บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ศึกษาผลกระทบของปริมาณและความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

5.1 ความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง ที่ใช้เส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber)

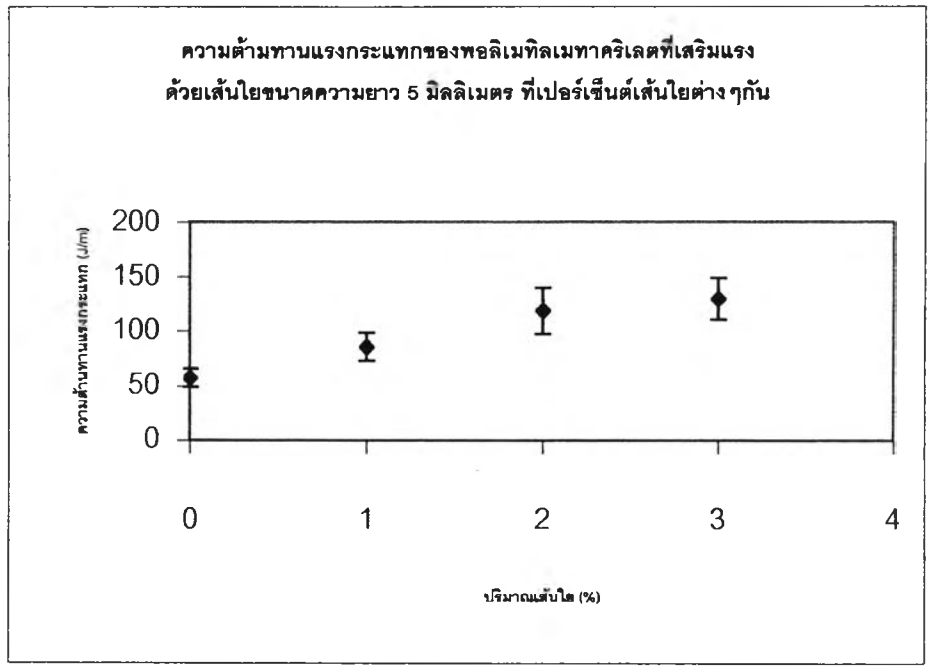
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่ใช้ทำฐานฟันปลอมโดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเป็นพอลิเมอร์โดยการบ่มด้วยความร้อนที่ 70 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและ 90 ^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนผงพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อส่วนเหลวเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) เท่ากับ 35 กรัม ต่อ 14 มิลลิลิตร

จากการวิจัยเพื่อศึกษาผลของความยาวและผลของปริมาณของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ขนาดต่าง ๆ ต่อสมบัติเชิงกลการทนแรงกระแทก ได้ผลดังตารางที่ 5.1

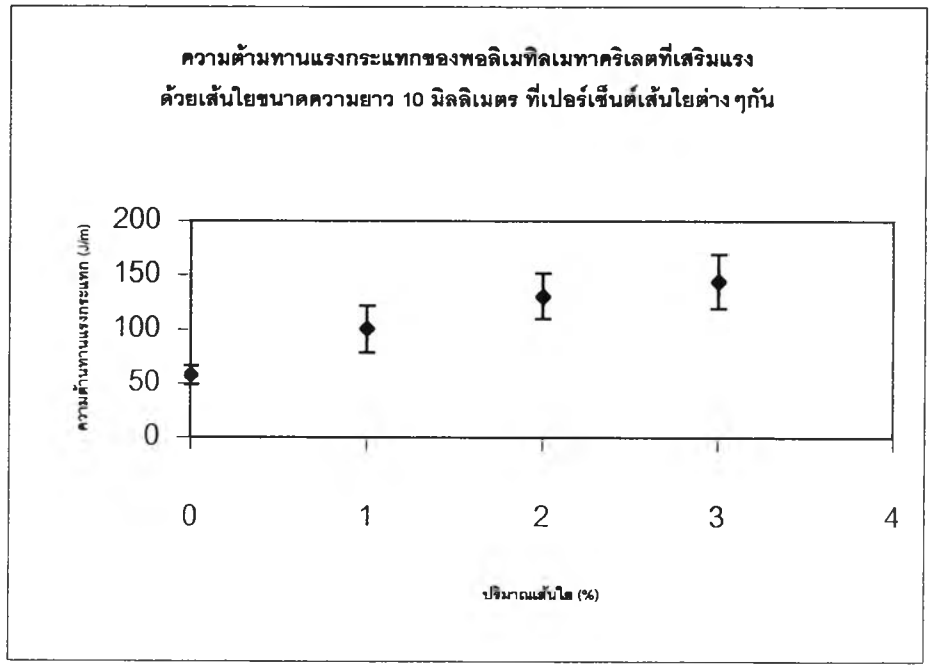
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์กับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ กัน

ความยาวเส้นใย / ปริมาณเส้นใย	ค่าความต้านทานแรงกระแทก (จูล/เมตร)		
	5 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
0 %	57.372 ± 9.8	57.372 ± 9.8	57.372 ± 9.8
1%	85.646 ± 14.2	100.768 ± 24.4	112.73 ±31.2
2%	118.424 ± 24.4	130.602 ± 23.6	135.542 ± 28.6
3%	129.304 ± 21.8	144.13 ± 28.0	150.976 ± 35.8

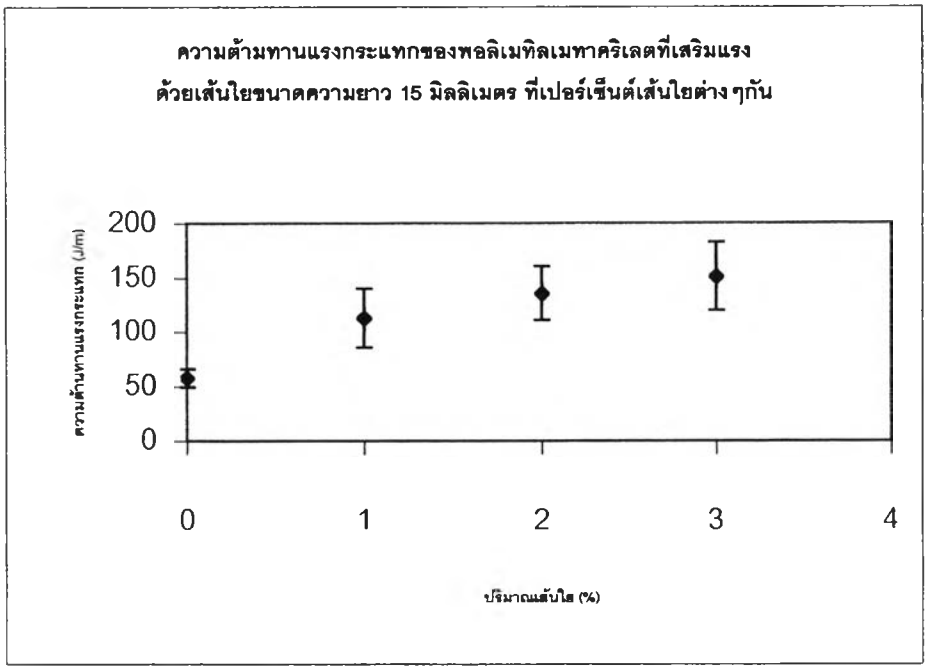
นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 5.1 มาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีผลต่อการทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.3



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด 5 มิลลิเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ กันและพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์

