากกว่า

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบงานวิจัยที่ได้จากการทำการศึกษการเพิ่มความคงทนและการทดสอบฟาวลิงของเยื่อแผ่น

หัวข้อ	โพลีเมอร์	วิธีการ	สารเชื่อมขวาง	Tensile strenght (Mpa)	Elongation at break (%)	FRR%	% Loss of coating layer _{UF}	% Loss of coating layer
งานวิจัยนี้	PES	เคลือบด้วย Al ₂ O ₃ /CS	GA	GA (%wt/v) GA 0% = 3.08 GA1% = 4.28	GA (%wt/v) GA 0% = 4.03 GA1% = 10.79	GA (%wt/v) GA 0% = 91.66 GA1% = 84.20	Run UF 24 h GA 1% = 2.21%	GA 1% = 0.20%
ปิ่นนภา หาญณรงค์ [13]	PES	เคลือบด้วย Al ₂ O ₃ /CS (Al ₂ O ₃ 0-6%wt)	-	-	-	Al ₂ O ₃ (%wt) Al ₂ O ₃ 0% = 48.48 Al ₂ O ₃ 4% = 94.01	-	-
ทราวุธ รายจินทร์ [33]	PES	ผสม PVA (0.25-1.5%wt)	GA	GA (%wt/v) GA 0% = 2.67 GA1% = 2.72	GA (%wt/v) GA 0% = 6.36 GA1% = 7.63	GA (%wt/v) GA 0% = 48.90 GA1% = 59.21	-	GA 1% = 0.24%
Ma และคณะ [14]	PES	เคลือบผิวด้วย PVA (0.1-2%wt)	Borax	-	-	PVA (%wt/v) PVA0% = 53 PVA1% = 80.17	-	-

หัวข้อ	โพลีเมอร์	วิธีการ	สารเชื่อม ขวาง	Tensile strenght (Mpa)	Elongation at break (%)	FRR%	% Loss of coating layer _{UF}	% Loss of coating layer
สุรัตน์ ธารไชย [34]	PVDF	เคลือบ 2 ชั้นด้วย CS/PVA	GA 0.3%	-	-	PVDF =1.29% CS/PVA 1 % = 66.67%	Run UF 20 h CS 0.5/PVA 0.1% = 2.23%	CS 0.5/PVA 0.1% = 0.97%
วนิดา ธนาสุสนธิ์ [35]	PVDF	เคลือบด้วย CS 1.5%	GA และ sulfuric acid	-	-	ผสม GA 0.3% = 84%	-	ผสม GA 0.3% = 0.44%