

### บทที่ 3

#### ผลการวิจัย

##### ตอนที่ 1 การศึกษาค่าความแข็งแรงกระแทก

ค่าความแข็งแรงกระแทกเฉลี่ยของกลุ่มทดลอง 6 กลุ่ม พบว่า กลุ่มที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกเฉลี่ยจากสูงสุดไปต่ำสุด คือ กลุ่ม MF, กลุ่ม DF, กลุ่ม PMF-3, กลุ่ม PMF-2, กลุ่ม PMF-1, และกลุ่ม C ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยที่กลุ่มที่ใส่เส้นใยเพื่อเสริมแรงทั้ง 5 กลุ่ม มีค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 6.6-17.2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ใส่เส้นใย (กลุ่ม C)

##### ตารางที่ 2 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกเฉลี่ยของเรซินอะคริลิก (ฟุต-ปอนด์ / นิ้ว)

กลุ่มทดลอง	ค่าความแข็งแรงกระแทกเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าต่ำสุด ที่วัดได้	ค่าสูงสุด ที่วัดได้
C	0.439 $\pm$ 0.020	0.411	0.478
DF	6.078 $\pm$ 1.055	5.062	7.961
MF	7.543 $\pm$ 1.487	4.433	9.877
PMF-1	2.914 $\pm$ 0.414	2.068	3.450
PMF-2	2.936 $\pm$ 0.468	2.365	4.063
PMF-3	4.498 $\pm$ 0.930	3.145	5.828

แสดงกลุ่มที่ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากการวิเคราะห์ทางสถิติครัสคาล-วาลิส พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกระหว่างกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.000$ ) และเมื่อทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบ LSD

(ดูภาคผนวก) พบว่า ทุกกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ยกเว้นระหว่างกลุ่ม PMF-1 และกลุ่ม PMF-2 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงลำดับเฉลี่ย (mean rank) ของค่าความแข็งแรงกระแทกของเรซินอะคริลิก

กลุ่มทดลอง	ลำดับเฉลี่ย
C	5.50
DF	46.10
MF	53.20
PMF-1	21.30
PMF-2	20.45
PMF-3	36.45

แสดงกลุ่มที่ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

(ค่าวิกฤต ที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบ LSD เท่ากับ 5.373)

หมายเหตุ

กลุ่ม C      กลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ใส่เส้นใย

กลุ่ม DF      กลุ่มที่ใส่เส้นใยแห้ง

กลุ่ม MF      กลุ่มที่แช่เส้นใยในมอนอเมอร์

กลุ่ม PMF-1      กลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ ที่อัตราส่วน 0.375 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

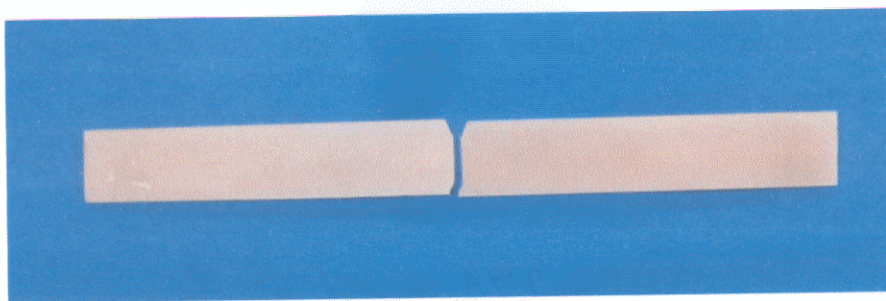
กลุ่ม PMF-2      กลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ ที่อัตราส่วน 0.75 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

กลุ่ม PMF-3      กลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ ที่อัตราส่วน 1.25 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

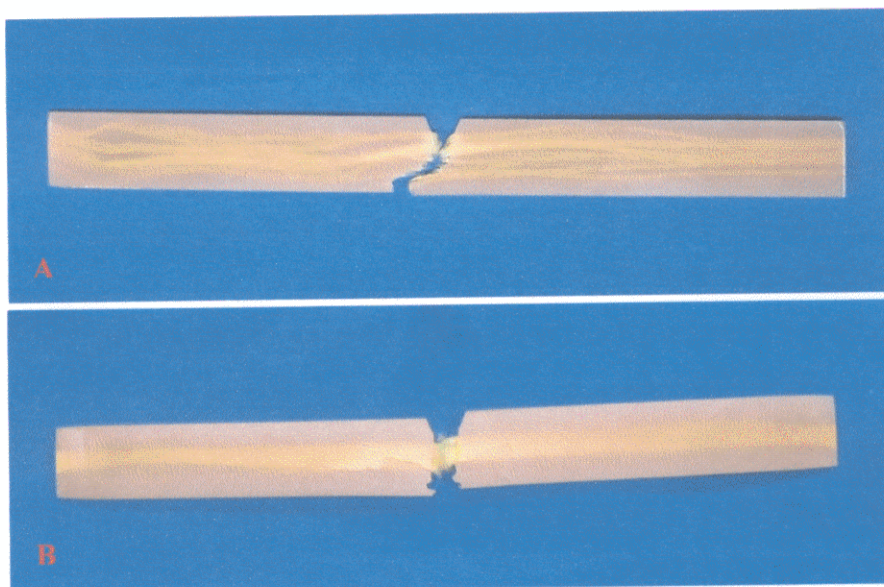
จากการศึกษาลักษณะการแตกหักของชิ้นทดสอบ พบลักษณะการแตกหัก 2 รูปแบบ คือ (1) มีการแตกหักอย่างสมบูรณ์ทำให้ชิ้นทดสอบแยกออกเป็นสองส่วน และ (2) มีการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์โดยเส้นใยไม่ขาดออกจากกันทั้งหมดทำให้ยังยึดชิ้นทดสอบทั้งสองส่วนได้ ดังแสดงในตารางที่ 4 กลุ่มที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงได้แก่ กลุ่ม DF และ MF พบปริมาณชิ้นทดสอบที่มีการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ร้อยละ 30-50 แต่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของการแตกหักและค่าความแข็งแรงกระแทกที่วัดได้ กลุ่มที่ไม่ได้ใส่เส้นใยมีรอยแตกค่อนข้างเป็นเส้นตรงผ่านรอยบาก ดังแสดงในรูปที่ 14 ขณะที่กลุ่มที่ใส่เส้นใยมีรอยแตกตรงหรือทแยงไปตามแนวของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 15 และพบมีเส้นใยถูกดึงหลุดออกจากเรซินอะคริลิกบางส่วน นอกจากนี้รอยแตกมีลักษณะขรุขระกว่าแบบไม่ได้ใส่เส้นใย