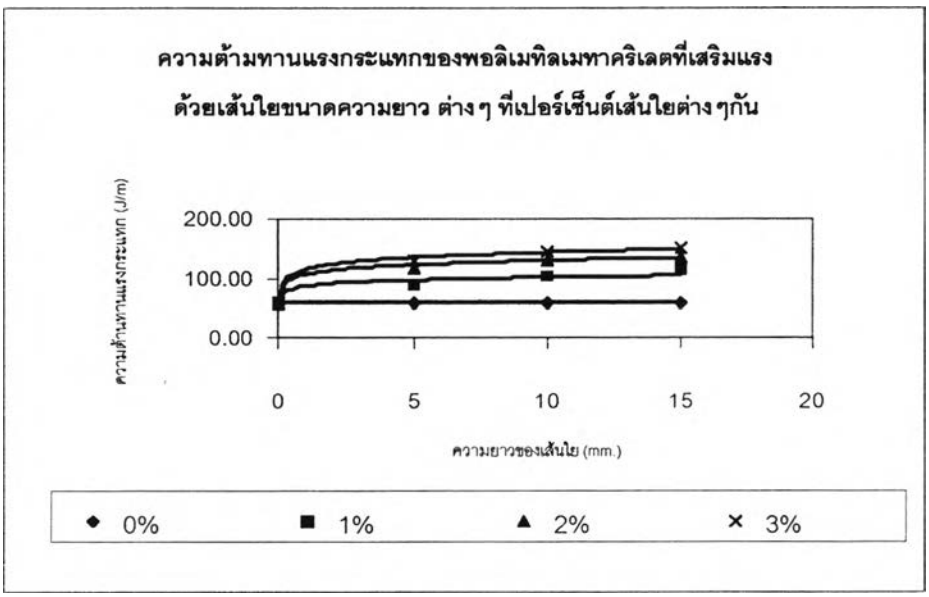


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด 10 มิลลิเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ กันและพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด 15 มิลลิเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ กันและพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์

และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีผลต่อการทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาดต่าง ๆ ที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ กัน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์

จากการวิจัยพบว่าผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ และพบว่าที่เส้นใย 3 % โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มสูงขึ้นกว่า เส้นใย 2 % และ 1 % ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีขนาดยาว 10 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน 1%, 2% และ 3% จะมีความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ 76%, 128% และ 151% ตามลำดับ และยังพบว่า ความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกกล่าวคือ เส้นใยที่มีขนาด 15 มิลลิเมตร ทำให้ พอลิเมทิลเมทาคริเลต มีค่าการทนแรงกระแทกสูงกว่าเส้นใยขนาด 10 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ที่เปอร์เซนต์เส้นใยที่เท่ากัน เช่นที่อัตราการเติมเส้นใย 1 เปอร์เซนต์ เส้นใยที่มีขนาดความยาว 5 มิลลิเมตร, 10 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร จะมีความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ 49%, 76% และ 96% ตามลำดับ.

นอกจากนี้ยังได้ลองเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งโดยเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ในปริมาณมากกว่า 3 % เป็น 4 % และ 5 % โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดปัญหาในขั้นตอนการขึ้นรูป เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากทำให้การผสมกันกับของเหลวมอนอเมอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและพบว่าทำให้เกิดฟองในชิ้นงานมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง

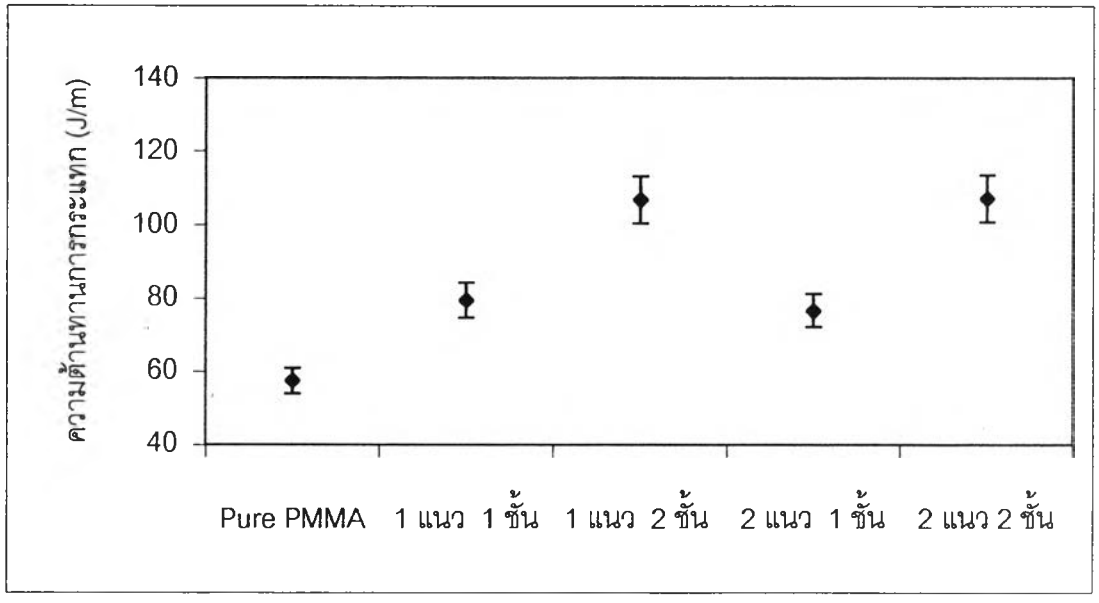
การที่พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถทนต่อแรงกระแทกได้มากกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ สามารถอธิบายได้ว่าเกิดขึ้นจากการที่พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะซึ่งโดยธรรมชาติมันจะแตกหักได้ง่าย ในขณะที่เส้นใยเสริมแรงมีคุณสมบัติแตกหักยากเนื่องมาจากมีความเหนียว [21] และเมื่อรวมกันเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเส้นใยจะทำให้มีการพัฒนาคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกดีขึ้น การเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยจะทำให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่ได้มีความต้านทานการกระแทกได้มากขึ้นในกรณีการใช้เส้นใยที่มีความยาวมากขึ้นจะทำให้เกิดการกระจายแรงภายในชิ้นตัวอย่างตามแนวเส้นใยได้มากขึ้น ดังนั้นการใช้เส้นใยที่มีความยาวมากขึ้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่ได้มีความต้านทานแรงกระแทกได้มากขึ้นด้วย

5.2 ศึกษาผลของการเรียงตัวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ (เส้นใยยาว) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์จัดเรียงตัวแบบต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีเส้นใยจัดเรียงตัวแบบต่าง ๆ

การจัดเรียงตัวของเส้นใย	ค่าความต้านทานแรงกระแทก (จูล/เมตร)
พอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์	57.37
วางเส้นใยตามแนวยาว 1 ชั้น	79.5
วางเส้นใยตามแนวยาว 2 ชั้น	106.77
วางเส้นใยตั้งฉากกันในแนวนอน 1 ชั้น	76.73
วางเส้นใยตั้งฉากกันในแนวนอน 2 ชั้น	107.14



รูปที่ 5.5 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีเส้นใยจัดเรียงตัวแบบต่าง ๆ

จากการวิจัยพบว่า การจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวยาว 1 ชั้นจะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกันกับการจัดเรียงเส้นใยตามแนวนอนตั้งฉากกัน 1 ชั้น กล่าวคือค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ 39% และ 34% ตามลำดับ แต่ความต้านทานแรงกระแทกที่ได้จะน้อยกว่ากรณีที่เพิ่มการจัดเรียงตัวเป็น 2 ชั้น.

อย่างไรก็ตาม การจัดเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาว 2 ชั้น และการจัดเรียงตัวในแนวยาวและแนวขวางตั้งฉากกัน 2 ชั้น จะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ 86% และ 87% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยทั้ง 1 ชั้น และ 2 ชั้น จะมีค่าสูงกว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ใช้เส้นใยเสริมแรง

ที่เป็นเช่นนี้ เพราะโดยธรรมชาติ พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นวัสดุแข็งแต่เปราะ ทำให้แตกหักง่าย ส่วนเส้นใยเสริมแรง จะมีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี เมื่อนำมาเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง จะทำให้เพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งสามารถทนแรงกระแทกได้มากกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลต เนื่องจากแรงที่ชิ้นงานทดสอบได้รับ จะถูกกระจายไปยังเส้นใยเสริมแรงที่อยู่ภายในชิ้นงาน ทำให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าจากการทดสอบ พบว่า การจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวยาว 1 ชั้นจะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกันกับการจัดเรียงเส้นใยตามแนวนอนตั้งฉากกัน 1 ชั้น อาจเกิดจากการวางเส้นใยในแนวขวางจะไม่มีส่วนในการรับแรง จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ถ้าเพิ่มการจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็น 2 ชั้น จะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่มากกว่า เพราะปริมาณเส้นใยที่ช่วยรับแรงมีมากขึ้น จึงทำให้ทนแรงกระแทกได้สูงขึ้น [25].

