

การดัดแปรพื้นผิวเส้นใยพอลิเอทด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต/แก๊สไอโซนแบบต่อเนื่องเพื่อเสริมแรงในเอพอกซีเรซิน



นาย ไพศาล ชันชัยทิศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

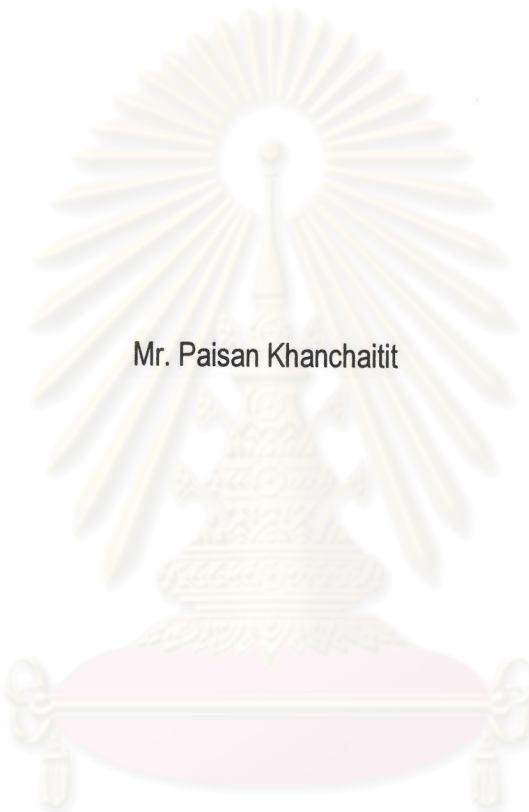
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5267-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ULTRAVIOLET/OZONE CONTINUOUS SURFACE MODIFICATION OF PET FIBER
FOR REINFORCING IN EPOXY RESIN



Mr. Paisan Khanchaitit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

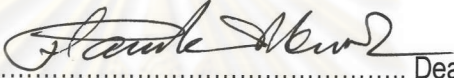
Chulalongkorn University

Academic Year 2003


ISBN 974-17-5267-9


Thesis Title ULTRAVIOLET/OZONE CONTINUOUS SURFACE MODIFICATION
OF PET FIBER FOR REINFORCING IN EPOXY RESIN
By Mr. Paisan Khanchaitit
Field of Study Applied Polymer Science and Textile Technology
Thesis Advisor Assistant Professor Duangdao Aht-Ong, Ph.D.


Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of
the Requirements for the Master 's Degree


..... Dean of Faculty of Science
(Professor Piamsak Menasveta, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE


..... Chairman
(Associate Professor Saowaroj Chuayjuljit)


..... Thesis Advisor
(Assistant Professor Duangdao Aht-Ong, Ph.D.)


..... Member
(Associate Professor Paiparn Santisuk)


..... Member
(Associate Professor Khemchai Hemachandra, Ph.D.)


..... Member
(Assistant Professor Pranut Potiyaraj, Ph.D.)

ไพศาล ชันชัยทิศ: การดัดแปรพื้นผิวเส้นใยพอลิเอทด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต/แก๊สไอโซนแบบต่อเนื่องเพื่อเสริมแรงในเอพอกซีเรซิน. (ULTRAVIOLET/OZONE CONTINUOUS SURFACE MODIFICATION OF PET FIBER FOR REINFORCING IN EPOXY RESIN) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. ดวงดาว อาจองค์, 140 หน้า. ISBN 974-17-5267-9.

ในงานวิจัยนี้ ได้เสนอกระบวนการแบบต่อเนื่องเพื่อดัดแปรพื้นผิวเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต/แก๊สไอโซน เพื่อนำไปใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยยาวต่อเนื่อง โดยได้ทำการออกแบบและสร้างปฏิกรณ์เชิงแสงสถานะแก๊สจากแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดไอปรอทความดันต่ำ และเครื่องกำเนิดแก๊สไอโซนราคาประหยัดที่ออกแบบ และ สร้างขึ้นเอง โดยได้เลือกศึกษากระบวนการที่มีเส้นด้ายพอลิเอทเป็นส่วนเสริมแรง และมีเอพอกซีเป็นเมทริกซ์ เส้นด้ายพอลิเอทถูกบำบัดด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแก๊สชนิดต่าง ๆ 5 ประเภทด้วยกัน อันได้แก่ แก๊สไนโตรเจน อากาศ แก๊สออกซิเจน แก๊สผสมระหว่างอากาศกับไอโซน และสุดท้าย แก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับไอโซน นอกจากนี้ในแต่ละการบำบัดยังศึกษาถึงจากระยะเวลาที่ใช้บำบัด โดยการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วในการดึงเส้นใย ซึ่งระยะเวลาการที่สนใจศึกษาได้แก่ 2, 5 และ 10 นาที เส้นใยทั้งก่อนและหลังการบำบัดพื้นผิวจะถูกนำไปซึ่งไว้ภายในแบบพิมพ์ที่ถูกออกแบบโดยเฉพาะ เพื่อหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง ซึ่งเส้นใยจะมีการเรียงตัวภายในชิ้นงานเพียงทิศทางเดียว