ตารางที่ 4 แสดงความถี่ของการแตกหักในแต่ละกลุ่มทดลองในรูปแบบต่างๆ (ชิ้น)

กลุ่มทดลอง	ลักษณะการแตกหัก	
	มีการแตกหักอย่างสมบูรณ์	มีการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์
C	10	-
DF	7	3
MF	5	5
PMF-1	10	-
PMF-2	10	-
PMF-3	10	-
รวม	52	8

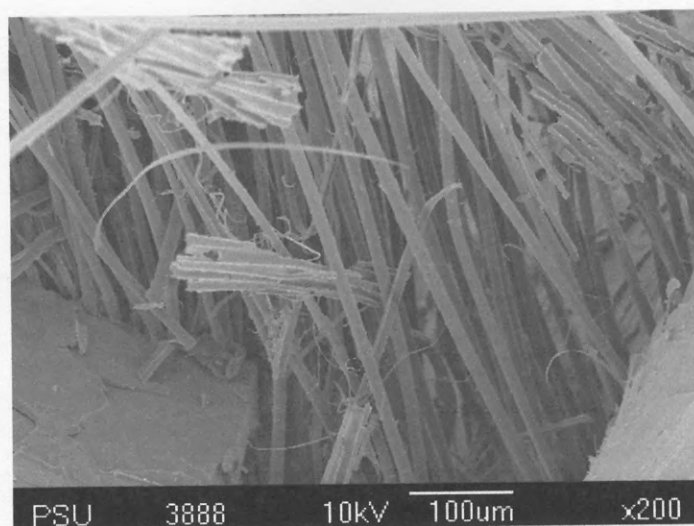


รูปที่ 14 แสดงลักษณะการแตกหักอย่างสมบูรณ์ในกลุ่มที่ไม่ได้ใส่เส้นใย

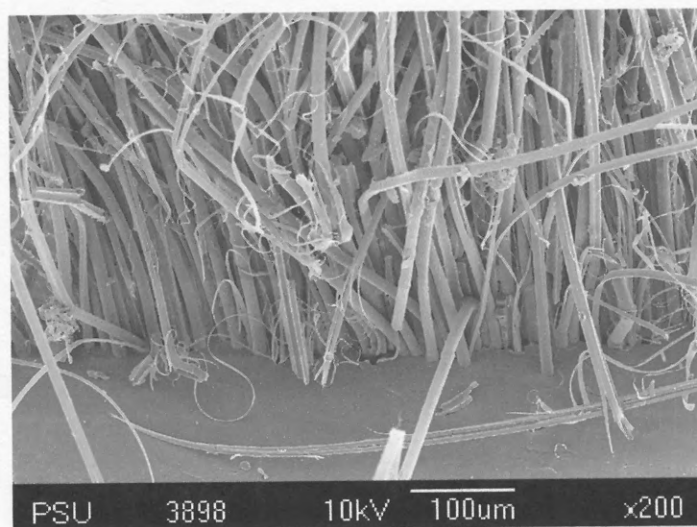


รูปที่ 15 แสดงลักษณะการแตกหักในกลุ่มที่ใส่เส้นใย การแตกหักอย่างสมบูรณ์(A) และการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ (B)