5.3 การทนการดัดโค้ง (Flexural Strength)

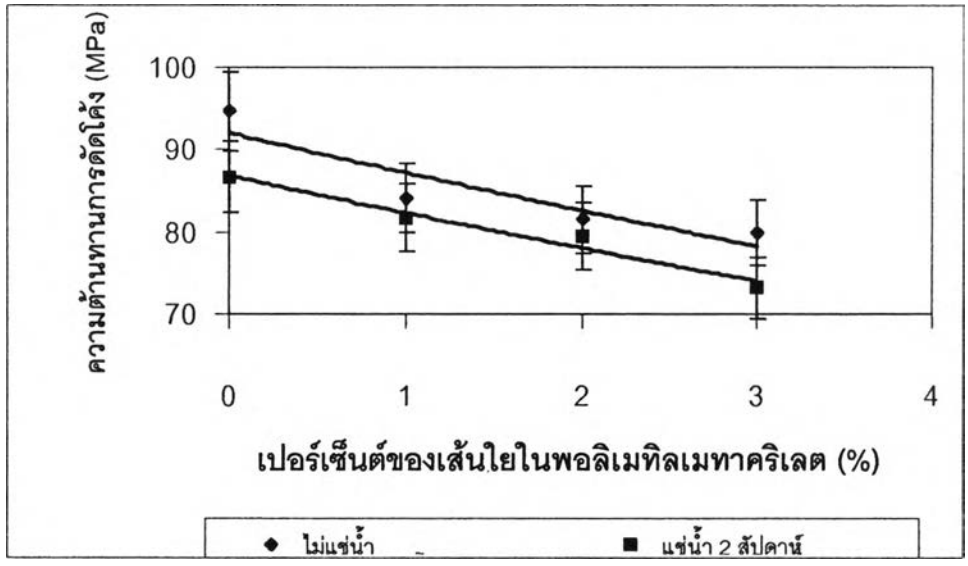
ในการใช้งานผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพบว่ามีโอกาสที่ผลิตภัณฑ์จะต้องสัมผัสกับน้ำและของเหลวที่มีองค์ประกอบของน้ำอีกทั้งตัวผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเองมีความสามารถในการดูดซับความชื้น ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อค่าการทนต่อแรงตัดขวาง

จากการศึกษาการทนต่อการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ เทียบกับสารพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

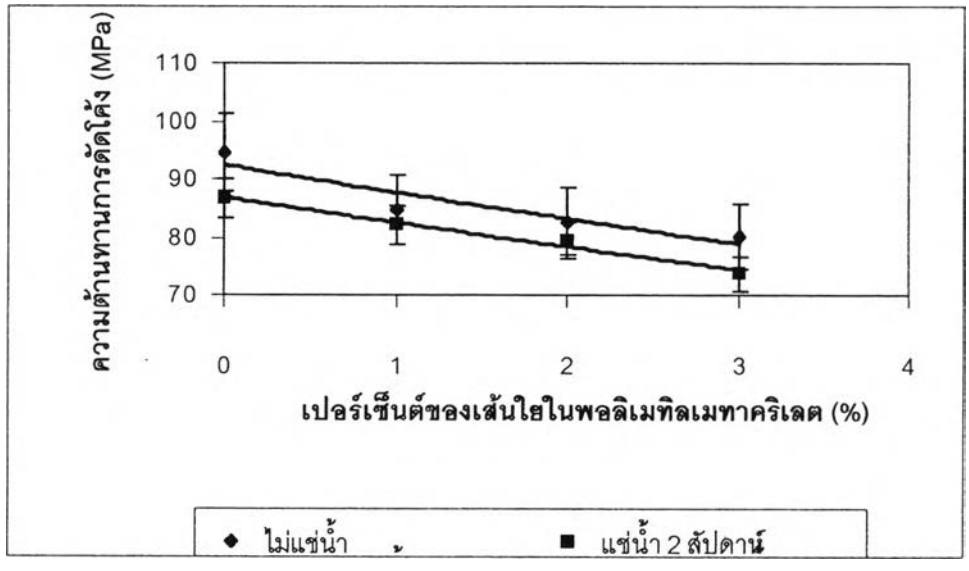
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความต้านทานการดัดโค้งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์กับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ กัน

ความยาวเส้นใย / ปริมาณเส้นใย	ค่าความต้านทานการดัดโค้ง (เมกกะปาสคาล)					
	5 มิลลิเมตร		10 มิลลิเมตร		15 มิลลิเมตร	
	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ
0 %	94.67	86.70	94.67	86.70	94.67	86.70
1%	84.10	81.74	84.77	82.22	85.25	81.14
2%	81.60	79.54	82.65	79.34	83.80	79.33
3%	79.84	73.21	80.08	73.83	80.80	73.38

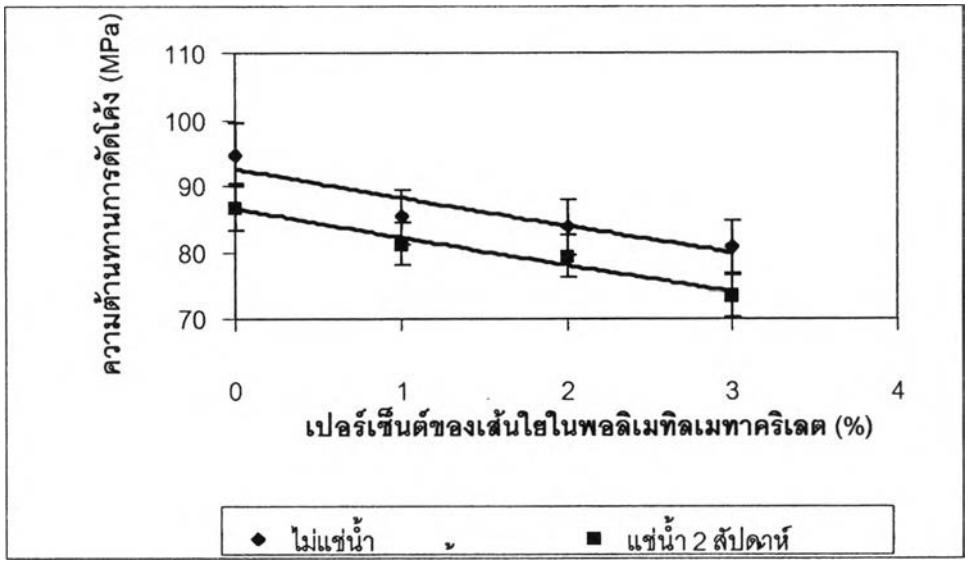
นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 5.2 มาเขียนกราฟ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่มีผลต่อการทนการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.9



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดัดโค้งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด 5 มิลลิเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ กัน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์



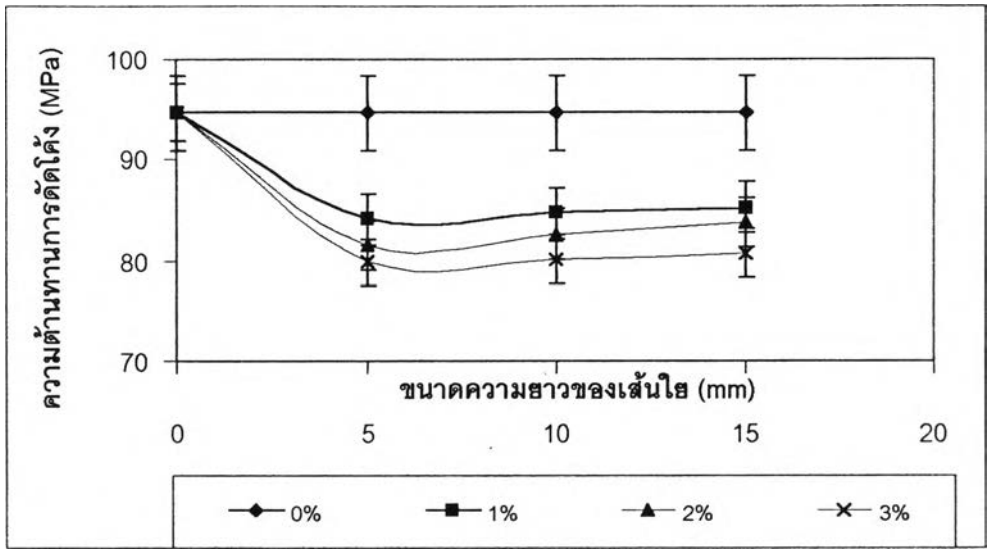
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดัดโค้งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด 10 มิลลิเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ กัน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์