การบำบัดเส้นใยตัวอย่างด้วยวิธีต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้น ไม่พบว่าเกิดผลแบบมีนัยสำคัญต่อ ชีดสูงสุดในการรับภาระ และ ระยะยืด ณ จุดขาด ของเส้นด้ายพอลิเอท นอกจากนี้ ตัวอย่างเส้นด้ายได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานของพื้นผิว รวมทั้งตรวจสอบองค์ประกอบพื้นผิวด้วยการวิเคราะห์การแผ่กระจายพลังงานจากรังสีเอกซ์ ผลปรากฏว่าการบำบัดพื้นผิวทุกวิธีที่กล่าวข้างต้นไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงสัณฐาน แต่พบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวตามความเข้มข้นของโมเลกุลที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ยกตัวอย่างเช่น แก๊สไอโซน แก๊สออกซิเจน อะตอมออกซิเจน และ ซิงเกิลออกซิเจน โดยพบว่า การบำบัดด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตควบคู่กับแก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับไอโซน ทำให้พื้นผิวเส้นด้ายพอลิเอทมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นสูงที่สุด คือเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 6.6 เมื่อเทียบกับเส้นด้ายที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด

วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยพอลิเอททั้งก่อนและหลังการบำบัดจะถูกนำไปทดสอบสมบัติการทนแรงดึง เพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิผลจากการบำบัดต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ผลปรากฏว่า การบำบัดพื้นผิวด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตควบคู่กับแก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับไอโซน เป็นระยะเวลา 5 นาที มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยทำให้ความทนแรงดึงของ วัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 63 ระยะยืด ณ จุดแตกหักเพิ่มขึ้นร้อยละ 175 และมีความเหนียวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 325 เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรสภาพพื้นผิว แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตควบคู่กับแก๊สผสมระหว่างอากาศกับไอโซน ที่ระยะเวลานาน 5 นาที เป็นภาวะที่มีประสิทธิภาพเชิงต้นทุนในการดัดแปรพื้นผิวเส้นใยพอลิเอทสูงที่สุด เนื่องจากมีไม่มีต้นทุนอื่นเนื่องมาจากการใช้แก๊สออกซิเจนเป็นวัตถุดิบ โดยพบว่าการใช้ภาวะดังกล่าวสามารถเพิ่มความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ ระยะยืด ณ จุดแตกหัก และมีความเหนียวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 52, 126 และ 270 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรสภาพพื้นผิว

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อผู้ผลิต..... 

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ปีการศึกษา 2546

4372361823 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: COMPOSITE / SURFACE MODIFICATION / UV / OZONE / PET / EPOXY

PAISAN KHANCHAITIT: ULTRAVIOLET/OZONE CONTINUOUS SURFACE
MODIFICATION OF PET FIBER FOR REINFORCING IN EPOXY RESIN THESIS ADVISOR:
ASST PROF. DUANGDAO AHT-ONG, Ph.D., 140 pp. ISBN 974-17-5267-9.

In this study, a continuous UV/ozone surface modification process of polymeric fiber for the production of continuous-fiber-reinforced polymer based composite has been proposed. The gas phase photo-reactor, using the conventional low-pressure mercury lamps as UV sources, and the economically-made ozone generator were designed and constructed. Polyethylene terephthalate (PET) yarns and epoxy resin were chosen to be reinforcement and matrix in our composite system, respectively. Five combinations of UV light and gas species, i.e. UV/N₂, UV/air, UV/O₂, UV/air + O₃, and UV/O₃ + O₂, for treating PET yarn were performed. The effects of exposure time, i.e. 2, 5, and 10 min, in the reactor of the fiber surface to each treatment were also studied by varying the pull speed of the pulling mechanism. The unidirectional tensile testing specimens were prepared by arrangement PET samples into specific designed casting mold.

