

การฉายตัวของทลาคทิกทอติสไตรีนผสมแป้งมันสำปะหลังกราฟต์ด้วยสไตรีน



นางสาวดาวลักษณ์ วิทยาพิเชฐ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-078-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DEGRADATION OF STYRENE-G-CASSAVA STARCH FILLED
POLYSTYRENE PLASTICS**

MISS SAOWALUCK WITTAYAPICHET

สถาบันวิทยบริการ

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science**

Program of Petrochemistry and Polymer Science

Graduate School

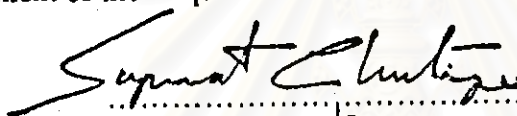
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-078-8

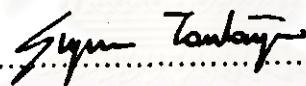
Thesis title DEGRADATION OF STYRENE-G-CASSAVA STARCH
 FILLED POLYSTYRENE PLASTICS
By Miss Saowaluck Wittayapichet
Department Petrochemistry and Polymer Science
Thesis Advisor Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D.
Thesis Co-advisors Mr. Manit Sonsuk, M.S.
 Professor Pattarapan Prasassarakich, Ph.D.

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


.....
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

Dean of Graduate School

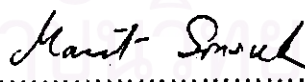
Thesis Committee


.....
(Associate Professor Supawan Tantayanon, Ph.D.)

Chairman


.....
(Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D.)

Thesis Advisor


.....
(Mr. Manit Sonsuk, M.S.)

Thesis Co-advisor


.....
(Professor Pattarapan Prasassarakich, Ph.D.)

Thesis Co-advisor


.....
(Assistant Professor Pin-Chawee Vejjanukroh, Ph.D.)

Member

เสาวลักษณ์ วิทยาพิเชฐ: การสลายตัวของพลาสดิกพอลิสไตรีนผสมแป้งมันสำปะหลัง
กราฟต์ด้วยสไตรีน อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์: รศ. ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์. อ. ที่ปริกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม: นายมานิตย์ ช้อนสุข, ศ. ดร. ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ, 167 หน้า.
ISBN 974-638-078-8.

ได้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของสไตรีนและแป้งมันสำปะหลังโดยใช้วิธีการฉายรังสีแกมมา
พร้อมกัน ด้วย ^{60}Co และนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปผสมกับพลาสดิกพอลิสไตรีน เพื่อศึกษาการย่อย
สลายของพลาสดิก ในการวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังและมอนอเมอร์สไตรีนอย่างละ 4 กรัมผสมกับน้ำ 1
ลูกบาศก์เซ็นติเมตร และเมทานอล 1.5 ลูกบาศก์เซ็นติเมตร หลังจากนั้นนำไปผ่านการฉายรังสีแกมมาที่
ปริมาณรังสีค่าต่างๆ จาก 2 ถึง 16 kGy โดยมีอัตราการเปล่งรังสีเท่ากับ $2.5 \times 10^3 \text{ kGy}\cdot\text{s}^{-1}$ โคพอลิเมอร์ที่ได้
นำมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณไฮโดรพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ประสิทธิภาพในการเกิดกราฟต์ ดัชนีในการเกิด
กราฟต์ ร้อยละของการเกิดพอลิเมอร์ และเปอร์เซ็นต์แอสคอน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณรังสีที่
ได้รับมีค่าเท่ากับ 10 kGy ให้ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์สูงสุด (62.6%) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลที่เกิด
ขึ้นจากการเติมกรดในตริกที่มีส่วนในการเพิ่มประสิทธิภาพการกราฟต์ระหว่างสไตรีนและแป้งมัน
สำปะหลัง