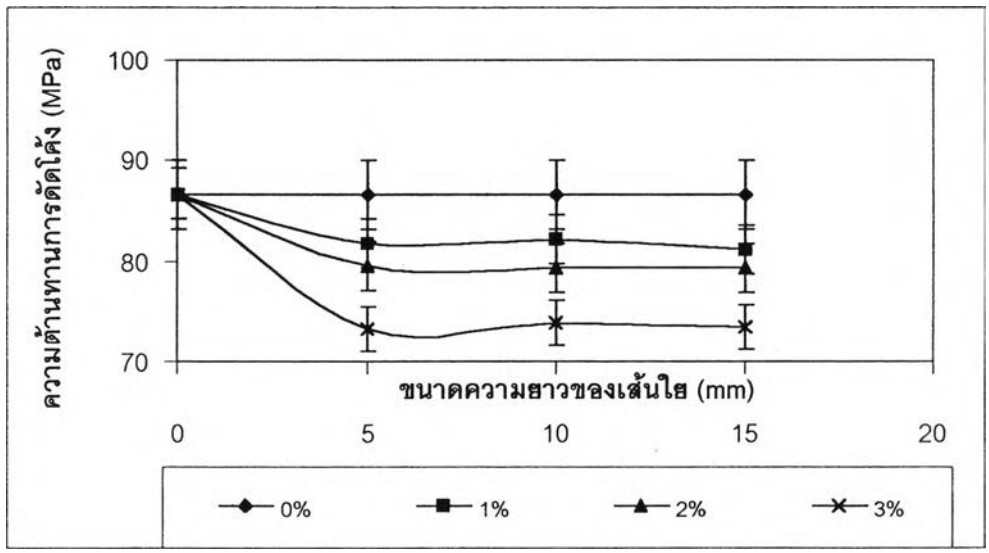
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดัดโค้งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด 15 มิลลิเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ กัน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์

และนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 5.3 มาเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีผลต่อการทนการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปริมาณต่าง ๆ กัน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11

จากผลการศึกษาวิจัย พบว่าปริมาณเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่เติมลงในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) มีผลทำให้ค่าการทนการดัดโค้ง (Flexural Strength) ลดลงต่ำกว่ากรณีไม่เติมเส้นใย โดยปริมาณเส้นใย 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural Resistance) มากกว่า 2 % และ 3 % ตามลำดับ เช่น ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาดความยาว 10 มิลลิเมตรที่อัตราส่วน 1%, 2% และ 3% โดยชิ้นงานผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 14 วัน มีค่าลดลง 5%, 8% และ 15% ตามลำดับ ส่วนในกรณีของความยาวเส้นใยเปลี่ยนแปลง 5,10 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ปริมาณการใส่เส้นใยเท่ากัน (%) จะทำให้ผลไม่แตกต่างกันมากนักเช่นที่เปอร์เซนต์เส้นใย 3% ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลง 15% สำหรับทุก ๆ ความยาวของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 5.7-5.9 และรูปที่ 5-10



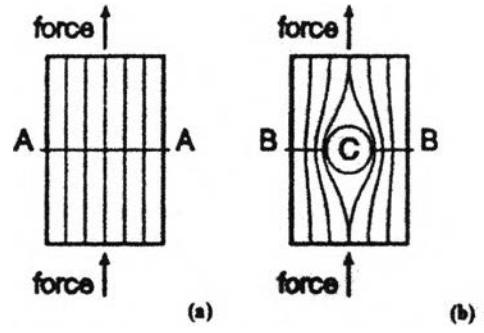
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดัดโค้งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาดต่าง ๆ ที่ปริมาณเส้นใย 1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนัก และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ โดยชิ้นงานทดสอบไม่แช่น้ำ



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดัดโค้งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขนาดต่าง ๆ ที่ปริมาณเส้นใย 1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนัก และพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ โดยชิ้นงานทดสอบแช่น้ำเป็นเวลา 14 วัน

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา การทนการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่ผ่านการแช่น้ำ 2 สัปดาห์ พบว่า เมื่อแช่น้ำแล้ว จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งลดลง ดังกราฟรูปที่ 5.7-5.9 และรูปที่ 5.11

จากการทดลอง การที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งมีค่าความต้านทานการดัดโค้งที่ต่ำกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์อาจมีสาเหตุมาจากการที่ผิวสัมผัสของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตและเส้นใยเสริมแรงเกิดขึ้นไม่ดี ทำให้การส่งผ่านแรงจากเนื้อเมตริกซ์ไปยังเส้นใยเกิดขึ้นน้อยหรืออาจไม่เกิดขึ้นเลย [26] แสดงดังรูป 5-12



รูปที่ 5-12 การส่งผ่านแรงระหว่างเมตริกซ์ไปยังเส้นใยเสริมแรง [26]
(a) การส่งผ่านแรงภายในเนื้อเมตริกซ์
(b) การส่งผ่านแรงภายในเนื้อเมตริกซ์เมื่อมีเส้นใยเสริมแรงที่เกิดการยึดเกาะทางกายภาพโดยไม่มีแรงทางไฟฟ้าหรือแรงทางเคมีเกี่ยวข้อง

ดังนั้น เส้นใยเสริมแรงที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอาจเปรียบเสมือนช่องว่างที่อยู่ในเนื้อเมตริกซ์ทำให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งต่ำกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ [21,26].

เมื่อนำชิ้นงานทดสอบแช่น้ำเป็นเวลา 2 สัปดาห์แล้วนำมาวัดค่าความต้านทานการดัดโค้ง พบว่าค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานทดสอบมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้แช่น้ำ ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดความชื้นได้ประมาณ 2 เปอร์เซนต์ ความชื้นที่ซึมผ่านเข้าไปอาจส่งผลทำให้การยึดเกาะที่ผิวสัมผัสของเส้นใยกับเมตริกซ์เสียไป จึงส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อการดัดโค้งมีค่าลดลงเป็นลำดับ [25].

5.4 อิทธิพลของการปรับแต่งผิวของเส้นใยเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง

ในงานวิจัยนี้ เราพบว่าเมื่อเติมเส้นใยเสริมแรงพอลิเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ทนการดัดโค้งลดลง ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการยึดเกาะที่ผิวสัมผัสของเส้นใยกับเมตริกซ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการปรับแต่งผิวของเส้นใยเสริมแรง โดยแช่เส้นใยเสริมแรงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล เป็นเวลา 5 ถึง 20 นาที เพื่อปรับแต่งผิวของเส้นใยเสริมแรงให้มีความหยาบมากขึ้น ดังรูปที่ 5-17 และนำเส้นใยที่ผ่านการปรับแต่งผิวแล้วมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงเพื่อหาค่าความต้านทานการดัดโค้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5

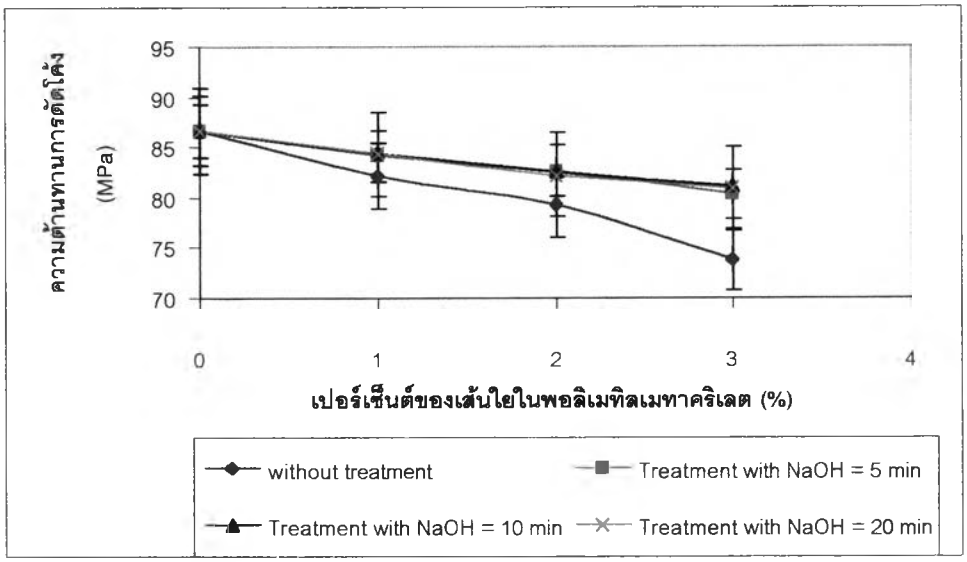
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต กับเส้นใยที่ผ่านการเตรียมผิวที่เวลาต่าง ๆ กัน (ความยาวเส้นใย = 10 มิลลิเมตร)

