

คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยจาก PC/ABS สำหรับเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบา



นาย ภาคภูมิ ล่อใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FIBER-REINFORCED PC/ABS COMPOSITE FOR LIGHT WEIGHT BALLISTIC ARMOR

Mr. Parkpoom Lorjai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

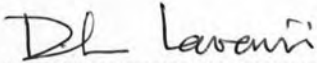
Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

492140

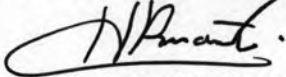
Thesis Title FIBER-REINFORCED PC/ABS COMPOSITE FOR LIGHT WEIGHT
BALLISTIC ARMOR
By Mr. Parkpoom Lorjai
Field of Study Chemical Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Sarawut Rimdusit, Ph.D.
Thesis Co-advisor Kuljira Sujirote, Ph.D.

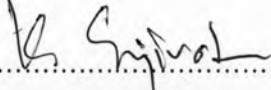
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree

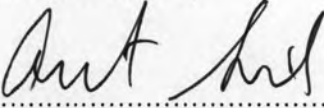

..... Dean of the Faculty of Engineering
(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)

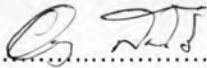
THESIS COMMITTEE


..... Chairman
(Associate Professor Chirakarn Muangnapoh, Dr. Ing.)


..... Thesis Advisor
(Assistant Professor Sarawut Rimdusit, Ph.D.)


..... Thesis Co-advisor
(Kuljira Sujirote, Ph.D.)


..... Member
(Akawat Sirisuk, Ph.D.)


..... Member
(Anongnat Somwangthanaroj, Ph.D.)

ภาคภูมิ ล่อใจ : คอมพอลิติกเสริมแรงด้วยเส้นใยจาก PC/ABS สำหรับเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบา
(FIBER-REINFORCED PC/ABS COMPOSITE FOR LIGHT WEIGHT BALLISTIC ARMOR)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ศรารุช ริมคูสิต, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์, 117 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบา จากเส้นใยเคฟล่าโดยใช้พอลิเมอร์ผสม PC/ABS เป็นเมตริก เป็นที่ทราบกันดีว่าการยึดเกาะที่เหมาะสมระหว่างพอลิเมอร์เมตริกและวัสดุเสริมแรงจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอลิติกเช่น คุณสมบัติการตกกระแทก โดยในปัจจุบันการพัฒนาเมตริกเพื่อให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับเส้นใยชนิดต่าง ๆ นั้นยังมีน้อยมาก อันอาจเนื่องจากข้อจำกัดด้านความสามารถดัดแปรของเมตริกให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับเส้นใยที่ใช้ จากงานวิจัยจำนวนมาก แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติ หลากหลายด้านของ PC/ABS ที่สามารถปรับแต่งคุณสมบัติตามต้องการได้ โดยการปรับสัดส่วนระหว่าง PC และ ABS ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษา ผลของสัดส่วนระหว่าง PC และ ABS ที่ใช้เป็นพอลิเมอร์เมตริก ที่มีต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนของวัสดุคอมพอลิติก อีกทั้งยังศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม PC/ABS อีกด้วย จากผลการทดลองด้วยเครื่อง DSC แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(Tg) สองตำแหน่งคือ ของ PC เฟส และของ ABS เฟส โดย Tg ของทั้งสองเฟสนี้จะอยู่ห่างซึ่งกันและกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเข้ากันได้บางส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองนี้ จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PC/ABS พบว่า PC/ABS จะแสดง Synergistic effect โดยที่พอลิเมอร์ผสมจะให้ค่า Elastic modulus มากกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้นคือ PC และ ABS สำหรับการศึกษาผลของสัดส่วนระหว่าง PC และ ABS ของพอลิเมอร์เมตริก ที่มีต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนของวัสดุคอมพอลิติกพบว่า วัสดุคอมพอลิติกจะแสดงความสามารถในการป้องกันกระสุนได้สูงสุดที่สัดส่วน 40/60 ของ PC/ABS ที่ใช้เป็นเมตริก โดยค่ามอดูลัสของคอมพอลิติกนี้อยู่ที่ 11.7 GPa และมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ผิวอยู่ที่ 0.23 g/cm² (คอมพอลิติกหนา 10 ชั้น) นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบจากจำนวนชั้น และ การจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของวัสดุคอมพอลิติก เพื่อให้สามารถป้องกันกระสุนได้ในระดับ IIIA โดยจากการศึกษาพบว่าสำหรับวัสดุคอมพอลิติกที่ใช้ 40/60 PC/ABS เป็นเมตริกจะใช้จำนวนชั้นที่เหมาะสมอย่างน้อย 50 ชั้น