The treatments led no significant effects to the tensile properties, maximum load and elongation to break, of PET samples. The samples were analyzed by scanning electron microscope (SEM) to determine the surface morphology, and by energy dispersive x-ray analysis (EDX) to determine the surface composition. All treatments, there were no surface morphology changes observed. The EDX results showed that the effect of the treatment to surface composition depend on concentration of reactive species in the gas, i.e. ozone, molecular oxygen, atomic oxygen, and singlet oxygen. UV/O₂ + O₃ treatment gave the highest value of oxygen uptake (6.6 %).

Tensile test of resulted composites was investigated to determine the effectiveness of the treatment on the mechanical properties of the composite properties. The most effective condition of the treatment was 5 min UV/O₂ + O₃, which improved 63 % of tensile strength, 175 % of elongation to break, and 325 % of toughness, in comparison to nontreated PET composite. However, 5 min UV/air + O₃ was found to be most cost-effective condition because there was no need for supply oxygen at this condition. The 5 min UV/air + O₃ treatment improved 52 % of tensile strength, 126 % of elongation to break, and 270 % of toughness, compared to nontreated PET composite.

Department Materials Science

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology

Academic year 2003

Student's signature... *Paisan Khanchaitit*

Advisor's signature... *Duangdao Aht-ong*

Acknowledgments

I have always realized that there are many people who have directed, assisted and supported me during my Master study. Without them I would never be able to make to this point. Although it would be impossible to name each of them, I would like to express my deep gratitude to all of them. First, I would like to thank my advisor, Assistant Professor Dr. Duangdao Aht-Ong, for her tremendous effort in guiding, helping and encouraging me during the last three years. Her broad knowledge, insightful thoughts and sparkling ideas have significantly widened my horizons and inspired my research. Personally, I have also greatly benefited from her devoted, energetic and enthusiastic manner towards science.

I also thank the members of my thesis committees, Assoc. Prof. Saowaroj Chuayjuljit, Assoc. Prof. Paiparn Santisuk, Assoc. Prof. Dr. Khemchai Hemachandra, and Asst. Prof. Dr. Pranut Potiyaraj, for their time and valuable suggestions. I am also grateful to Assoc. Prof. Onusa Saravari and Assoc. Prof. Dr. Usa Sangwattanoj for their detailed comments on my oral proposal. I would like to thank many of my collaborators. I specially thank Asst. Prof. Suvit Punnachaiya of the department of nuclear engineering for his valuable guidance and assistance in the making of ozone generator project. Many thanks are due to Mr. Manit Jitpukdee, who has provided technical help in my research, especially in assembling of electronic parts.

I also thank Mr. Sutatcha Hongsresawat of the Department of Geophysics University of Chicago for insightful suggestions, and also in my personal life as my best friend. Discussion with him has always been amazingly helpful, even though we are not in the same field. I am grateful to many people for their selfless support in many areas. I especially acknowledge Ms. Bang-orn for her help in electron microscopic measurements, and Mr. Supadej for his kindly help and coordination in obtaining the chemicals for our research work. I thank Ms. Tatiya Trongstikul and Ms. Usarat Rattankamnuan, they have greatly enriched my experience at Chulalongkorn University, and brought me many cherishable memories. I also want to thank the people in the Department of Materials Science, including all professors, staff and my fellow graduates, for providing such a joyful studying and working environment.

I am grateful to my parents, Mr. and Mrs. Inson and Saipin, for their continuous encouragement and unconditional love throughout. Without their foresight and charity, I would not be where I am today. I shall be indebted to them forever. I want to thank Ms. Monnapa Sarapat. It is her always being there lighting my spirit up, keeping my heart warm, and showing me the sunshine on the road. Finally, the greatest thank due to my brother my hero, Mr. Nuttawut, I have to do in good things to meet you again in the next life.