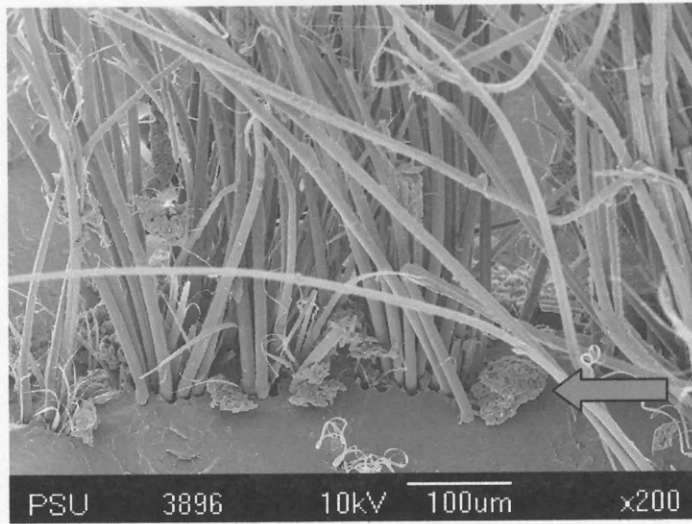
จากการศึกษารอยแตกโดยใช้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยอะรามิดมีการยึดเกาะกับเรซินอะคริลิกน้อยมาก พบช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการที่เส้นใยถูกดึงออกมา (pull-out) จากส่วนของเมทริกซ์ที่เป็นเรซินอะคริลิก และมีเรซินอะคริลิกก่อตัวเป็นก้อนเล็กๆ เกาะที่เส้นใยในกลุ่มที่มีการแช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ ได้แก่ กลุ่ม PMF-1, กลุ่ม PMF-2, และกลุ่ม PMF-3 ดังแสดงในรูปที่ 16-20



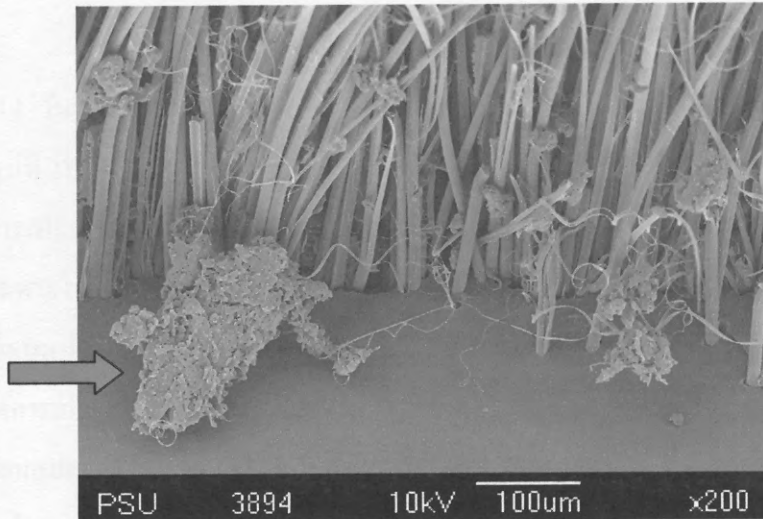
**รูปที่ 16** แสดงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยอะรามิดและเรซินอะคริลิกด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ในบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบกลุ่ม DF



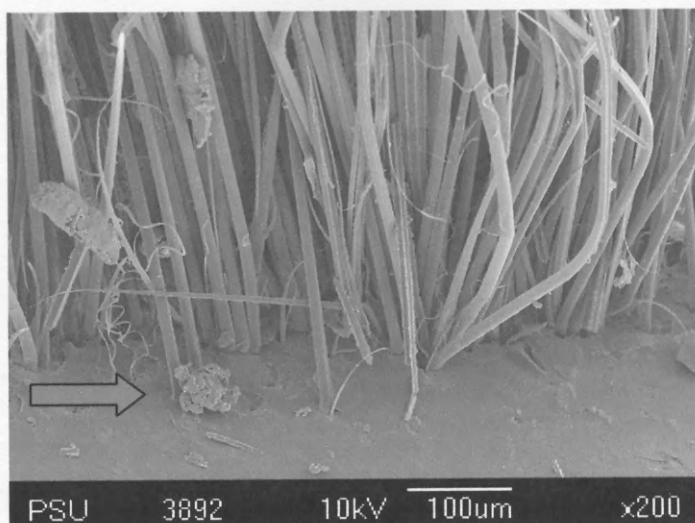
**รูปที่ 17** แสดงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยอะรามิดและเรซินอะคริลิกด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ในบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบกลุ่ม MF



**รูปที่ 18** แสดงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยอะรามิดและเรซินอะคริลิกด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ในบริเวณรอยแตกหักของชั้นทดสอบกลุ่ม PMF-1 (ลูกศรแสดงถึงตำแหน่งที่เรซินอะคริลิกมีการก่อตัวเป็นก้อนเล็กๆ)