ภาควิชา...วิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา...2549.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

#4770592421: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ABS / ARMOR / BALLISTIC / COMPOSITE / POLYCARBONATE / KEVLAR /
LAMINATE

PARKPOOM LORJAI: FIBER-REINFORCED PC/ABS COMPOSITE FOR LIGHT
WEIGHT BALLISTIC ARMOR. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SARAWUT
RIMDUSIT, Ph.D., THESIS COADVISOR: KULJIRA SUJIROTE, Ph.D., 117 pp.

This research aims to develop light weight ballistic armor by using Kevlar-reinforced PC/ABS composite. It has been known that optimal interaction between polymer matrix and its reinforcement plays a crucial role in its mechanical behavior such as impact properties. At present, the matrix development for reinforcing fiber particularly in the ballistic composite application is scarcely investigated because the restriction in the lack of tailor-made properties of the matrix itself. Many researchers disclosed various properties of PC/ABS which can be fine-tuned to acquire desired properties by, for example, adjusting the blending ratios between the PC and the ABS. This investigation emphasized on the effect of PC/ABS blend compositions on their blend properties as well as the ballistic efficiency of their composites. The DSC thermograms of PC/ABS blends exhibited two T_g 's of the PC-rich and ABS-rich phases. The glass transition temperatures of each component were observed to shift towards each other possibly as a result of their partial miscibility. From the mechanical property investigation of the blends, the elastic modulus of these PC/ABS blends exhibited synergistic behavior giving the ultimate modulus value within the blend compositional range of 40 - 60 wt% of the PC. It was also found that the composites with 40/60 mass ratio of the PC/ABS matrix exhibited the highest ballistic efficiency in comparison with other blend compositions. The flexural modulus of the composite with highest ballistic resistance was about 10-13 GPa with an average areal density of 0.23 g/cm² in a 10 piles/panel composite. Additionally, at least 50 piles of the Kevlar cloth in the composite panel were found to be sufficient to protect ballistic impact penetration of the ammunition at a relatively high level of NIJ class IIIA.

Department...Chemical Engineering...
Field of Study...Chemical Engineering...
Academic Year ...2006.....

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....
Co-advisor's Signature.....

ACKNOWLEDGMENTS

I wish to express my sincerest gratitude and deep appreciation to my advisor, Asst. Prof. Dr. Sarawut Rimdusit, and my co-advisor, Dr. Kuljira Sujiroj, for their kindness, invaluable supervision, invaluable guidance, advice, and encouragement throughout the course of this study and editing of this thesis.

Gratefully thanks to Assoc. Prof. Dr. Chirakarn Muangnapoh, Dr. Akawat Sirisuk, and Dr. Anongnat Somwangthanaroj for their substantial advice as thesis committee.

Furthermore, thank are due to the Bayer Co.,Ltd. for their polycarbonate (Makrolon® 2800) support and Lanxess (Thailand) Co.,Ltd for their, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene graft copolymer (ABS), Lustran® 440. High speed puncher impact test was evaluated by Prof. Takeshi Kitano of AIST (retired). Many thanks are extent to Quartermaster's division for their ballistic impact test facility. Police Major Paichayon Sokkasem for kind support in the use of ballistic impact test instruments.

This research is supported by the Thailand Graduated Institute of Science and Technology Scholarship (TGIST) and The 90th Anniversary of Chulalongkorn University Found. My advisor also gratefully acknowledges the additional financial support from the Research Grant for Mid-career University Faculty of the Commission on Higher Education, Ministry of Education, and Thailand Research found 2005-2007.

Many thank everyone in the Polymer Engineering Laboratory, Chulalongkorn University, for their discussion and friendly encouragement. Moreover, I would like to thank everyone here. I feel so fortunate having a chance to learn here.

CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT (THAI)	iv
ABSTRACT (ENGLISH)	v
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
CONTENTS	vii
LIST OF FIGURES	xi
LIST OF TABLE	xiv

CHAPTER

I INTRODUCTION	1
II THEORY	5
2.1 Kevlar Aramid Fiber	5
2.2 Polycarbonate (PC)	8
2.3 Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS).....	12
2.4 PC/ABS Blend	13
2.5 Tough Mechanisms of PC/ABS Blend	14
2.5.1 Energy absorption by rubber particles	15
2.5.2 Matrix crazing	15
2.5.3 Shear yielding	16
2.6 Advantage of Using Thermoplastics as Polymer Matrix in Composite Fabrication.....	16
2.7 Use of High Performance Fiber in Armor Application	17
2.8 Theories on Ballistic Impact.....	19
2.9 Energy Absorption Mechanisms of Composite Armor	22
2.10 Ballistic Standard (National Institute of Justice [NIJ]) for Body Armor Classification	24
2.10.1 Type I.....	24

CHAPTER	PAGE
2.10.2 Type IIA.....	25
2.10.3 Type II	25
2.10.4 Type IIIA	25
2.10.5 Type III	25
2.10.6 Type IV	26
2.10.7 Special type.....	26
2.11 Ballistic Penetration and Back Face Signature Criteria	26
2.12 Test Method	26
III LITERATURE REVIEWS	28
IV EXPERIMENT.....	35
4.1 Material	35
4.1.1 Polymer blend	35
4.2.2 Reinforcement fiber.....	35
4.2 Gel Permeation Chromatography (GPC)	36
4.3 Preparation of Polymer Blend	36
4.4 Preparation of PC/ABS Blended Test Specimens	36
4.5 Film Blowing.....	37
4.6 Composite Processing	37
4.7 Flexural Testing	37
4.8 High Speed Impact Properties	38
4.9 Rheological Properties Measurements.....	38
4.10 Morphological Observation.....	38
4.11 Dynamic Mechanical Analysis	39
4.12 Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	39
4.13 Contact Angle Measurement	39
4.14 Solvent Extraction.....	40
4.15 Density Measurement	40
4.16 Thermo gravimetric Analysis (TGA).....	40
4.17 Ballistic Impact Test	41

CHAPTER	PAGE
V RESULTS AND DISCUSSION.....	43
5.1 Matrix Characterization	43
5.1.1 Molecular Weight Characterization of Base Polymer.....	43
5.1.2 Mechanical Properties Measurement	44
5.1.3 Differential Scanning Calorimeter	46
5.1.4 Dynamic Mechanical Analysis	47
5.1.5 High Speed Impact.....	48
5.1.6 Thermal Stability Investigation of PC/ABS blend.....	49
5.2 Determination of Processing Condition of PC/ABS-Kevlar Composites	49
5.2.1 Determination of Processing Temperature, Time, and pressure... 49	
5.2.2 Rheological Behavior of PC/ABS Blends as a Polymer Composite Matrix.....	51
5.2.3 Determination of Optimum Matrix Content	52
5.3 Composite Characterizations.....	54
5.3.1 Mechanical Properties Measurement	54
5.3.2 Investigation of Adhesion between Kevlar Fiber and PC/ABS Matrices	55
5.3.3 Thermal stability investigation	55
5.4 Ballistic Impact Test of the Kevlar-reinforced PC/ABS Composite Armors.....	56
5.4.1 Low Level Ballistic Impact Test.....	56
5.4.2 Ballistic Impact Test of NIJ Level III-A	59
VI CONCLUSIONS.....	103
REFERENCES.....	105

APPENDICES	108
Appendix A Mechanical, Thermal Properties of PC/ABS Blend	109
Appendix B Characterization of Kevlar-reinforced PC/ABS Composite .	111
Appendix C Void Content Calculation.....	113
Appendix D Characterization of Kevlar-reinforced PC/ABS Composite .	114
VITA	117

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
2.1 Storage and loss modulus versus temperature of polycarbonate.....	11
2.2 Microstructures of ABS particles in PC matrix	14
2.3 Toughening mechanisms in rubber filled modified polymers	15
2.4 Sonic velocity and specific energy absorption of various	19
2.5 Schematic representation of principle of armor	20
2.6 Projectile impact on a single fiber	21
2.7 Three principal damage mechanisms for low velocity impact.....	22
2.8 Photo of a projectile and specimen impacted near its V_{50} ballistic limit pointing out shear plug region	23
2.9 Test range configuration	27
3.1 Curve of impact stress versus time of PC/ABS alloy at different PC composition (PC %).....	28
3.2 Maximum impact stress and energy for crack initiation versus ABS content	29
3.3 Effect of ABS volume fraction in work dissipated per volume of the blend, work dissipated work per total work, peak values of hydrostatic stress in PC matrix	29
3.4 Local plastic zone of PC/ABS at various compositions	31
3.5 Apparent viscosity at shear rate 100 and 1000 s^{-1} versus blend composition for PC/ABS	32
3.6 Energy absorbed by different mechanisms during ballistic impact of woven fabric E-glass/epoxy laminate.....	33
5.1 GPC chromatograms of PC, ABS, and PC/ABS at weight ratio 40/60.....	63
5.2 Flexural modulus of PC/ABS blends as a function of PC content.....	64
5.3 Flexural strength of PC/ABS blends as a function of PC content.....	65
5.4 Tensile modulus of PC/ABS blends as a function of PC content	66
5.5 Tensile strength of PC/ABS blends as a function of PC content	67