CONTENTS

| | PAGE |
|---|------|
| Abstract in Thai..... | iv |
| Abstract in English..... | v |
| Acknowledgements..... | vi |
| Contents | viii |
| List of Tables..... | xii |
| List of Figures..... | xiii |
| CHAPTER | |
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Theory and Literature Review | 3 |
| 2.1. What are Composites? | 3 |
| 2.2. Types of Composite Material | 4 |
| 2.3. Polymer Matrix Composite | 4 |
| 2.4. Fiber Architecture | 7 |
| 2.4.1. Volume Fraction and Weight Fraction | 8 |
| 2.4.2. Fiber Orientation Angle | 9 |
| 2.5. The Concept of Load Transfer | 10 |
| 2.6. Elastic Deformation of Unidirectional Continuous Fiber Composites..... | 10 |
| 2.6.1. Axial Stiffness (Isostrain Condition)..... | 11 |
| 2.6.2. Transverse Stiffness (Isostress Condition)..... | 12 |
| 2.7. Interfaces..... | 15 |
| 2.7.1. Wetting..... | 16 |
| 2.7.2. Types of Bonding at the Interface..... | 21 |
| 2.7.2.1. Mechanical Bonding..... | 21 |
| 2.7.2.2. Physical Bonding..... | 23 |
| 2.7.2.3. Chemical Bonding..... | 23 |
| 2.7.3. Optimum Interfacial Bond Strength..... | 25 |

CONTENTS (continued)

| CHAPTER | PAGE |
|--|------|
| 2.8. Polymer Surfaces..... | 26 |
| 2.8.1. Differences between Polymer Surface and Bulk..... | 26 |
| 2.8.2. Depth Scales Associated with Surface Behavior..... | 27 |
| 2.9. Polymer Surface Modification Techniques..... | 27 |
| 2.9.1. Corona Discharge Treatment..... | 28 |
| 2.9.2. Flame Treatment..... | 29 |
| 2.9.3. Plasma Treatment..... | 29 |
| 2.9.4. Chemical Treatment..... | 30 |
| 2.9.5. Ion-Beam Modification..... | 31 |
| 2.9.6. Radiation Grafting..... | 31 |
| 2.10. Photo-Oxidation Process as a Polymer Surface Modification Technique..... | 33 |
| 2.10.1. Photo-Oxidation of Polymers by Oxygen Reactive Species..... | 39 |
| 2.10.1.1. Ozone..... | 39 |
| 2.10.1.2. Atomic Oxygen..... | 41 |
| 2.10.1.3. Singlet Oxygen..... | 42 |
| 2.10.2. Photo-Oxidation of Poly(ethylene terephthalate)..... | 43 |
| 2.11. Pultrusion..... | 47 |
| 2.12. Epoxy Resin..... | 51 |
| 2.12.1. Epoxy Molecules..... | 53 |
| 2.12.2. Curing Agent..... | 55 |
| 2.13. Polyethylene Terephthalate (PET) Fiber..... | 56 |
| 2.14. Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray Analysis (SEM/EDX) | 57 |
| 2.15. Literature Review..... | 61 |
| 3. Methodology and Process Design..... | 65 |
| 3.1. Materials..... | 65 |
| 3.1.1. Epoxy Resin..... | 65 |
| 3.1.2. Polyethylene Terephthalate (PET) Fiber..... | 67 |
| 3.2. Methodology..... | 67 |

CONTENTS (continued)

| CHAPTER | PAGE |
|---|------|
| 3.3. Process Design and Construction..... | 70 |
| 3.3.1. Equipments Design and Construction..... | 72 |
| 3.3.1.1. Selection of Ultraviolet Light Sources and Construction of Lamp Control Unit..... | 72 |
| 3.3.1.2. Reactor Chamber Design and Construction..... | 77 |
| 3.3.1.3. Ozone Generation Design and Construction..... | 81 |
| 3.3.1.4. Pulling Mechanism..... | 86 |
| 3.3.1.5. Monitoring Devices..... | 88 |
| 3.3.1.6. Casting Mold..... | 91 |
| 3.3.2. Process Construction..... | 95 |
| 3.4. Characterization and Testing..... | 99 |
| 3.4.1. PET Fiber | 99 |
| 3.4.2. Composite Specimen..... | 99 |
| 4. Results and Discussion..... | 100 |
| 4.1. Effects of Surface Treatment on Properties of PET Fiber..... | 100 |
| 4.1.1. Tensile Properties..... | 100 |
| 4.1.2. Surface Morphology..... | 101 |
| 4.1.3. Oxygen Content of the PET surface..... | 104 |
| 4.2. Effects of Surface Treatment on Tensile Properties of PET/Epoxy Composite | 108 |
| 5. Conclusion and Suggestions for Future Work..... | 117 |
| 5.1. Conclusion..... | 117 |
| 5.2. Suggestion for future work..... | 118 |
| 5.2.1. Suggestion for Process development..... | 118 |
| 5.2.2. Suggestion for Further Surface Modification Study and Characterization..... | 119 |
| 6. References..... | 120 |