พลาสดิกพอลิสไตรีนโคพอลิเมอร์ธรรมชาติไม่สามารถสลายตัวได้ด้วยตนเอง จึงได้นำพลาสดิกพอลิสไตรีน
ผสมแป้งมันสำปะหลังและกราฟต์โคพอลิเมอร์ มาทดสอบการสลายตัวด้วยการตากแดดภายนอกบ้าน
การฝังดิน การฉายรังสีแกมมา รังสียูวี และทดสอบความทนของพลาสดิกต่อแบคทีเรีย การสลายตัวทุก
กระบวนการติดตามได้โดยทำการวัดสมบัติแรงดึง วัดขอบเขตการสลายตัวด้วยค่าของหมู่คาร์บอนิล วัดค่า
น้ำหนักโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ย และวัดสมบัติทางความร้อนของพลาสดิก จากการทดลอง
พบว่าพลาสดิกพอลิสไตรีนผสมกราฟต์โคพอลิเมอร์สูญเสียสมบัติทางกายภาพอย่างรวดเร็วหลังได้รับแสง
แดดนอกบ้าน ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการฉายรังสีแกมมาและรังสียูวี โดยสามารถยืนยัน
ผลที่ได้จากการคำนวณค่าพลังงานการกระตุ้น ซึ่งพบว่าพลาสดิกพอลิสไตรีนที่ผสมกราฟต์โคพอลิเมอร์
นี้มีค่าพลังงานต่ำกว่าพลาสดิกควบคุมของพอลิสไตรีน ผลนี้มีค่าตรงกันข้ามกับการรับแสงภายในบ้าน พบ
ว่าสมบัติทางกายภาพของพลาสดิกที่เก็บไว้ในบ้านนานกว่าหกเดือนไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ การฝังดิน
ของพลาสดิกดังกล่าวพบว่าใช้เวลานานกว่าการรับแสงแดดนอกบ้าน สำหรับความทนของพลาสดิกต่อ
แบคทีเรีย *Bacillus coagulans* 352 นั้น พบว่าพลาสดิกมีรูเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากแป้งถูกย่อย
สลาย แสดงว่าแบคทีเรียส่งเสริมการสลายตัวเชิงชีวภาพของพลาสดิกพอลิสไตรีนก่อนที่การสลายอื่นๆจะ
เกิดขึ้น

ภาควิชา
สาขาวิชา
ชื่อเรื่อง
ชื่อผู้วิจัย
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ชื่อสถาบัน
ชื่อหน่วยงาน
ชื่อจังหวัด
ชื่อประเทศ

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

POLYSTYRENE / CASSAVA STARCH / GAMMA RADIATION
SAOWALUCK WITTAYAPICHET: DEGRADATION OF STYRENE-G-CASSAVA
STARCH FILLED POLYSTYRENE PLASTICS. THESIS ADVISOR: ASSOC.
PROF. SUDA KIATKAMJORNWONG. Ph.D. THESIS CO-ADVISORS: MR.
MANIT SONSUK. M.S.. PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH. Ph.D. 167
pp. ISBN 974-638-078-8.

Starch-g-polystyrene copolymers were prepared by a simultaneous irradiation technique of γ -rays from a ^{60}Co -source. The graft copolymers were used as part of the styrene-based polymer for a study of the degradation of the plastic. Starch (4 g) and styrene monomer (4 g) were blended with 1 cm³ water and 1.5 cm³ of methanol and the mixture was irradiated by gamma rays to various total doses ranging from 2 to 16 kGy at a fixed dose rate of 2.5×10^{-3} kGy.s⁻¹. The copolymers were characterized in terms of the homopolymer content, grafting efficiency, grafting ratio, conversion, and percent add-on. The highest %grafting efficiency (62.2%) was obtained at a total dose of 10 kGy. The effects of nitric acid inclusion for enhancing the grafting of styrene onto cassava starch were also studied.

