

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ก. การทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง

ค่าแรงที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกหัก (นิวตัน) ค่าความกว้างและความหนาของชิ้นตัวอย่าง (มม) ค่าความแข็งแรงดัดขวาง (เมกะปาสคาล) รวมทั้งค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม แสดงในตารางที่ 2 และ 3

เมื่อทดสอบข้อมูลค่าความแข็งแรงดัดขวางที่คำนวณด้วยสถิติทดสอบโคโมโกรอฟ สเมอร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ($p=0.20$, ตารางที่ 4) แต่เมื่อทดสอบค่าความแปรปรวนของแต่ละชุดข้อมูลด้วยสถิติทดสอบของเลอวิน (Levene Statistic) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า มีค่าแตกต่างกัน ($p<0.05$, ตารางที่ 5) จึงพิจารณาใช้สถิติทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ร่วมกับสถิติทดสอบการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของดันเนตต์ (Dunnett's multiple comparison) ที่ระดับความนัยสำคัญ 0.05

จากการทดลอง พบว่า ความความแข็งแรงดัดขวางที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 83.87-105.17 เมกะปาสคาล โดยกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมร่วมกับการปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลน (กลุ่มที่ 3) มีค่าความแข็งแรงดัดขวางเฉลี่ยสูงสุด (104.17 ± 9.70 เมกะปาสคาล) รองลงมาได้แก่ กลุ่มควบคุม (84.90 ± 6.83 เมกะปาสคาล) กลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางพันธุกรรม (83.87 ± 16.05 เมกะปาสคาล) และกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมโดยไม่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (65.27 ± 5.45 เมกะปาสคาล) ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่าความความแข็งแรงดัดขวางที่คำนวณได้ด้วยสถิติทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ที่ระดับความนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ค่าความแข็งแรงดัดขวางของแต่ละกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p=0.00$, ตารางที่ 6)

เมื่อวิเคราะห์ด้วยสถิติทดสอบการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของแผนภาพที่ระดับความ
นัยสำคัญ 0.05 (ตารางที่ 7) พบว่า

- ค่าความแข็งแรงดัดขวางของตัวอย่างที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทาง
อุตสาหกรรม (67.7275 ± 7.32381 เมกกะปาสคาล) มีค่าต่ำกว่ากลุ่มควบคุม
(85.636 ± 7.646 เมกกะปาสคาล) กลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสำเร็จรูป
ทางทันตกรรม (83.553 ± 16.055 เมกกะปาสคาล) และกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้น
ใยแก้วทางอุตสาหกรรมที่ปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไขเลน (104.960 ± 10.703 เมกกะ
ปาสคาล) อย่างมีนัยสำคัญ
- ค่าความแข็งแรงดัดขวางของตัวอย่างกลุ่มควบคุม (85.636 ± 7.646 เมกกะปาสคาล) กลุ่ม
ที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสำเร็จรูปทางทันตกรรม (83.553 ± 16.055
เมกกะปาสคาล) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
- ค่าความแข็งแรงดัดขวางของตัวอย่างเรซินอะคริลิกที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้ว
ทางอุตสาหกรรมที่ปรับสภาพเส้นใยแก้วด้วยสารคู่ควบไขเลนมีค่าความแข็งแรงดัด
ขวางสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

ข. การศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1000 เท่า พบว่า ก่อนการทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง ชิ้นตัวอย่างที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางทิศธรรมมีเรซินอะคริลิกแทรกและโอบล้อมรอบเส้นใยแก้วอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 16 B1 และ B2) ส่วนชิ้นตัวอย่างที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมที่ปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลนพบช่องว่างภายในชั้นของเส้นใยแก้วในบางบริเวณ (รูปที่ 16 C1 และ C2) ส่วนชิ้นตัวอย่างที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมซึ่งไม่ได้ปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลน ไม่พบเรซินอะคริลิกแทรกตัวอยู่ภายในชั้นของเส้นใยแก้ว (รูปที่ 16 D1 และ D2)