CONTENTS (continued)

| CHAPTER | PAGE |
|--------------------|------|
| 7. Appendices..... | 126 |
| 8. Vita..... | 140 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

List of Tables

| | PAGE |
|--|------|
| Table 2.1 Comparative properties of metal and polymer matrix composite..... | 6 |
| Table 2.2 Surface constitution and critical surface tension at 20 °C..... | 20 |
| Table 2.3 Surface tension and critical surface tension of polymers at 25 °C..... | 20 |
| Table 2.4 Treatments used to modify plastic surfaces..... | 28 |
| Table 2.5 Compares of some difference surface analysis techniques..... | 60 |
| Table 3.1 Typical properties of EPOTEC YD-582..... | 66 |
| Table 3.2 Typical properties of EPOTEC XDH-125..... | 66 |
| Table 3.3 Typical Handling properties of EPOTEC YD-582/XDH-125 mixture..... | 66 |
| Table 3.4 Physical properties of ozone..... | 82 |
| Table 4.1 Oxygen contents and $\Delta\%O$ values of PET yarn surfaces before and after 10 minutes treatment with different gas species..... | 104 |


 ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

List of Figures

| | PAGE |
|--|------|
| Figure 2.1 Examples of reinforcement styles, combinations, orientations and configurations.. | 8 |
| Figure 2.2 Fiber orientation angle on a lamina..... | 9 |
| Figure 2.3 The angular dependence of the modulus of a unidirectional CFRP (carbon fiber reinforced plastic) lamina ($V_f = 0.5$)..... | 9 |
| Figure 2.4 Model of unidirectional continuous fiber composite..... | 10 |
| Figure 2.5 Schematic illustration of (a) a composite containing a volume fraction V_f of aligned, continuous fibers, and (b) a representation of this as bonded slabs of matrix and fiber material. (c) On applying a stress σ_{1A} parallel to the fiber axis, the two slabs experience the same axial strain ε_1 | 11 |
| Figure 2.6 Schematic showing (a) the slab model and (b) the isostress assumption during transverse stressing..... | 13 |
| Figure 2.7 Comparison between experimental data for the axial and transverse Young's moduli, E_1 and E_2 , for polyester/glass composites and corresponding predictions from the isostrain model (Equation (2.6)) for E_1 and the isostress (Equation (2.8)) and Halpin-Tsai (Equation (2.9), with $\xi = 1$) models for E_2 | 14 |
| Figure 2.8 Debonding, fiber fracture and fiber pull-out in a unidirectional continuous fiber composite..... | 16 |
| Figure 2.9 Three different conditions of wetting: complete wetting, no wetting and partial wetting | 18 |
| Figure 2.10 Mechanical gripping due to radial shrinkage of a matrix in a composite more than the fiber on a cooling from a high temperature..... | 22 |
| Figure 2.11 a) Good mechanical bond b) Lack of wettability can make a liquid polymer or metal unable to penetrate the asperities on the fiber surface | 23 |
| Figure 2.12 Interfacial bonds formed by (a) molecular entanglement following interdiffusion and (b) chemical bonding..... | 24 |
| Figure 2.13 Schematic diagrams of (a) corona-discharge and (b) flame setup..... | 29 |
| Figure 2.14 Schematic diagram of the remote-plasma treater..... | 30 |
| Figure 2.15 Laboratory-scale photo-grafting process by Ranby et. al (a) batch process for polymer films and (b) continuous process for yarns, filaments and film strips..... | 32 |
| Figure 2.16 Unimolecular photophysical processes..... | 34 |

List of Figures (continued)