Polystyrene plastics cannot disintegrate naturally by itself. The degradations of polystyrene plastics containing cassava starch and graft copolymers were investigated by outdoor exposure, soil burial test, gamma radiation, UV irradiation, and the resistance of the plastic to bacteria. All degradation processes were followed by monitoring tensile properties, the extent of degradation by carbonyl index, molecular weights and distribution, and thermal property of the plastic. It was found that the graft copolymer-filled PS sheet lost their physical properties rapidly by outdoor exposure, similarly with gamma and UV irradiations evidenced by calculating activation energies of the plastics. The PS plastics containing the graft copolymer need less activation energy to start a decomposition process than that of the control PS plastics. The indoor exposure test gave the opposite result. All the plastics took a longer time to degrade by soil burial test. *Bacillus coagulans* 352 was used for a test of biodegradability resistance of the plastic sheets to bacteria. The composite PS sheets revealed the destroyed areas of starch, indicating that the bacteria help promote the biodegradation of polystyrene plastics before other disintegrations take place.

ภาควิชา.....
สาขาวิชา.....
ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อผู้จัดทำ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to express her sincere gratitude to her main thesis advisor, Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D. and co-advisor, Mr. Manit Sonsuk, M.S., for their tireless assistance and suggestions of valuable points of the experiments and encouragement throughout the course of this research. Their professional assistance enables the success of current research work. She would also like to thank Professor Pattarapan Prasassarakich for serving as a thesis co-advisor, Associate Professor Supawan Tantayanon, Ph.D., Assistant Professor Pin-Chawee Vejjanukroh, Ph.D. for serving on thesis committee. She is very grateful to Assistant Professor Pin-Chawee Vejjanukroh, Ph.D., for her kind suggestion and assistance in bacterium experiments. Appreciations are also expressed to the Graduate School of Chulalongkorn University for the partial financial support, the Office of Atomic Energy for Peace, the Departments of General Science, and the Department of Photographic Science and Printing Technology, Faculty of Science for providing the facilities in laboratory, equipment, and the necessary chemicals.

Last but certainly not least, she would like to extend her appreciation to Mr. Chai Theingthum, her parents, brothers, and sisters, and friends whose names are not mentioned here for having given their encouragements and love throughout the study for the Masters degree.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT (in Thai).....	iv
ABSTRACT (in English).....	v
ACKNOWLEDGMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	x
LIST OF FIGURES.....	xiii
ABBREVIATIONS.....	xviii
CHAPTER 1: INTRODUCTION.....	1
1.1 Scientific Background and Rationale.....	1
1.2 Objectives.....	2
1.3 Expected Benefits Obtained from Development of the Research.....	3
1.4 Scope of the Investigation.....	3
1.5 Content of the Thesis.....	4
CHAPTER 2: THEORETICAL CONSIDERATION AND LITERATURE REVIEW.....	6
2.1 Gamma Rays.....	6
2.2 Starch.....	7
2.2.1 Chemistry of Starch.....	7
2.2.2 Molecular Structure.....	8
2.3 Free Radical Graft Copolymerization of Starch by Radiation Methods.....	9
2.3.1 The Different Methods of Radiation Grafting.....	10
2.3.2 Kinetic Features of Radiation Grafting.....	12
2.3.3 Radiation-Induced Crosslinking and Degradation.....	14
2.4 Terminology and Definition.....	15
2.5 Polystyrene.....	17
2.6 Definitions of Degradation Terms.....	18
2.7 Starch-Containing Plastics.....	20
2.8 Literature Review.....	21

CONTENTS (continued)

	PAGE
CHAPTER 3: EXPERIMENTAL.....	28
3.1 Chemicals, Equipment and Glassware.....	28
3.2 Preparation Scheme.....	31
3.3 Procedure.....	32
3.3.1 Grafting of Styrene onto Cassava Starch by Simultaneous Irradiation.....	32
3.3.2 Homopolymer Extraction by Toluene.....	32
3.3.3 Copolymer Characterization.....	33
3.3.4 Compounding of Plastic Materials.....	34
3.3.5 Compression Molding.....	34
3.3.6 Outdoor Natural Exposure Test.....	36
3.3.7 Indoor Exposure Test.....	36
3.3.8 Soil Burial Test.....	38
3.3.9 Gamma Radiation Test.....	38
3.3.10 UV Irradiation Test.....	38
3.3.11 Biodegradation Test.....	38
CHAPTER 4: RESULTS AND DISCUSSION.....	41
4.1 Infrared Analyses.....	41
4.2 Grafting of Styrene onto Cassava Starch.....	47
4.2.1 Effect of Total Dose on Graft Copolymerization.....	47
4.2.1.1 Relationship between Total Dose and Percent Homopolymer.....	47
4.2.1.2 Relationship between Total Dose and Grafting Efficiency.....	48
4.2.1.3 Relationship between Total Dose and Percent Conversion.....	49
4.2.1.4 Relationship between Total Dose and Percent Add-on.....	49