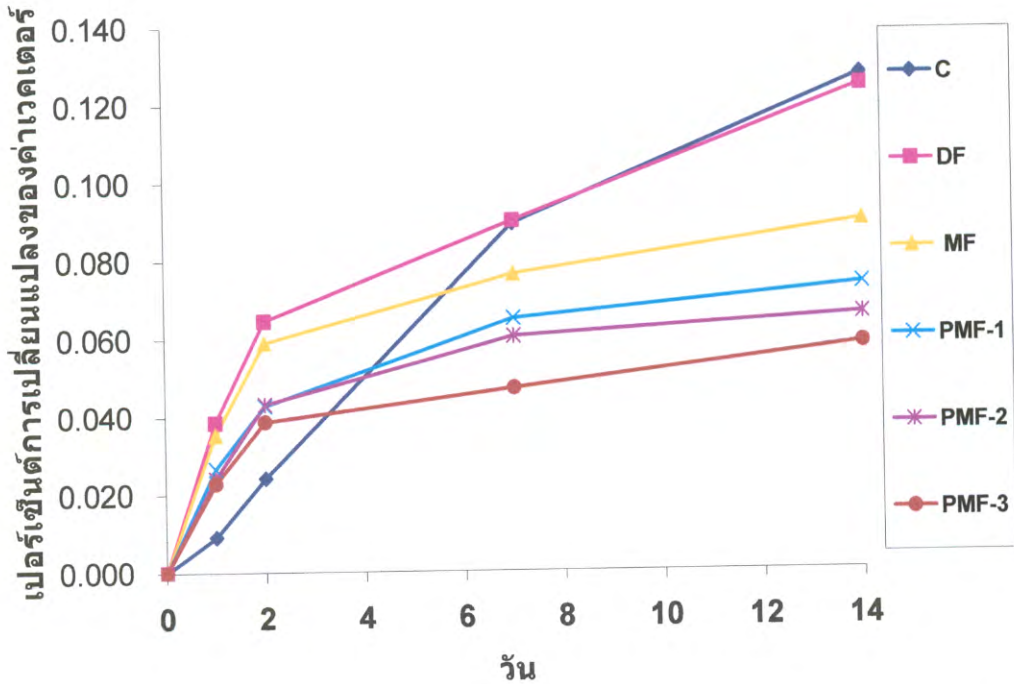
**รูปที่ 19** แสดงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยอะรามิดและเรซินอะคริลิกด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ในบริเวณรอยแตกหักของชั้นทดสอบกลุ่ม PMF-2 (ลูกศรแสดงถึงตำแหน่งที่เรซินอะคริลิกมีการก่อตัวเป็นก้อนเล็กๆ)



รูปที่ 20 แสดงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยอะรามิดและเรซินอะคริลิกด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ในบริเวณรอยแตกหักของจีนทดสอบกลุ่ม PMF-3 (ลูกศรแสดงถึงตำแหน่งที่เรซินอะคริลิกมีการก่อตัวเป็นก้อนเล็กๆ)

## ตอนที่ 2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางมิติ

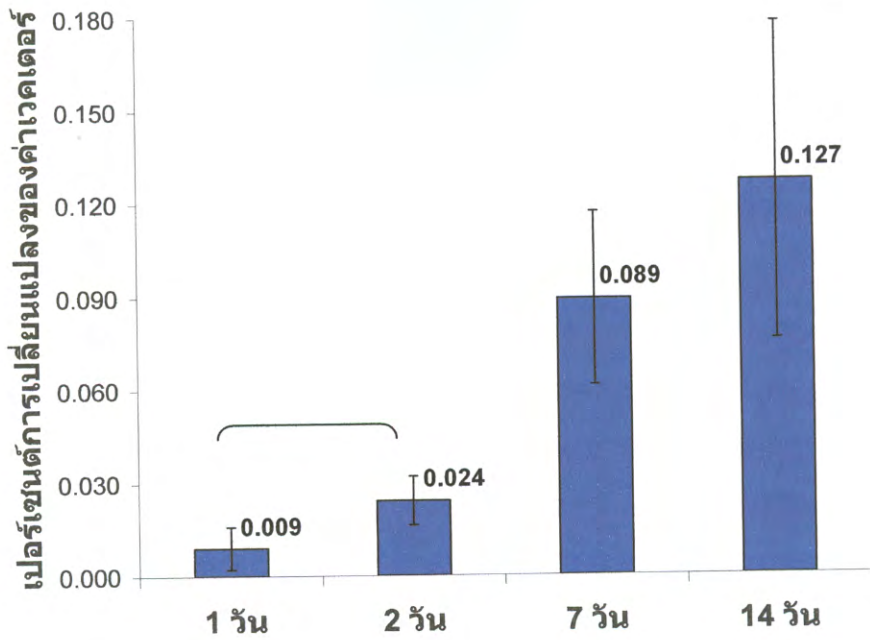
เรซินอะคริลิกทุกกลุ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงทางมิติโดยเกิดการขยายตัวตลอดช่วงเวลา 14 วันที่ทดสอบและแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงมิติที่น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยในกลุ่มที่ใส่เส้นใยทุกกลุ่มมีการเปลี่ยนแปลงมิติเกิดขึ้นมากในช่วง 2 วันแรก และเกิดการเปลี่ยนแปลงมิติน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใส่เส้นใยซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ เมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มที่ใส่เส้นใย พบว่า กลุ่มที่มีการแช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ มีการเปลี่ยนแปลงมิติน้อยกว่ากลุ่มที่ใส่เส้นใยแห้งและกลุ่มที่แช่เส้นใยในมอนอเมอร์ โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าแวกเตอร์ต่ำกว่าตลอดช่วงเวลา 14 วันที่ทำการทดสอบ และกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงมิติต่ำที่สุด คือ กลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ ที่อัตราส่วน 1.25 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก (กลุ่ม PMF-3)