เวลาที่ใช้ในการเตรียมผิวเส้นใย (นาที) / ปริมาณเส้นใย(%)	ค่าความต้านทานการดัดโค้ง (MPa)			
	0	5	10	20
0	86.7	86.7	86.7	86.7
1	82.2	84.2	84.4	84.3
2	79.3	82.7	82.6	82.2
3	73.8	80.4	81.1	80.9

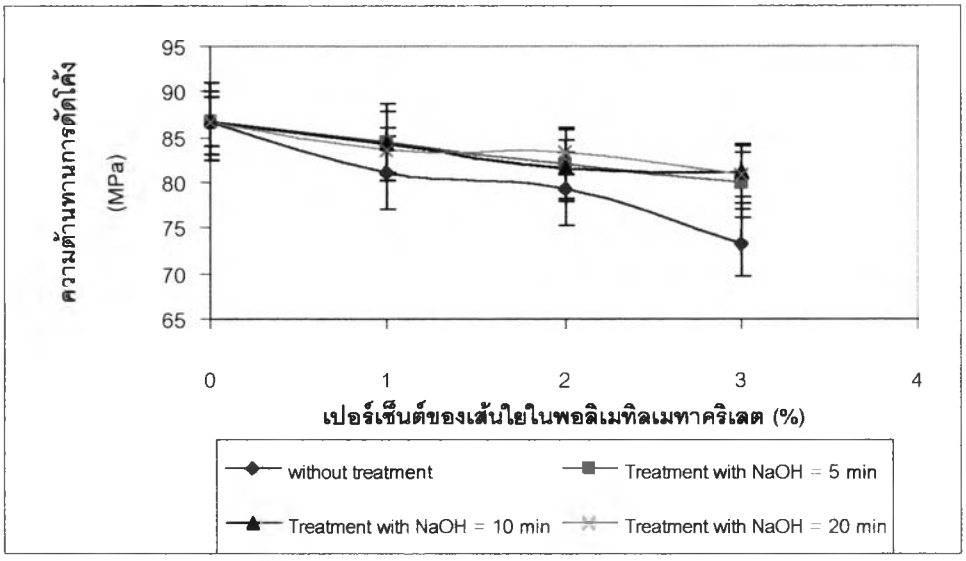
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต กับเส้นใยที่ผ่านการเตรียมผิวที่เวลาต่าง ๆ กัน (ความยาวเส้นใย = 15 มิลลิเมตร)

เวลาที่ใช้ในการเตรียมผิวเส้นใย (นาที) / ปริมาณเส้นใย(%)	ค่าความต้านทานการดัดโค้ง (MPa)			
	0	5	10	20
0	86.7	86.7	86.7	86.7
1	81.1	84.4	84.3	83.6
2	79.3	82.0	81.5	83.3
3	73.4	80.1	81.1	80.9

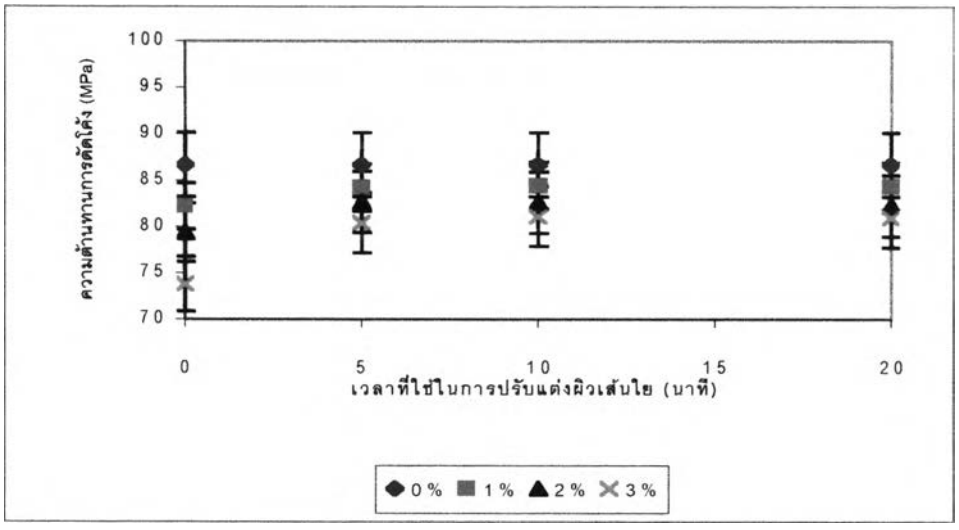
นำข้อมูลที่ได้ จากตารางที่ 5.4 และ 5.5 ไปเขียนกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง ได้ดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.16



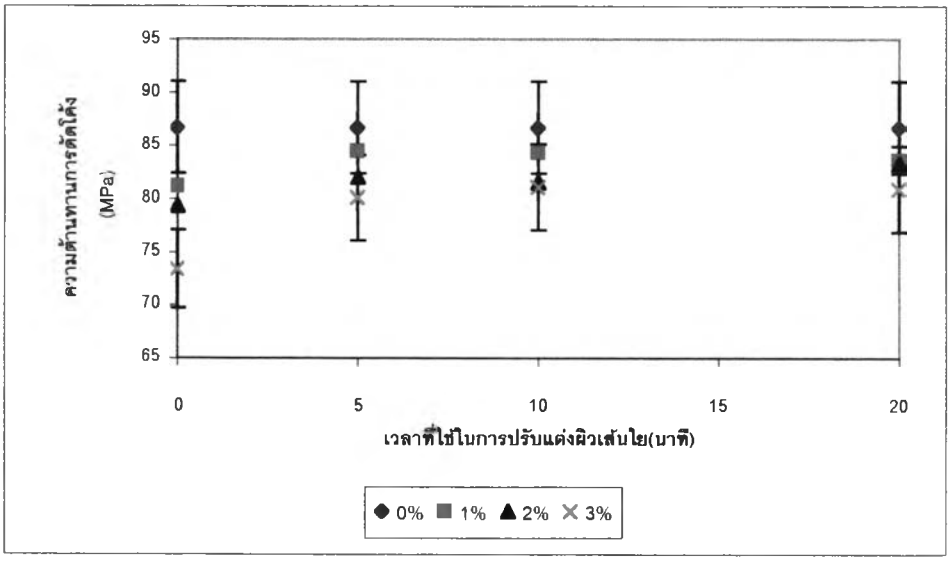
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการดัดโค้งที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ กัน และเส้นใยที่ผ่านการเตรียมผิวที่ 5,10 และ 20 นาที (ความยาวเส้นใย = 10 มิลลิเมตร)



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการดัดโค้งที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ กัน และเส้นใยที่ผ่านการเตรียมผิวที่ 5,10 และ 20 นาที (ความยาวเส้นใย = 15 มิลลิเมตร)