CONTENTS (continued)

	PAGE
4.2.1.5 Relationship between Total Dose and Grafting Ratio.....	51
4.2.2 Effect of Nitric Acid on Graft Copolymerization.....	51
4.3 The Plastic Compounding and Degradation Testing.....	52
4.3.1 Effect of Starch and Graft Copolymer Contents on Mechanical Properties of Polystyrene Plastics.....	53
4.3.2 Sample Natural Exposure Test.....	56
4.3.2.1 Tensile Property Measurements.....	57
4.3.2.2 Fourier Transform Infrared Absorption Measurements.....	67
4.3.2.3 Molecular Weight Measurements.....	77
4.3.2.3 Thermal Property Measurements.....	81
4.3.3 Soil Burial Test.....	86
4.3.3.1 Tensile Property Measurements.....	86
4.3.3.2 Surface Morphology of the Samples.....	94
4.3.4 Gamma Irradiation Test.....	98
4.3.4.1 Tensile Property Measurements.....	98
4.3.4.2 Hardness Property Measurements.....	104
4.3.4.3 Fourier Transform Infrared Absorption Measurements.....	105
4.3.4.4 Molecular Weight Measurements.....	112
4.3.4.5 Thermal Property Measurements.....	115
4.3.5 UV Irradiation Test.....	119
4.3.5.1 Hardness Property Measurements.....	119
4.3.5.2 Fourier Transform Infrared Absorption Measurements.....	120
4.3.5.3 Molecular Weight Measurements.....	127
4.3.5.4 Thermal Property Measurements.....	130
4.3.6 Biodegradation Test.....	134

CONTENTS (continued)

	PAGE
CHAPTER 5: CONCLUSION AND SUGGESTION.....	139
Conclusion.....	139
Suggestion.....	141
REFERENCES.....	144
APPENDIX A: RADIATION DOSIMETRY.....	148
APPENDIX B: GEL PERMEATION CHROMATOGRAPHY.....	152
VITA.....	167



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
3.1 Properties of Polystyrene (GPPS grade).....	29
3.2 Chemical and Physical Properties of Zinc Stearate.....	30
3.3 Typical Properties of Epolene Wax.....	30
3.4 The Composition of Starch-Polystyrene Sheets.....	35
3.5 Meteorological Data from July – December 1997.....	36
4.1 Effect of Total Dose (kGy) on the Grafting of Styrene onto Granular Cassava Starch.....	47
4.2 Effect of Nitric Acid on Graft Copolymerization.....	51
4.3 Tensile Properties of PS and Composite PS sheets at Various Contents of Soya Oil and Zinc Stearate.....	53
4.4 Tensile Properties of PS and Composite PS sheets during Outdoor Exposure.....	58
4.5 Tensile Properties of PS and Composite PS sheets during Indoor Exposure..	65
4.6 Changes in the Carbonyl Indexes of PS and PS-G15/36 sheets of the Control and 6-Month Outdoor Exposure.....	67
4.7 The Calibration Data of Shodex Polystyrene Standard S-66.0.....	78
4.8 Average Molecular Weights and Molecular Weight Distribution of PS and PS-G15/36 sheets during Outdoor Exposure.....	79
4.9 Tensile Properties of PS and Composite PS sheets during Soil Burial Test.....	87
4.10 Tensile Properties of PS and Composite PS sheets during Gamma Radiation.....	98
4.11 Shore A Hardness Measurements of PS and PS-G15/36 sheets.....	104
4.12 Change in the Carbonyl Indexes of PS and PS-G15/36 sheets of Control and 300 kGy Total Irradiation Dose.....	105
4.13 Average Molecular Weights and Molecular Weight Distribution of PS and PS-G15/36 sheets during Gamma Radiation.....	113
4.14 Shore A Hardness Measurements of the PS and PS-G15/36 sheets.....	119