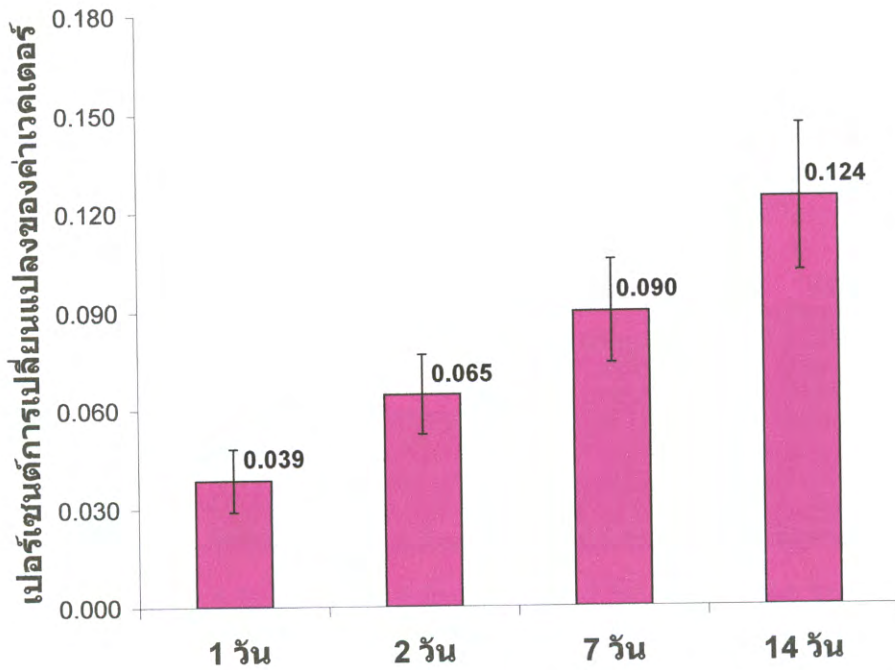
รูปที่ 21 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวคเตอร์ในระยะเวลา 14 วัน ที่มีการแช่น้ำ

เมื่อเปรียบเทียบภายในแต่ละกลุ่ม โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า การเปลี่ยนแปลงมิติที่เกิดขึ้นภายในแต่ละกลุ่ม ณ ช่วงเวลาต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.000$ ) และเมื่อทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบ Tukey HSD พบว่า ในกลุ่ม C, กลุ่ม DF, และกลุ่ม MF การเปลี่ยนแปลงมิติระหว่างการแช่น้ำในวันที่ 7 และ 14 วัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.033, 0.000, \text{ และ } 0.045$  ตามลำดับ) ในขณะที่กลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ทั้ง 3 กลุ่ม การเปลี่ยนแปลงมิติระหว่างการแช่น้ำในวันที่ 7 และ 14 วัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.653, 0.851, \text{ และ } 0.081$  ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 22-27 แสดงให้เห็นว่าในกลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลายพอลิเมอร์-มอนอเมอร์เริ่มมีขนาดคงที่ หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน

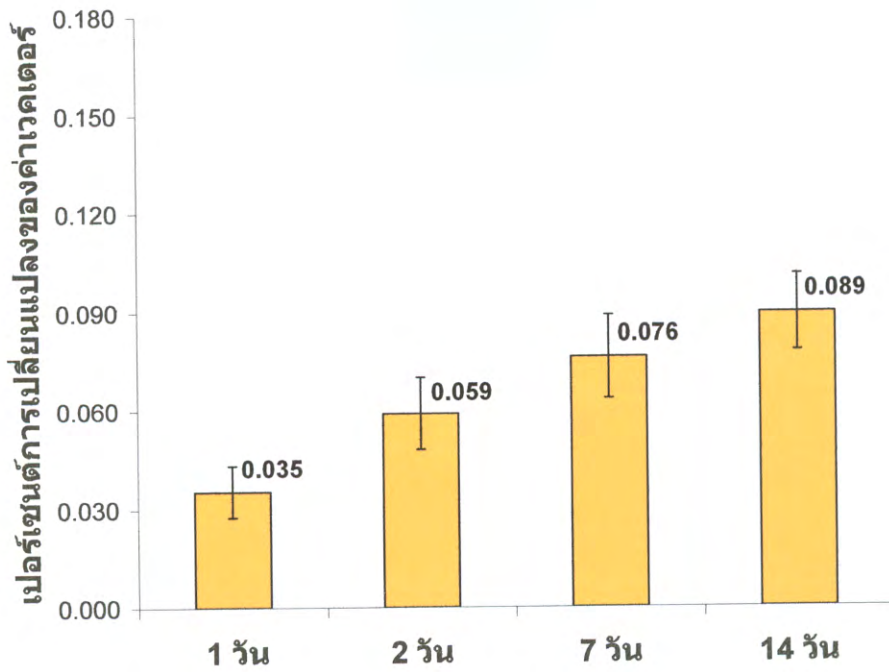




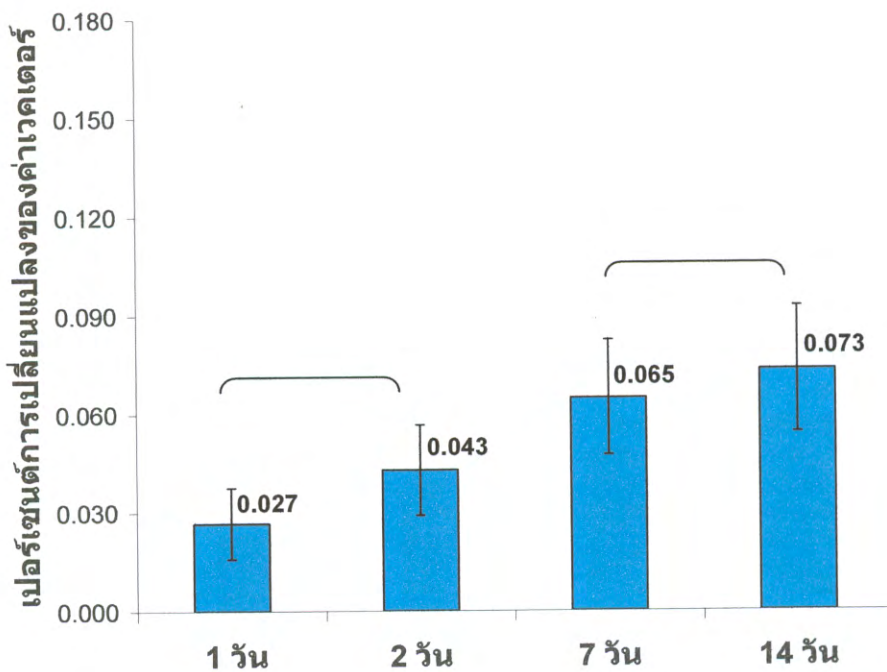
รูปที่ 22 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ในกลุ่ม C ที่เวลาต่างๆ ( — คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)



รูปที่ 23 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ในกลุ่ม DF ที่เวลาต่างๆ

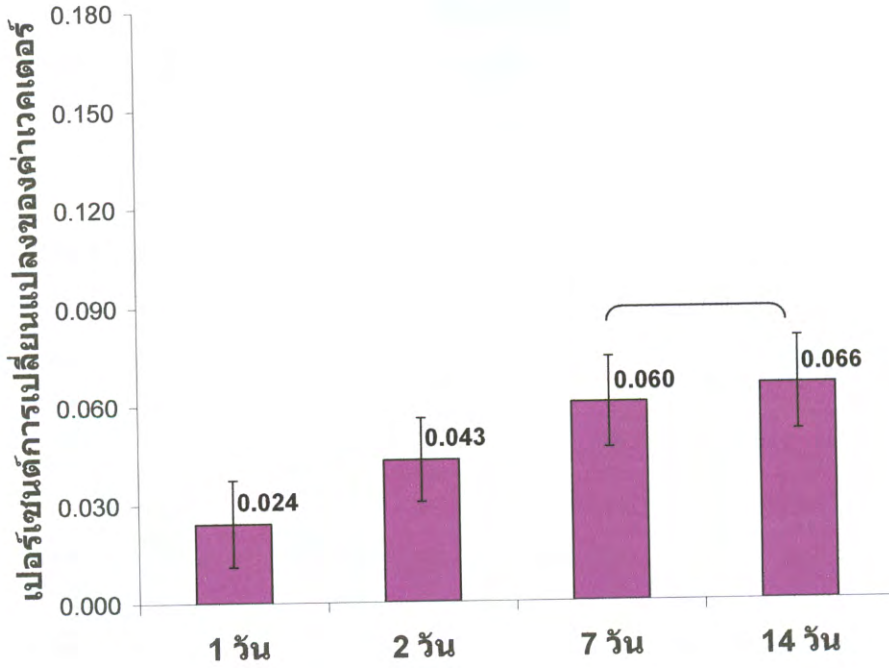


รูปที่ 24 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ในกลุ่ม MF ที่เวลาต่างๆ