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของชิ้นตัวอย่างภายหลังการทดสอบความแข็งแรงดัดขวาง พบรอยแตกภายในชิ้นตัวอย่าง โดยในกลุ่มควบคุมซึ่งไม่มีการเสริมเส้นใยแก้ว พบรอยแตกกระจายทั่วไปในเมทริกซ์ (รูปที่ 17 A1 และ A2) ส่วนตัวอย่างกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางทิศธรรม พบรอยแยกบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของเส้นใยแก้วและเมทริกซ์ของพีเอ็มเอ็มเอ โดยไม่พบรอยแตกภายในชั้นของเส้นใยแก้วที่ใช้เสริมความแข็งแรงแก่ชิ้นตัวอย่าง (รูปที่ 17 B1 และ B2) ในขณะที่ตัวอย่างที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมซึ่งปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลน พบการแยกตัวระหว่างเรซินเมทริกซ์กับเส้นใยแก้วภายในชั้นของเส้นใยแก้วที่ใช้เสริมความแข็งแรง โดยที่การเชื่อมยึดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของเส้นใยแก้วกับเมทริกซ์ของพีเอ็มเอ็มเอยังคงมีสภาพสมบูรณ์ไม่แตกหรือแยกออกจากกัน (รูปที่ 17 C1 และ C2) ส่วนกลุ่มที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลน พบรอยแยกบริเวณรอยต่อระหว่างเมทริกซ์ของพีเอ็มเอ็มเอกับชั้นของเส้นใยแก้วเสริมความแข็งแรง รวมทั้งพบการแตกหักของเส้นใยแก้วร่วมด้วย (รูปที่ 17 D1 และ D2)

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณแรงที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกหัก (นิวตัน) ความกว้างของชิ้นตัวอย่าง (มม) ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (มม) และค่าความแข็งแรงดัดขวาง (เมกะปาสคาล) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดัดขวาง (เมกะปาสคาล)

No.	Control (No fiber reinforcement)				Group I (Industrial glass fiber)				Group II (Industrial glass fiber with silane)				Group III (dental glass fiber)			
	F (N)	w (mm)	d (mm)	fractural strength (MPa)	F (N)	w (mm)	d (mm)	fractural strength (MPa)	F (N)	w (mm)	d (mm)	fractural strength (MPa)	F (N)	w (mm)	d (mm)	fractural strength (MPa)
1	116.04	9.98	3.04	94.361	98.91	9.83	3.21	73.238	153.98	9.75	3.39	103.067	88.63	9.73	3.21	66.301
2	115.63	9.98	3.25	82.269	98.85	9.84	3.58	58.786	147.97	9.77	3.34	101.823	91.23	9.78	3.36	61.970
3	120.72	9.88	3.23	87.837	97.94	9.99	3.53	59.007	164.56	9.87	3.35	111.424	170.71	9.83	3.51	105.719
4	93.6	9.82	2.98	80.499	94.5	9.82	3.4	62.434	148.2	9.9	3.49	92.177	142.46	9.82	3.36	96.375
5	98.89	10.02	3.14	75.073	106.62	9.9	3.47	67.082	179.22	9.77	3.37	121.142	138.2	9.94	3.3	95.754
6	114.68	9.9	3.1	90.405	109.34	9.94	3.47	68.516	168.01	9.82	3.44	108.435	136.75	9.64	3.38	93.128
7	129.89	9.91	3.2	95.998	93.05	9.8	3.1	74.102	147.86	9.99	3.53	89.083	123.96	9.85	3.44	79.761
8	102.73	10	3.13	78.645	108.89	9.83	3.25	78.655	184.23	9.91	3.52	112.529	107.56	9.97	3.35	72.099
Mean ±SD	85.6359±7.64630				67.7275±7.32381				104.962±10.70323				83.8884±16.05531			

*flexural strength = $3LF/2bd^2$ where F is the load at a given point on the load deflection curve (N), L is a support span, (mm), b is a width of test beam (mm) and d is a depth of tested beam (mm).