LIST OF TABLES (continued)

TABLE	PAGE
4.15 Change in the Carbonyl Indexes of PS and PS-G15/36 sheets of Control and 21-Hour UV Irradiation	120
4.16 Average Molecular Weights and Molecular Weight Distribution of PS and PS-G15/36 sheets during UV Irradiation.....	128
5.1 Properties of PS and PS-G15/36 sheets at various degradation test.....	143



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF FIGURES

FIGURES	PAGE
2.1 Chemical Structure of Amylose Chain.....	9
2.2 Branched Structure of Amylopectin.....	9
3.1 The Preparation of Starch-g-Polystyrene, Characterization of the Graft Copolymer and their Blend with Polystyrene.....	31
3.2 Average Monthly Temperature and Relative Humidity of Bangkok, Thailand, from July 1997 to December 1997.....	37
3.3 Total monthly Rainfall (from July 1997 to December 1997) and Solar Radiation (from July 1996 to December 1996) of Bangkok, Thailand.....	37
4.1 Infrared Spectrum of Cassava Starch.....	42
4.2 Infrared Spectrum of Polystyrene.....	43
4.3 Infrared Spectrum of the Graft Copolymer of Cassava Starch-g-Polystyrene before Extraction.....	44
4.4 Infrared Spectrum of Graft Copolymer of Cassava Starch-g-Polystyrene after Extraction with Toluene.....	45
4.5 Infrared Spectrum of the Graft Polystyrene after Acid Hydrolysis.....	46
4.6 Effect of Total Dose on Percent Homopolymer.....	48
4.7 Effect of Total Dose on Grafting Efficiency.....	49
4.8 Effect of Total Dose on Percent Conversion.....	50
4.9 Effect of Total Dose on Percent Add-on.....	50
4.10 Effect of Total Dose on Grafting Ratio.....	51
4.11 Effect of Zinc Stearate on Tensile Strength of Control Composite PS sheets at 8% of Soya oil.....	55
4.12 Effect of Soya oil on Tensile Strength of Control Composite PS sheets at 0.4% of Zinc Stearate.....	56
4.13 Tensile Properties of PS and PS-S5-G5/1-9 sheets during Outdoor Exposure.....	60
4.14 Tensile Properties of PS and PS-S5-G10/10-18 sheets during Outdoor Exposure.....	61

LIST OF FIGURES (continued)

FIGURE	PAGE
4.15 Tensile Properties of PS and PS-S15/19-27 sheets during Outdoor Exposure.....	62
4.16 Tensile Properties of PS and PS-G15/28-36 sheets during Outdoor Exposure.....	63
4.17 Effect of Starch and Graft Copolymer Content on Tensile Strength of Composite PS sheets at 8% Soya Oil and 0.4% Zinc Stearate for Outdoor Exposure.....	64
4.18 Effect of Zinc Stearate Content on Tensile Strength of PS-G15 sheets at 8% of Soya Oil for Outdoor Exposure.....	64
4.19 Tensile Properties of PS and Composite PS sheets during Indoor Exposure.....	66
4.20 Infrared Spectrum of Control PS sheet.....	68
4.21 Infrared Spectrum of PS sheet at 3-Month Outdoor Exposure.....	69
4.22 Infrared Spectrum of PS sheet at 6-Month Outdoor Exposure.....	70
4.23 Infrared Spectrum of Control PS-G15/36 sheet.....	71
4.24 Infrared Spectrum of PS-G15/36 sheet at 3-Month Outdoor Exposure.....	72
4.25 Infrared Spectrum of PS-G15/36 sheet at 6-Month Outdoor Exposure.....	73
4.26 The Carbonyl Indexes of PS and PS-G15/36 sheets of Control, 3- and 6-Month Outdoor Exposure.....	74
4.27 Mechanism of Photooxidation Reaction of Polystyrene.....	75
4.28 The Calibration Curve of Shodex Polystyrene Standard S-66.0.....	78
4.29 Weight-Average Molecular Weights of PS and PS-G15/36 sheets of Outdoor Exposure.....	80
4.30 TGA Thermogram of Control PS sheet.....	83
4.31 TGA Thermogram of PS sheet at 6-Month Outdoor Exposure.....	83
4.32 TGA Thermograms of Control PS-G15/36 sheet.....	84
4.33 TGA Thermograms of PS-G15/36 sheet at 6-Month Outdoor Exposure.....	85
4.34 Tensile Strength of PS and PS-S5-G5/1-9 sheets of Soil Burial Test.....	89