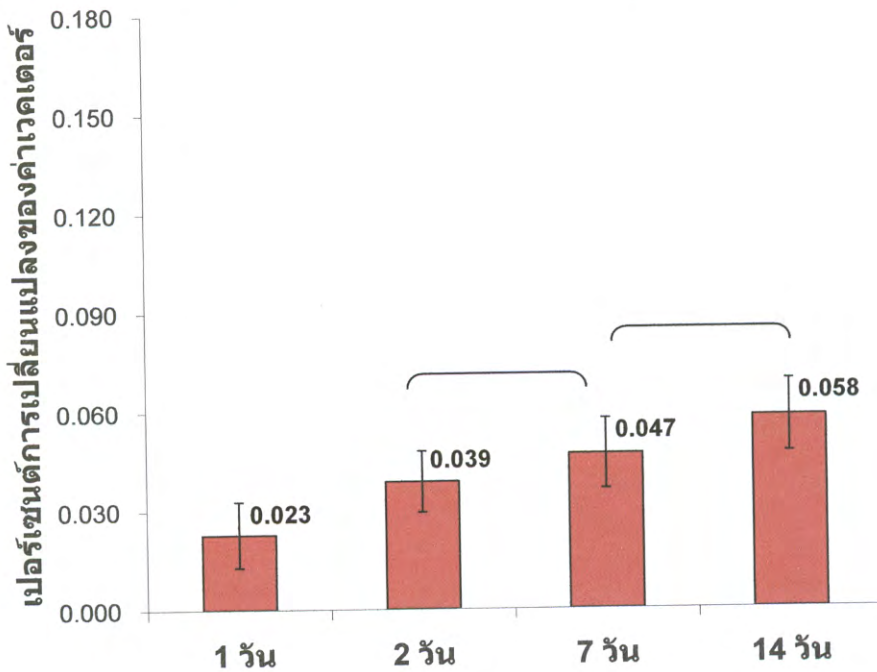


รูปที่ 25 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ในกลุ่ม PMF-1 ที่เวลาต่างๆ

( — ) คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

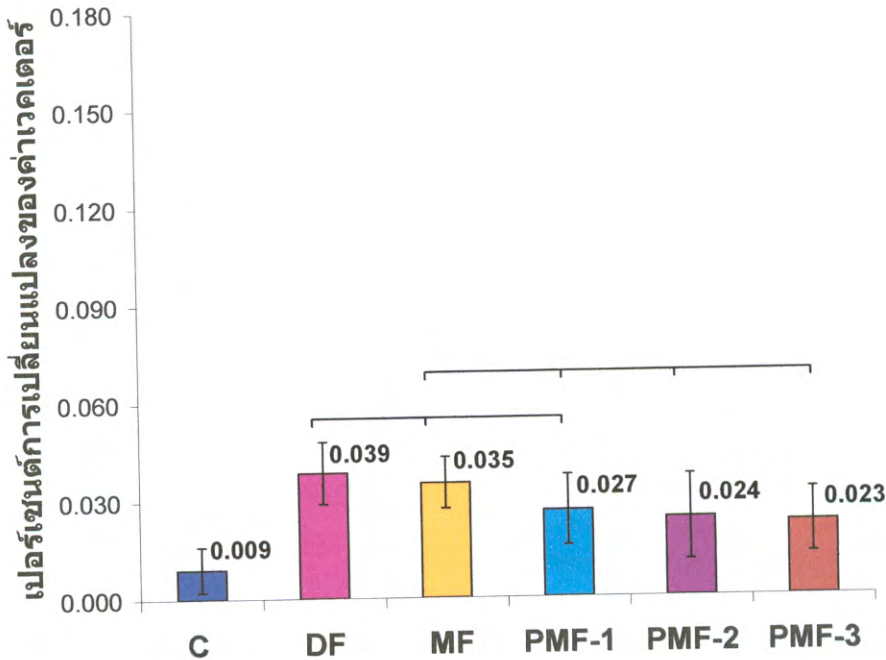


รูปที่ 26 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวคเตอร์ในกลุ่ม PMF-2 ที่เวลาต่างๆ ( — คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

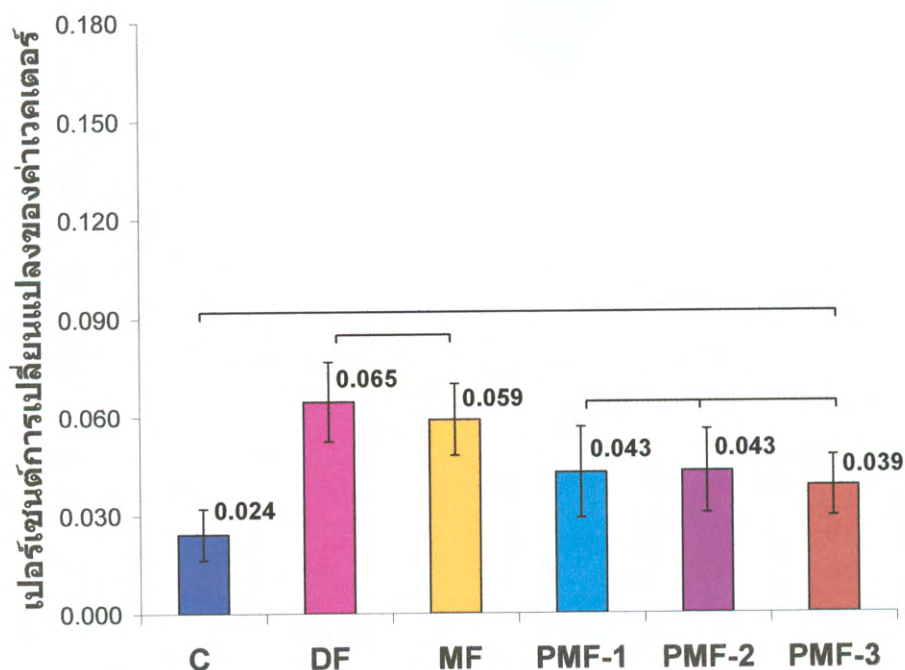


รูปที่ 27 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวคเตอร์ในกลุ่ม PMF-3 ที่เวลาต่างๆ ( — คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