| | PAGE |
|---|------|
| Figure 2.17 The schematic represents reaction mechanism on polymer surface by reactive gas species (ozone, atomic oxygen, singlet oxygen and molecular oxygen) under UV irradiation..... | 40 |
| Figure 2.18 Relative effect of atomic oxygen on different polymers..... | 42 |
| Figure 2.19 Transmission spectrum of poly(ethylene terephthalate)..... | 43 |
| Figure 2.20 Schematic of pultrusion process..... | 48 |
| Figure 2.21 Pultrusion facility..... | 48 |
| Figure 2.22 Reinforcement racks and creels..... | 49 |
| Figure 2.23 Examples of pultrusion (a) dies and (b) preformer..... | 50 |
| Figure 2.24 Commercial profile designs have unlimited versatility..... | 51 |
| Figure 2.25 The structure of epoxies..... | 54 |
| Figure 2.26 An illustration of the classical models showing the production of bremsstrahlung, characteristic X-rays, and Auger electrons..... | 59 |
| Figure 2.27 Schematic representation of an energy-dispersive spectrometer..... | 60 |
| Figure 3.1 SEM micrograph of the PET spun yarn..... | 67 |
| Figure 3.2 Schematic diagram of the experimental methodology..... | 68 |
| Figure 3.3 Schematic of the qualitative flow diagram of the UVO process..... | 70 |
| Figure 3.4 2D and 3D scaled drawing and model created by the AutoCAD® 2002 software.. | 71 |
| Figure 3.5 A schematic rearrangement of the equipments created by the 3ds max® 5 software | 71 |
| Figure 3.6 Photograph (a), emission spectrum [56] (b), and dimensions in millimeter (mm) (c), of the selected Phillips TUV TL-30W lamps..... | 74 |
| Figure 3.7 (a) Controller box, (b) lamp controlled devices included switches, ballasts and starters and (c) configuration diagram of the UV lamps unit..... | 76 |
| Figure 3.8 Design of the reactor chamber (not drawn to scale)..... | 79 |
| Figure 3.9 Photographs of constructed reactor chamber..... | 80 |
| Figure 3.10 The \varnothing 30 millimeter cylindrical ozone generator..... | 83 |
| Figure 3.11 The diagram of parallel ozone generators connection of electricity and tubing..... | 84 |
| Figure 3.12 The assembly for a Standard Iodometry Method..... | 85 |

List of Figures (continued)

| | PAGE |
|---|------|
| Figure 3.13 The pulling mechanism of UVO process..... | 87 |
| Figure 3.14 The calibration curve of pulling speed against rotating scale on the adjusting knob | 88 |
| Figure 3.15 Temperature measurement unit..... | 90 |
| Figure 3.16 The pressure gauge..... | 90 |
| Figure 3.17 Rotameters: front-view installation (left) and back-view connections to gas tanks (right) | 90 |
| Figure 3.18 The dimensions of ASTM D638M type MI specimen for tensile testing..... | 91 |
| Figure 3.19 CAD-designed and 3D illustrated of the pictures-frame casting mold..... | 93 |
| Figure 3.20 Photographs of the pictures-frame mold and assemble method for resin casting of the testing specimen..... | 94 |
| Figure 3.21 Flow diagram of supplied gases..... | 95 |
| Figure 3.22 Drawing of the rack of yarn creels (up left), and schematic of introducing of yarns into reactor (up right)..... | 96 |
| Figure 3.23 The interior temperature after lamps was turned on..... | 97 |
| Figure 3.24 Constructed process and its components..... | 98 |
| Figure 4.1 Effects of gas species and exposure time of the UVO treatment on the tensile properties of the yarn samples..... | 100 |
| Figure 4.2 SEM micrographs of PET-fiber before an after UVO treatment with different regimes, the scanning area was 66 μm X 49.5 μm | 102 |
| Figure 4.3 SEM micrographs of PET-fiber before an after UVO treatment with different regimes, the scanning area was 26.4 μm X 19.8 μm | 103 |
| Figure 4.4 EDX spectra of PET yarn surfaces before and after 10 minutes treatment with different gas species..... | 105 |
| Figure 4.5 Effect of gas species on the $\Delta\%O$ of treated PET yarn..... | 105 |
| Figure 4.6 Effects of UVO surface treatment with various gas species on the tensile strength of the composites | 109 |
| Figure 4.7 Effects of UVO surface treatment with various gas species on the elongation to break of the composites..... | 109 |

List of Figures (continued)

| | PAGE |
|--|------|
| Figure 4.8 Effects of UVO surface treatment with various gas species on the toughness of the composites..... | 110 |
| Figure 4.9 Scanning Electron Microscope fractographs of tensile specimen, x500 magnification, scanning area = 264 μm X 196 μm | 111 |
| Figure 4.10 Scanning Electron Microscope fractographs of tensile specimen, x1000 magnification, scanning area = 132 μm X 98 μm | 112 |
| Figure 4.11 SEM fractography of PET/Epoxy matrix composite specimen: UV/O ₂ + O ₃ treated for 10 minutes, scanning area = 132 μm x 98 μm (top), UV/O ₂ treated for 10 minutes, scanning area = 660 μm x 490 μm (bottom)..... | 116 |