LIST OF FIGURES (continued)

FIGURE	PAGE
4.35 Tensile Strength of PS and PS-S5-G10/10-18 sheets of Soil Burial Test.....	90
4.36 Tensile Strength of PS and PS-S15/19-27 sheets of Soil Burial Test.....	91
4.37 Tensile Strength of PS and PS-G15/28-36 sheets of Soil Burial Test.....	92
4.38 Effect of Starch and Graft Copolymer Content on Tensile Strength of Composite PS sheets at 8% Soya Oil and 0.4% Zinc Stearate for Soil Burial Test.....	93
4.39 Effect of Zinc Stearate Content on Tensile Strength of PS-G15 sheets at 8% of Soya Oil for Soil Burial Test.....	93
4.40 SEM Micrograph of Control PS sheet.....	95
4.41 SEM Micrograph of PS sheet at 6-Month Soil Burial Test.....	95
4.42 SEM Micrograph of PS-S5-G5/9 sheet at 6-Month Soil Burial Test.....	96
4.43 SEM Micrograph of PS-S5-G10/18 sheet at 6-Month Soil Burial Test.....	96
4.44 SEM Micrograph of PS-S15/27 sheet at 6-Month Soil Burial Test.....	97
4.45 SEM Micrograph of PS-G15/36 sheet at 6-Month Soil Burial Test.....	97
4.46 Tensile Strength of PS, PS-S5-G5 and PS-S5-G10 sheets of Gamma Irradiation.....	101
4.47 Tensile Strength of PS, PS-S15 and PS-G15 sheets of Gamma Irradiation.....	102
4.48 Effect of Starch and Graft Copolymer Content on Tensile Strength of Composite PS sheets at 8% Soya Oil and 0.4% Zinc Stearate of Gamma Irradiation.....	103
4.49 Effect of Zinc Stearate Content on Tensile Strength of PS-G15 sheets at 8% of Soya Oil of Gamma Irradiation.....	103
4.50 Shore A Hardness Measurements as a Function of Total Irradiation Dose for PS and PS-G15/36 sheets.....	104
4.51 Infrared Spectrum of Control PS sheet.....	106
4.52 Infrared Spectrum of PS sheet at 100 kGy Absorbed Dose.....	107
4.53 Infrared Spectrum of PS sheet at 300 kGy Absorbed Dose.....	108

LIST OF FIGURES (continued)