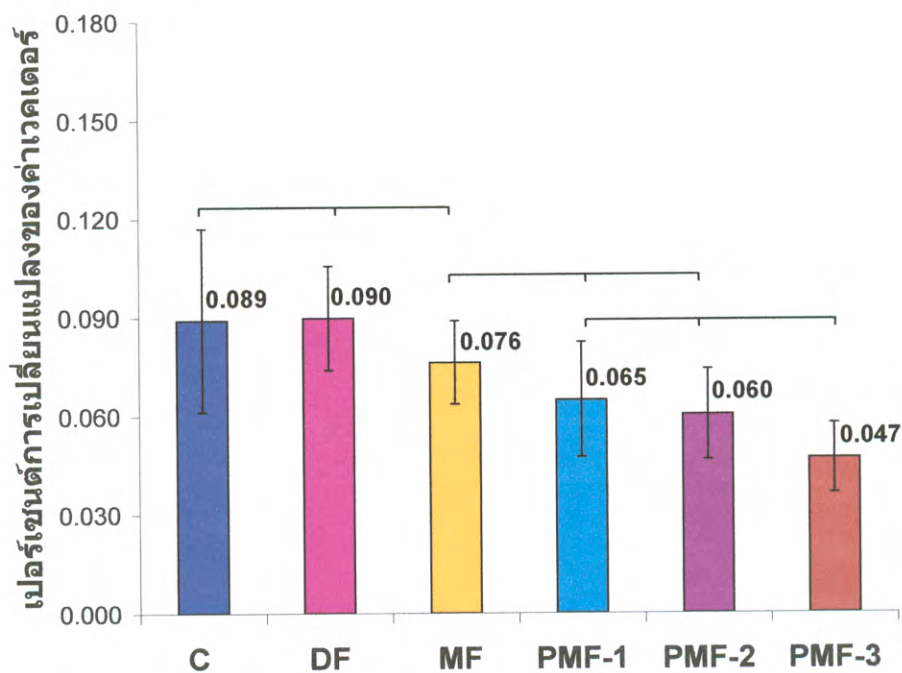
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ในช่วงเวลาเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงมิติระหว่างกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.000$ ) และเมื่อทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบ Tukey HSD พบว่า ในวันที่ 1 กลุ่ม C มีการเปลี่ยนแปลงมิติเกิดขึ้นน้อยกว่ากลุ่มอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) แต่เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 14 กลุ่ม C และ DF มีการเปลี่ยนแปลงมิติเกิดขึ้นมากกว่ากลุ่มอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) และตลอดทั้ง 14 วัน ไม่พบความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงมิติระหว่างกลุ่มที่แช่เส้นใยในสารละลาย พอลิเมอร์-มอนอเมอร์ทั้ง 3 กลุ่ม



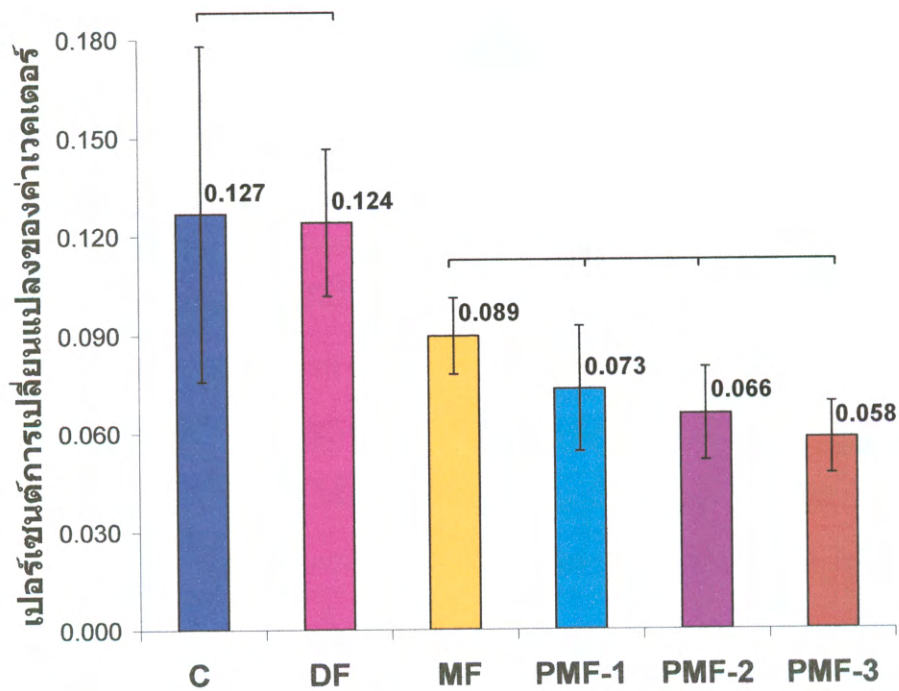
รูปที่ 28 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ระหว่างกลุ่มที่เวลา 1 วัน  
( — คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)



รูปที่ 29 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ระหว่างกลุ่มที่เวลา 2 วัน  
( — ) คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)



รูปที่ 30 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าเวกเตอร์ระหว่างกลุ่มที่เวลา 7 วัน  
( — ) คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)



รูปที่ 31 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าแวกเตอร์ระหว่างกลุ่มที่เวลา 14 วัน  
(  $\square$  คือ ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)