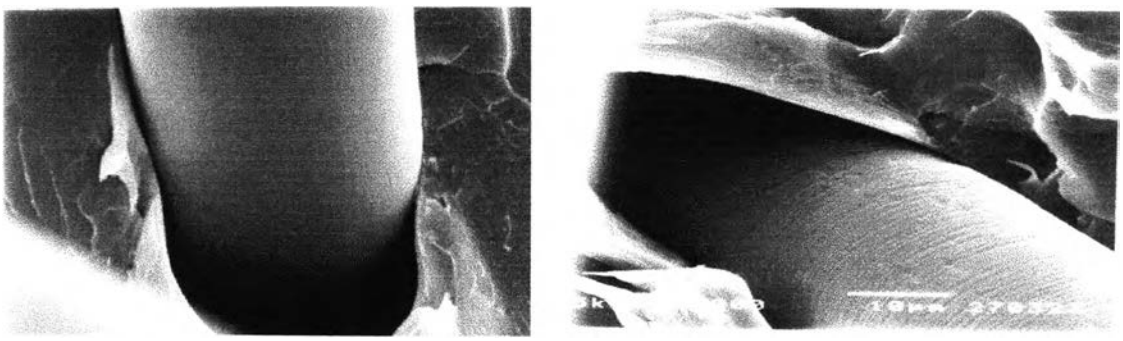
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการดัดโค้ง กับ เวลาที่ใช้ในการปรับแต่งผิวเส้นใยต่าง ๆ กัน (ความยาวเส้นใย = 10 มิลลิเมตร)



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการดัดโค้ง กับ เวลาที่ใช้ในการปรับแต่งผิวเส้นใยต่าง ๆ กัน (ความยาวเส้นใย = 15 มิลลิเมตร)

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าเส้นใยที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล จะมีค่าความต้านทานการดัดโค้งสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับแต่งผิวเส้นใย เช่น เส้นใยขนาดความยาว 10 มิลลิเมตรปริมาณ 3 %ที่ผ่านการปรับแต่งผิวเป็นเวลา 10 นาที จะส่งผลทำให้ความต้านทานการดัดโค้งลดลงจาก 15% เหลือ 7% แต่ช่วงเวลาที่เลือกใช้ในการปรับแต่งผิวเส้นใยไม่มีผลต่อค่าความต้านทานการดัดโค้ง เช่น เส้นใยขนาดความยาว 10 มิลลิเมตร ปริมาณ 3 % ที่ผ่านการปรับแต่งผิวเป็นเวลา 5, 10 และ 20 นาที จะมีค่าความต้านทานการดัดโค้งลดลงประมาณ 7 % เท่ากัน.

เมื่อทดลองปรับแต่งผิวของเส้นใยเสริมแรงเพื่อให้มีความขรุขระที่ผิวมากขึ้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล ดังรูปที่ 5-17 แล้วนำเส้นใยเสริมแรงที่ผ่านการปรับแต่งผิวแล้วมาใช้ พบว่า ความต้านทานการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่นำเส้นใยที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับแต่งผิวมาใช้ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการปรับแต่งผิวของเส้นใยส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยกับเมตริกซ์ดีขึ้น [21] .



(ก) เส้นใยที่ไม่ปรับแต่งผิว (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

(ข) เส้นใยที่ปรับแต่งผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

รูปที่ 5.17 สภาพผิวของเส้นใยที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับแต่งผิว

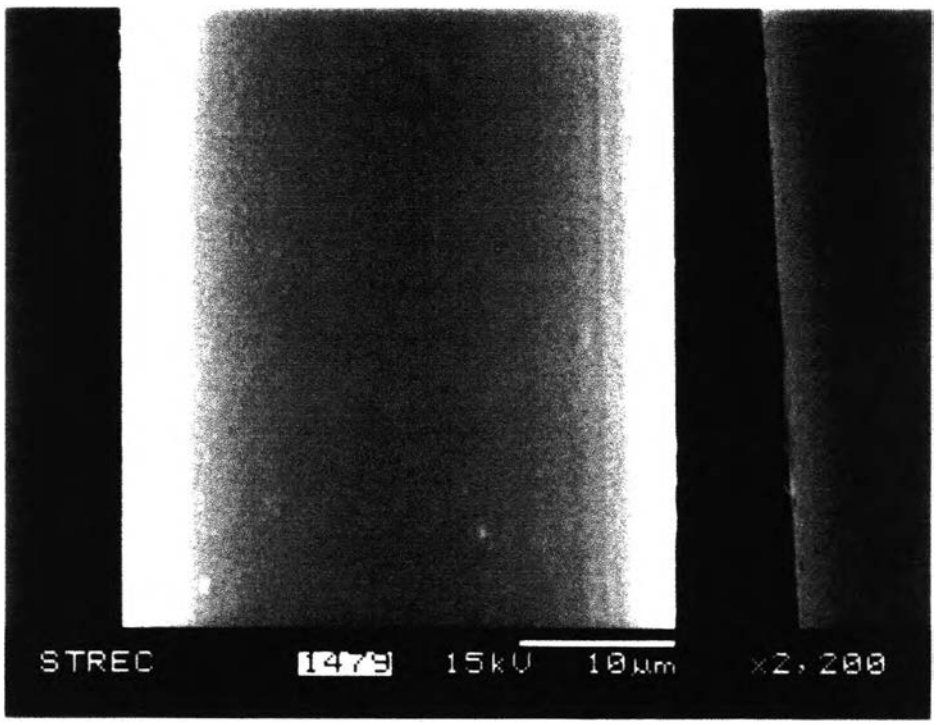
5.5 การศึกษาการทนแรงภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดของชิ้นงานทดสอบ

จากวิธีการทดสอบดังข้อ 4.7 เมื่อนำชิ้นงานทดสอบไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่ใช้เส้นใยเสริมแรงมีความล้าในชิ้นงานมากที่สุด ส่วนชิ้นงานทดสอบที่ใช้เส้นใยเสริมแรงพอลิเอสเทอร์จะมีความล้าน้อยกว่า กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่เสริมแรงด้วยเส้นใยยาว 5 , 10 และ 15 มิลลิเมตรที่ปริมาณ 1 , 2 และ 3 เปอร์เซ็นต์ จะมีความล้าลดลง เมื่อเทียบที่เปอร์เซนต์เดียวกัน ความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความล้าลดลงเป็นลำดับ ในทำนองเดียวกัน เมื่อเทียบที่ความยาวเส้นใยที่เท่ากัน การเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรงในชิ้นงานทดสอบจะทำให้ความล้ามีค่าลดลงเช่นกัน ดังนั้นชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ยาว 15 มิลลิเมตรในปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ จึงแทบจะไม่พบความล้าในชิ้นงานทดสอบเลย

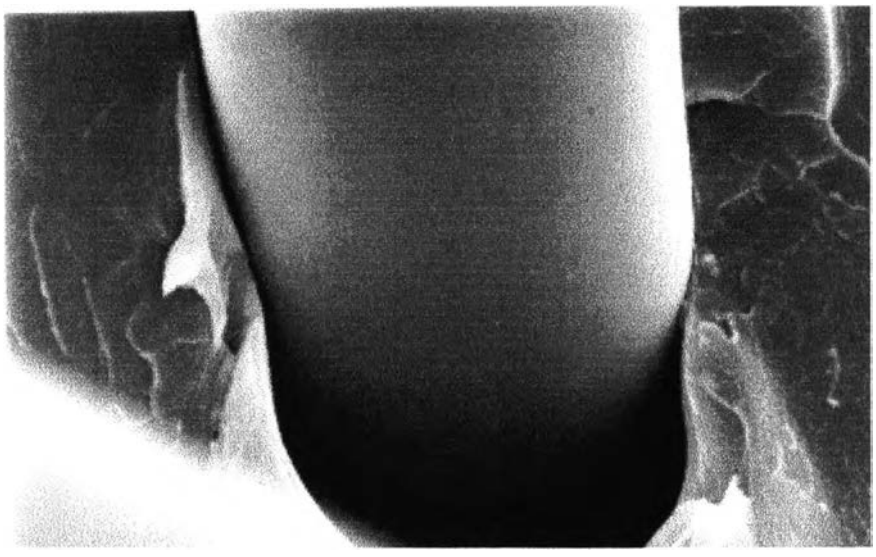
ผลการทดสอบที่เกิดขึ้น อาจเกิดจากการที่พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นต่ำเมื่อได้รับแรงเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดความล้าขึ้นในชิ้นงานทดสอบได้ง่าย ส่วนเส้นใยเสริมแรงจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อนำมาใช้เสริมแรงในพอลิเมทิลเมทาคริเลตจึงทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงรับแรงได้มากขึ้น ความล้าที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจึงลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเสริมแรงมากขึ้น ส่วนขนาดความยาวของเส้นใยที่ยาวกว่า จะมีผลของ end effect ที่น้อยกว่าเส้นใยสั้น [21] ดังนั้นในชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นใยเสริมแรงที่ยาวกว่าจะสามารถรับแรงได้มากกว่าชิ้นงานทดสอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