FIGURE	PAGE
4.54 Infrared Spectrum of Control PS-G15/36 sheet.....	109
4.55 Infrared Spectrum of PS-G15/36 sheet at 100 kGy Absorbed Dose.....	110
4.56 Infrared Spectrum of PS-G15/36 sheet at 300 kGy Absorbed Dose.....	111
4.57 The Carbonyl Indexes of PS and PS-G15/36 sheets of Control, 100 and 300 kGy Absorbed Dose.....	112
4.58 Weight-Average Molecular Weights of PS and PS-G15/36 sheets during Gamma Irradiation.....	114
4.59 TGA Thermogram of Control PS sheet.....	116
4.60 TGA Thermogram of PS sheet at 300 kGy Absorbed Dose.....	116
4.61 TGA Thermograms of Control PS-G15/36 sheet.....	117
4.62 TGA Thermograms of PS-G15/36 sheet at 300 kGy Absorbed Dose.....	118
4.63 Shore A Hardness Measurements as a Function of UV Irradiation Time for PS and PS-G15/36 sheets.....	119
4.64 Infrared Spectrum of Control PS sheet.....	121
4.65 Infrared Spectrum of PS sheet at 10-Hour UV Irradiation Time.....	122
4.66 Infrared Spectrum of PS sheet at 21-Hour UV Irradiation Time.....	123
4.67 Infrared Spectrum of Control PS-G15/36 sheet.....	124
4.68 Infrared Spectrum of PS-G15/36 sheet at 10-Hour Irradiation Time.....	125
4.69 Infrared Spectrum of PS-G15/36 sheet at 21-Hour Irradiation Time.....	126
4.70 The Carbonyl Indexes of PS and PS-G15/36 sheets of Control, 10- and 21-Hour UV Irradiation Time.....	127
4.71 Weight-Average Molecular Weights of PS and PS-G15/36 sheets during UV Irradiation.....	129
4.72 TGA Thermogram of Control PS sheet.....	131
4.73 TGA Thermogram of PS sheet at 21-Hour UV Irradiation Time.....	131
4.74 TGA Thermograms of Control PS-G15/36 sheet.....	132
4.75 TGA Thermograms of PS-G15/36 sheet at 21-Hour UV Irradiation Time....	133
4.76 SEM Micrographs of PS-S5-G5/9 sheet attacked by <i>Bacillus coagulans</i> 352.....	135

LIST OF FIGURES (continued)

FIGURE	PAGE
4.77 SEM Micrographs of PS-S5-G10/18 sheet attacked by <i>Bacillus coagulans</i> 352.....	136
4.78 SEM Micrographs of PS-S15/27 sheet attacked by <i>Bacillus coagulans</i> 352.....	137
4.79 SEM Micrographs of PS-G15/36 sheet attacked by <i>Bacillus coagulans</i> 352.....	138
B-1 GPC Chromatograph of Control PS sheet.....	153
B-2 GPC Chromatograph of PS sheet at 3-Month Outdoor Exposure.....	154
B-3 GPC Chromatograph of PS sheet at 6-Month Outdoor Exposure.....	155
B-4 GPC Chromatograph of PS sheet at 100 kGy Absorbed Dose.....	156
B-5 GPC Chromatograph of PS sheet at 300 kGy Absorbed Dose.....	157
B-6 GPC Chromatograph of PS sheet at 10-Hour UV Irradiation Time.....	158
B-7 GPC Chromatograph of PS sheet at 21-Hour UV Irradiation Time.....	159
B-8 GPC Chromatograph of Control PS-G15/36 sheet.....	160
B-9 GPC Chromatograph of PS-G15/36 sheet at 3-Month Outdoor Exposure.....	161
B-10 GPC Chromatograph of PS-G15/36 sheet at 6-Month Outdoor Exposure.....	162
B-11 GPC Chromatograph of PS-G15/36 sheet at 100 kGy Absorbed Dose.....	163
B-12 GPC Chromatograph of PS-G15/36 sheet at 300 kGy Absorbed Dose.....	164
B-13 GPC Chromatograph of PS-G15/36 sheet at 10-Hour UV Irradiation Time..	165
B-14 GPC Chromatograph of PS-G15/36 sheet at 21-Hour UV Irradiation Time..	166

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF ABBREVIATIONS

^{60}Co	cobalt-60
G value	is measure of radiation sensitivity as the number of free radicals formed per 100 e.v. absorbed
kGy	kilogray
I	intensity of radiation
P	backbone polymer
P	polymer radical
$\text{PM}_{m+1}, \text{PM}_{n-1}$ or PM_{m-n}	graft copolymers
M	grafting monomer
r	rate of initiation of polymer radicals
r_i	rate of initiation of graft reaction
r_p	rate of propagation reaction
r_t	rate of termination reaction
k_i	rate constant for initiation of polymer radicals
k_p	propagation rate constant
k_t	termination rate constant
\bar{M}_n	number-average molecular weight
\bar{M}_w	weight-average molecular weight
M_v	viscosity-average molecular weight
T_g	glass transition temperature
PS	polystyrene
S	starch
G	graft copolymer