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ช่วงความเชื่อมั่น (confidence Interval) ค่าต่ำสุด (min) และค่าสูงสุด (max.) ของค่าความแข็งแรงดัดขวางของกลุ่มต่างๆ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Min	Max
					Lower Bound	Upper Bound		
Control	8	85.6359	7.64630	2.70337	79.2434	92.0283	75.07	96.00
Industrial glass fiber (G1)	8	67.7275	7.32381	2.58936	61.6046	73.8504	58.79	78.66
Industrial glass fiber with silane (G2)	8	104.9600	10.70323	3.78416	96.0119	113.9081	89.08	121.14
Dental glass fiber (G3)	8	83.8884	16.05531	5.67641	70.4658	97.3110	61.97	105.72
Total	32	85.5529	17.00884	3.00677	79.4206	91.6853	58.79	121.14

ตารางที่ 4 แสดงผลทดสอบลักษณะการกระจายของชุดข้อมูลด้วยสถิติทดสอบ Kolmogorov-Smirnov และ สถิติทดสอบ Shapiro-Wilk ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Tests of Normality							
group		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Flexural strength (MPa)	Control	.170	8	.200 [*]	.946	8	.675
	Industrial glass fiber (G1)	.149	8	.200 [*]	.938	8	.594
	Industrial glass fiber with silane (G2)	.135	8	.200 [*]	.965	8	.857
	Dental glass fiber (G3)	.218	8	.200 [*]	.926	8	.482

a. Lilliefors Significance Correction

*. This is a lower bound of the true significance.

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบความแปรปรวนระหว่างชุดข้อมูลด้วยสถิติทดสอบ Levene ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Test of Homogeneity of Variances			
Flexural strength (MPa)			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.378	3	28	.012

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดขวางด้วยสถิติทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ANOVA					
Flexural strength (MPa)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5577.264	3	1859.088	15.351	.000
Within Groups	3391.054	28	121.109		
Total	8968.317	31			

ตารางที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งแรงค้ำขวางด้วยสถิติเปรียบเทียบเชิงซ้อนคันทน์เพทท์ ที3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

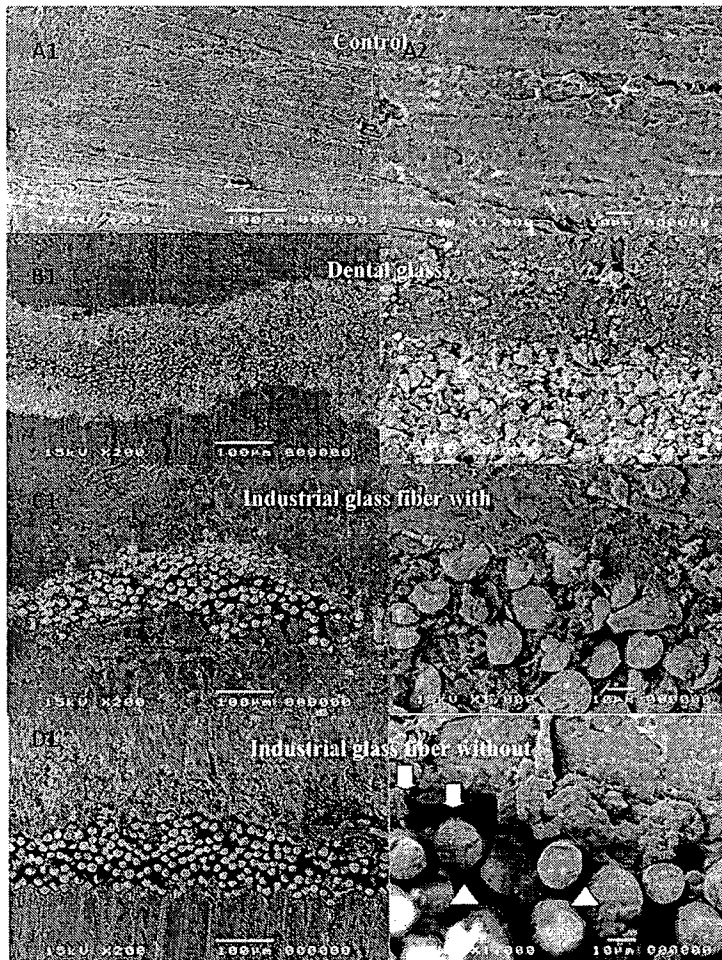
Multiple Comparisons

Flexural strength (MPa)