5.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของรอยแตกที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง

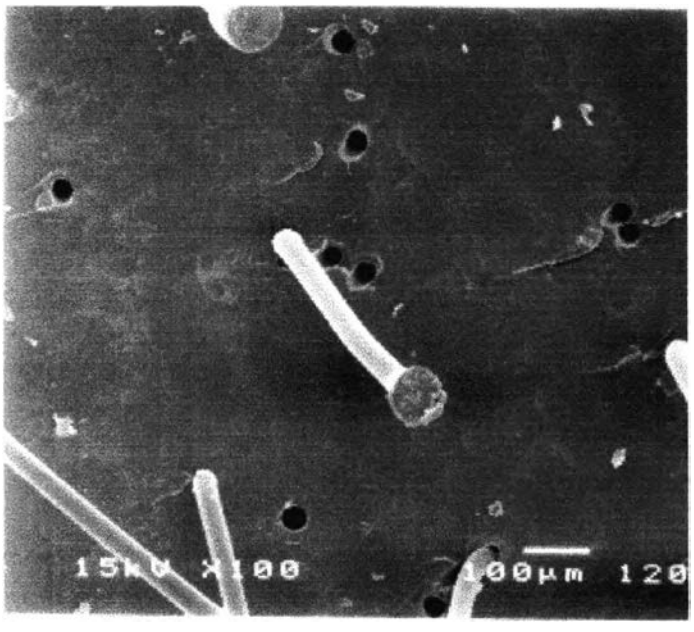
ก. เมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบแล้วมาตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน พบว่าชิ้นงานทดสอบการทนแรงกระแทกจะเห็นเส้นใยเสริมแรงรูดออกจากเนื้อเมตริกซ์พอลิเมทิลเมทาคริเลตดังรูปที่ 5.18 ถึง 5.22 และเมื่อใช้กำลังขยายมากขึ้น ดูที่ผิวของเส้นใยจะเห็นผิวของเส้นใยเสริมแรงเรียบเป็นปกติ เหมือนกับผิวของเส้นใยก่อนที่จะนำมาเป็นเส้นใยเสริมแรง แสดงว่าการยึดเกาะที่ผิวของเส้นใยเสริมแรงและเนื้อเมตริกซ์ไม่เกิดการยึดเกาะเชิงเคมีขึ้น เพราะจากโครงสร้างของเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตไม่มีหมู่ฟังก์ชั่นที่จะเกิดปฏิกิริยากันได้.



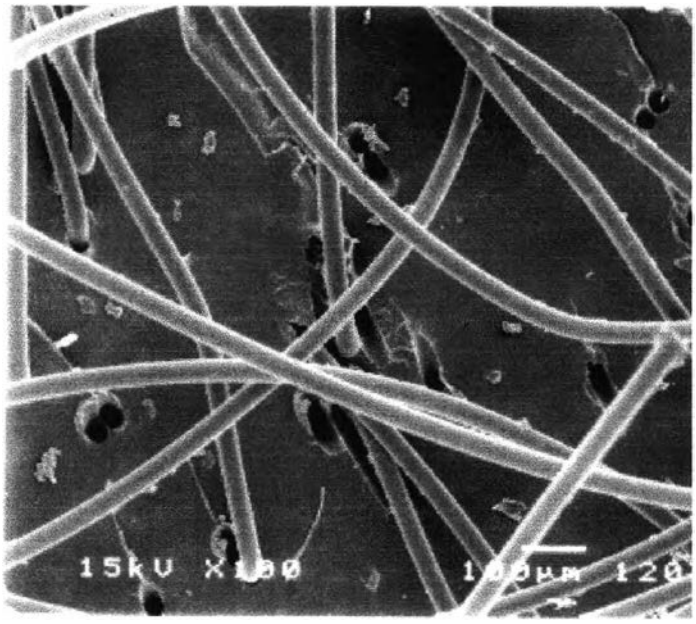
รูปที่ 5-18 เส้นใยก่อนการปรับแต่งผิว



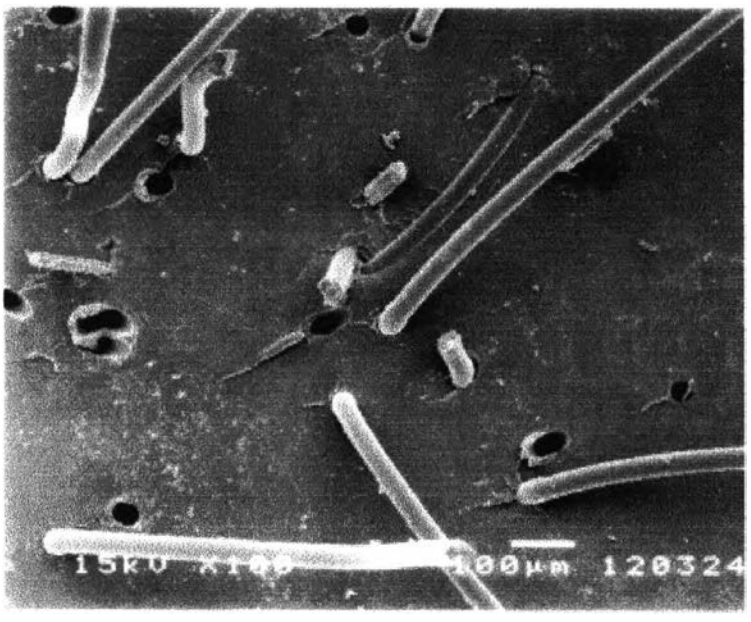
รูปที่ 5.19 รูปขยายผิวของเส้นใยที่หลุดออกจากเนื้อเมตริกซ์
(กำลังขยาย 2,000 เท่า)



รูปที่ 5.20 ภาพถ่าย SEM ของสารประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ขนาด 5 มิลลิเมตร ที่ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

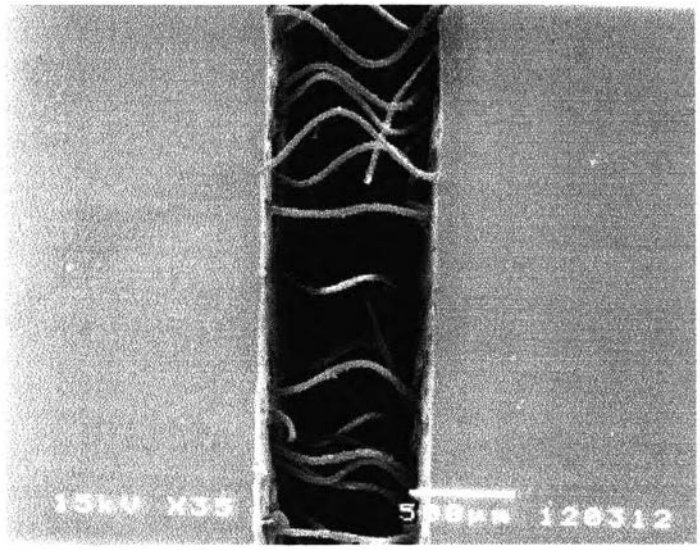


รูปที่ 5.21 ภาพถ่าย SEM ของสารประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ขนาด 10 มิลลิเมตร ที่ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