FIGURE	PAGE
5.6 Elongation at break of PC/ABS blends as a function of PC content.....	68
5.7 SEM micrographs of PC/ABS blends etched with a NaOH aqueous solution at various compositions.....	69
5.8 DSC thermograms of PC/ABS blends at various compositions	70
5.9 Storage modulus of PC/ABS blends at various compositions	72
5.10 Tan δ of PC/ABS blends at various compositions	73
5.11 Relationship between the impact energy and PC content in PC/ABS blend	74
5.12 TGA thermograms of PC/ABS blends at various compositions.....	75
5.13 Flexural modulus of the composites at various hot pressing	76
temperatures under a constant pressing pressure and time	
5.14 Flexural strength of the composites at various hot pressing temperatures under a constant pressing pressure and time	77
5.15 Flexural modulus of the composites processed at the temperature of 200 and 220 °C at various times under a constant pressure.....	78
5.16 Flexural strength of the composites processed at the temperature of 200 and 220 °C at various times under a constant pressure.....	79
5.17 Flexural modulus of the composite processed at 220°C for 30 minutes using various pressing pressures	80
5.18 Flexural strength of the composite processed at 220°C for 30 minutes using various pressing pressures	81
5.19 Melt viscosity at 260°C of PC/ABS blend as a function of PC content	82
5.20 Variation in viscosity of PC/ABS blends measured over the temperature range of 160 to 280°C.....	83
5.21 Comparison between the measured density and theoretical density of the composite at various fiber contents	86
5.22 Calculated void fraction of the composite at various matrix contents	87
5.23 Flexural strength of Kevlar/PC/ABS composite as a function of matrix content.....	88
5.24 Flexural modulus of Kevlar/PC/ABS composite as a function of matrix content.....	89

FIGURE	PAGE
5.25 Flexural modulus of Kevlar-reinforced PC/ABS composites as a function of PC content in the matrix.....	90
5.26 Flexural strength of Kevlar-reinforced PC/ABS composites as a function of PC content in the matrix.....	91
5.27 Peel strength of the composites as a function of PC content in the matrix	92
5.28 Variation in water contact angles of PC/ABS matrices at various compositions	93
5.29 TGA thermograms of Kevlar-reinforced PC/ABS composites at various matrix compositions	94
5.30 Diameter of after fired delamination area of the composites at various matrix compositions	97
5.31 SEM micrographs of Kevlar/PC/ABS composites at various matrix compositions	100

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
1.1 Comparison of industrial filament yarns	2
2.1 Typical properties of Kevlar aramid yarns	6
2.2 Chemical and physical properties of Kevlar aramid fiber	7
2.3 Chemical and physical properties of polycarbonate	9
2.4 Physical properties of the most used reinforced thermosets and Thermoplastics	10
2.5 Chemical and physical properties of ABS.....	12
2.6 Positive and negative properties of PC and ABS.....	13
2.7 Comparison of industrial filament yarns	17
4.1 Description of composites laminate used for evaluate the most appropriate composition of the matrix.....	41
4.2 Description of composites laminate used for determine the suitable number of layers of composite which exceed level III-A following NIJ standard.....	42
5.1 Mw, Mn, and PDI of PC and ABS used in this research content	62
5.2 DSC thermograms of PC/ABS blends at various compositions	71
5.3 Processing conditions of the composites at various matrix compositions	84
5.4 Measured density and theoretical density of the composites with various matrix contents.....	85
5.5a Low level ballistic impact test results of the composites at various matrix compositions.....	95
5.5b Damage dimension of rear Plate of the composites with Low level ballistic impact test	96
5.6 Wave velocities of the composite at various matrix compositions.....	98
5.7 Damage volume of the clay witness with Low level ballistic impact test.....	99
5.8 Effect of number of piles of Kevlar-reinforced 40/60 PC/ABS composite after ballistic impact with NIJ standard level IIIA	101

TABLE	PAGE
5.9 Effect of panel arrangement of Kevlar-reinforced 40/60 PC/ABS composite after ballistic impact with NIJ standard level IIIA	102