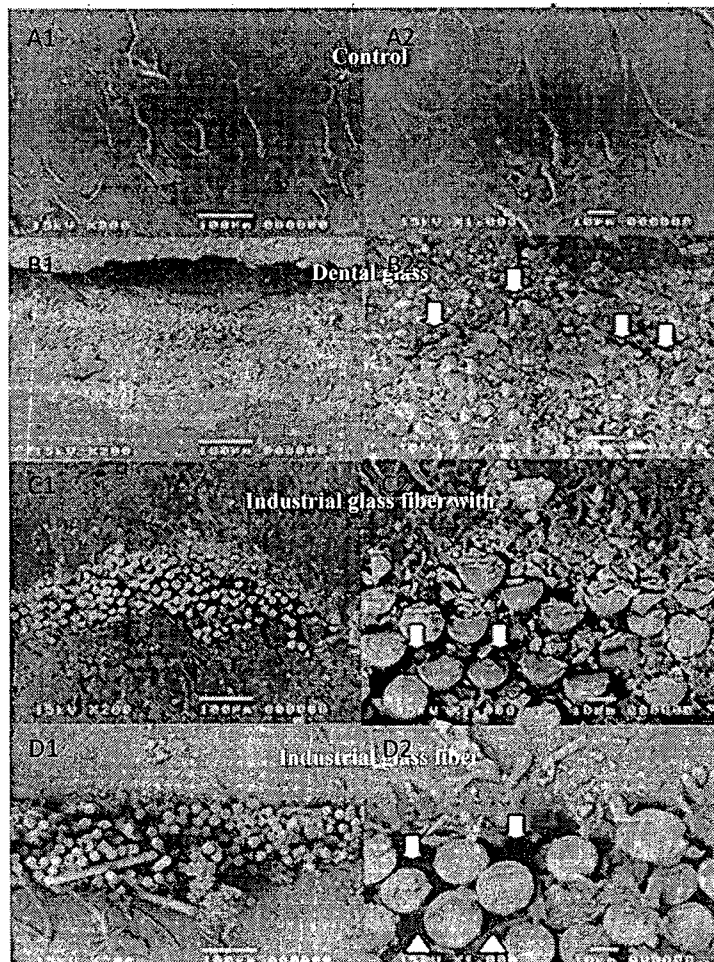
Dunnett T3

(I) group	(J) group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	Industrial GF (G1)	17.90837*	3.74339	.002	6.5919	29.2248
	industrial GF with silane (G2)	-19.32412*	4.65061	.007	-33.5902	-5.0581
	Dental GF (G3)	1.74750	6.28728	1.000	-18.3592	21.8542
industrial GF (G1)	control	-17.90837*	3.74339	.002	-29.2248	-6.5919
	industrial GF with silane (G2)	-37.23250*	4.58527	.000	-51.3503	-23.1147
	Dental GF (G3)	-16.16088	6.23910	.135	-36.2067	3.8849
industrial GF with silane (G2)	control	19.32412*	4.65061	.007	5.0581	33.5902
	industrial GF (G1)	37.23250*	4.58527	.000	23.1147	51.3503
	Dental GF (G3)	21.07162*	6.82214	.050	.0166	42.1266
Dental GF (G3)	control	-1.74750	6.28728	1.000	-21.8542	18.3592
	industrial GF (G1)	16.16088	6.23910	.135	-3.8849	36.2067
	industrial GF with silane (G2)	-21.07162*	6.82214	.050	-42.1266	-.0166

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



รูปที่ 16 แสดงภาพถ่ายชั้นตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 200 และ 1000 ก่อนการทดสอบการโค้งงอโดยจุดสัมผัส 3 จุด (3-point bending) สังเกตรอยแยกระหว่างเส้นใยแก้วกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ในกลุ่มตัวอย่างที่เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยแก้วทางอุตสาหกรรมโดยไม่ได้ปรับสภาพเส้นใยแก้วด้วยสารคู่ควบไซเลน (ลูกศร)



รูปที่ 17 แสดงภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่กัวลังขยาย 200 และ 1000 หลังการทดสอบการโค้งงอโดยจุดสัมผัส 3 จุด (3-point bending) สังเกตรอยแยกระหว่างเส้นใยแก้วกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (ลูกศร)