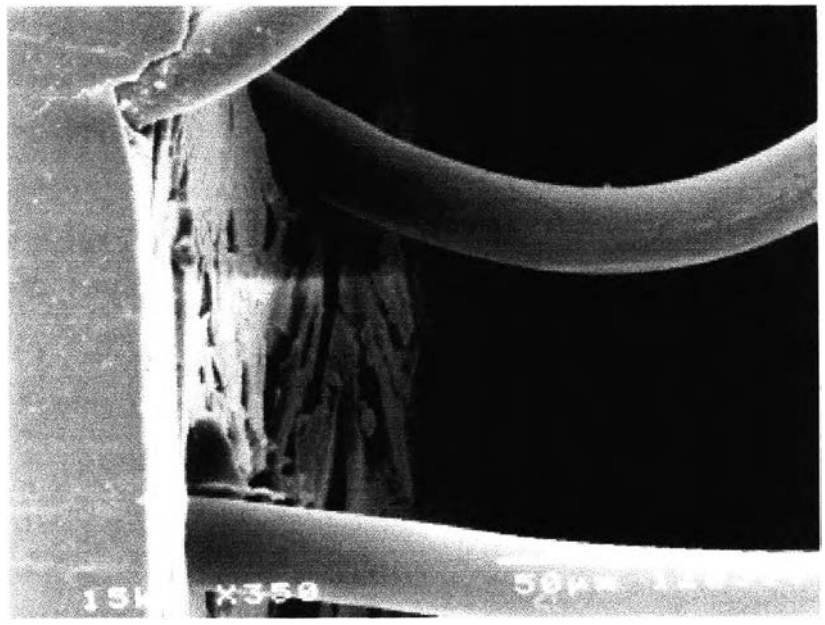


รูปที่ 5.22 ภาพถ่าย SEM ของสารประกอบแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ขนาด 15 มิลลิเมตร ที่ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

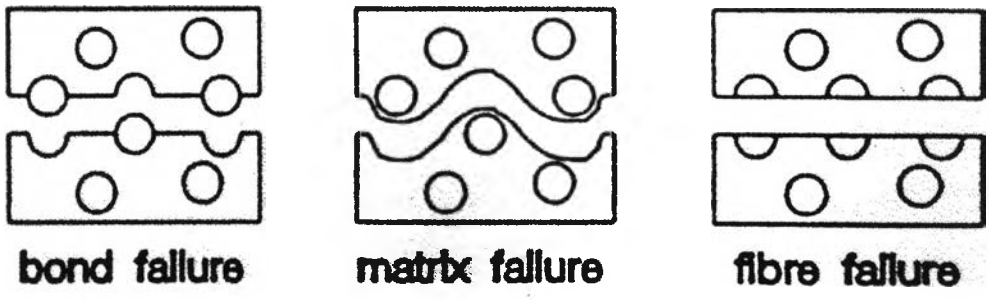
ข. สำหรับการทดสอบการทนการโค้งงอ จะเห็นลักษณะดังรูป 5.23 และ 5.24 จากการตรวจสอบบริเวณรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน พบว่ามีลักษณะเหมือนเกิดการแตกเนื่องจากความล้มเหลวในการยึดติด (Bond Failure) ดังรูปที่ 5.25(a) เมื่อเพิ่มกำลังขยายสูงขึ้นที่ผิวของเส้นใยเสริมแรงจะเห็นเป็นลักษณะเรียบ, ไม่มีเนื้อเมตริกซ์เกาะอยู่ แสดงว่าไม่เกิดการยึดเกาะเชิงเคมีขึ้น



รูปที่ 5.23 ภาพถ่าย SEM บริเวณชิ้นงานที่หักเมื่อทดสอบการทนการดัดโค้ง



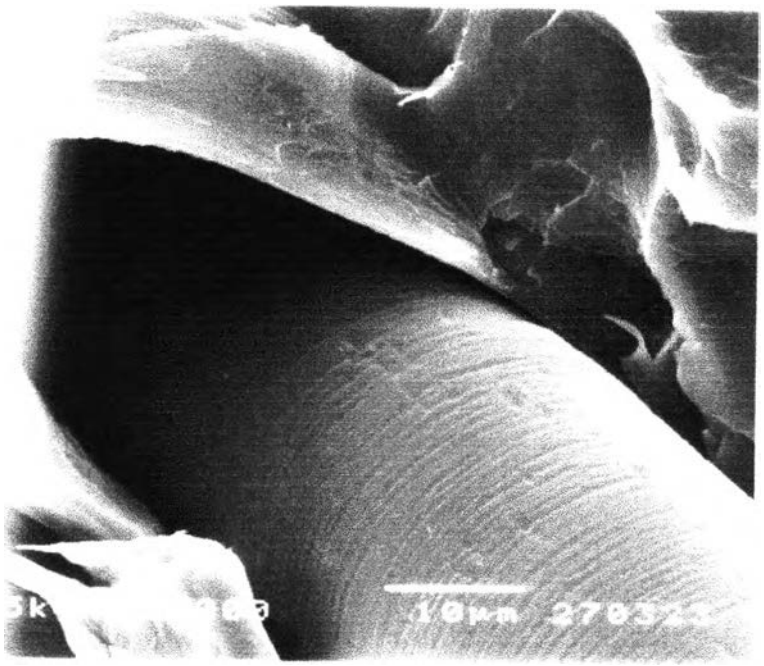
รูปที่ 5.24 รูปขยายภาพถ่าย SEM บริเวณชิ้นงานที่หักเมื่อทดสอบการทนการดัดโค้ง



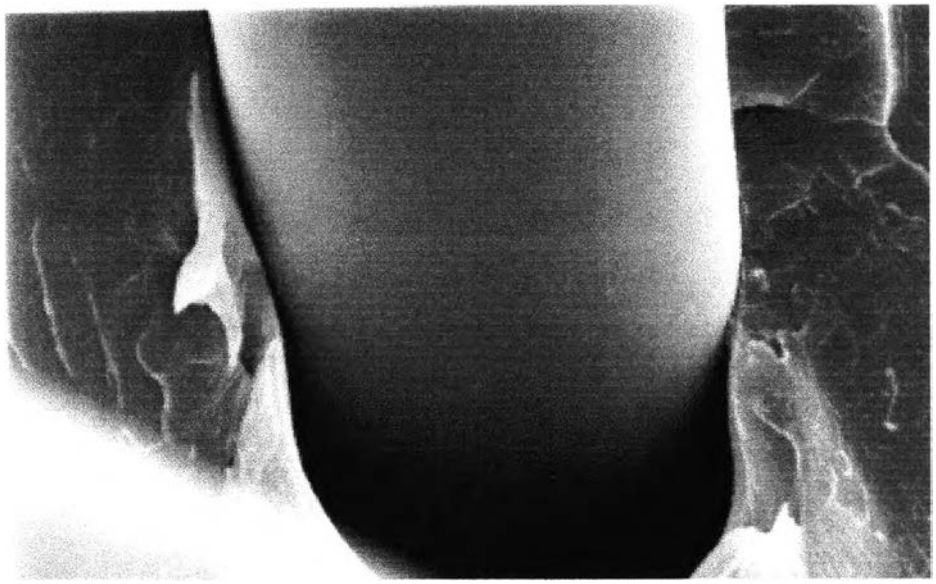
รูปที่ 5.25 ลักษณะการแตกหักของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งเมื่อทดสอบการทนการดัดโค้ง[26]

ค. การยึดเกาะของเส้นใยที่ผ่านการปรับแต่งผิว [16]

นำชิ้นงานทดสอบที่ใช้เส้นใยเสริมแรงที่ผ่านการปรับแต่งผิว ที่ผ่านการทดสอบแล้วมาดูบริเวณรอยแตกของชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 5.26 จะเห็นว่าที่ผิวของเส้นใยเสริมแรงพอลิเอสเทอร์จะมีความหยาบมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการปรับแต่งผิว ดังรูป 5.27 อย่างไรก็ตามจากรูปไม้พบเนื้อเมตริกซ์พอลิเมทิลเมทาคริเลตเกาะที่ผิวของเส้นใยเลย แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะปรับแต่งผิวของเส้นใยเสริมแรงโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลแล้ว ก็ยังไม่ช่วยให้เกิดการยึดเกาะทางเคมีขึ้น แต่ความหยาบที่เพิ่มมากขึ้นก็น่าจะยังช่วยให้เกิดการยึดเกาะเชิงกลที่ดีขึ้น [25].



รูปที่ 5.26 ภาพถ่าย SEM ผิวเส้นใยที่ผ่านการปรับแต่งผิว
ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล
(กำลังขยาย 2,000 เท่า)



รูปที่ 5.27 ภาพถ่าย SEM ผิวเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการปรับแต่งผิว
(กำลังขยาย 2,000 เท่า)