

การทำให้พอลิพรพิลินแข็งเหนียวด้วยยางรถยนต์รีไซเคิล

นางสาวสุกัญญา จ้อยขำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0001-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**TOUGHENING OF POLYPROPYLENE WITH RECYCLED TIRE-RUBBER**

**Miss Sukunya Juikham**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science**

**Program of Petrochemistry and Polymer Science**

**Faculty of Science**

**Chulalongkorn University**

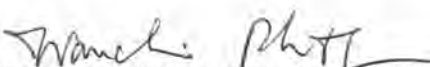
**Academic Year 2000**

**ISBN 974-13-0001-8**


**Thesis Title** Toughening of Polypropylene with Recycled Tire-Rubber  
**By** Miss Sukunya Juikham  
**Department** Petrochemistry and Polymer Science  
**Thesis Advisor** Associate Professor Supawan Tantayanon, Ph.D.

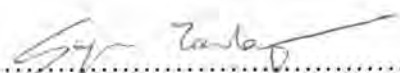
---


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

.....Dean of Faculty of Science  
(Associate Professor Wanchai Phothiphichitr, Ph.D.)

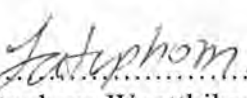
#### Thesis Committee

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

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

..... Member  
(Associate Professor Chaiyoot Changsarn, Ph.D.)

..... Member  
(Assistant Professor Warintorn Chavasiri, Ph.D.)

..... Member  
(Dr. Jatuphorn Wootthikanokkhan, Ph.D.)

**สัปดาห์ จุ้ยขำ : การทำให้พอลิโพรพิลีนแข็งเหนียวด้วยยางรถยนต์รีไซเคิล (TOUGHENING OF POLYPROPYLENE WITH RECYCLED TIRE-RUBBER) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ศุภวรรณ ตันตยานนท์, 107 หน้า. ISBN 974-13-0001-8**


ได้ศึกษาการผสมแบบอิมมิลิเบลของยางรถยนต์รีไซเคิลซึ่งเป็นยางผง หรือยางรีไซเคิลกับโพลิโพรพิลีน การวิเคราะห์แบบทีจีเอได้แสดงว่ายางรีไซเคิลเป็นของผสมแบบอิมมิลิเบลของยางธรรมชาติ ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน และยางบิวทาไดอีน ขณะที่ยางผงเป็นของผสมของยางธรรมชาติที่วัลคาไนส์ ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีนที่วัลคาไนส์ และยางบิวทาไดอีนที่วัลคาไนส์ ของผสมระหว่างยางรถยนต์รีไซเคิลกับโพลิโพรพิลีนเตรียมได้โดยการผสมแบบหลอมอย่างต่อเนื่องในเครื่องผสม 2 ชนิด คือ เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง และเครื่องผสมอัดรีดแบบสกรูคู่ ระหว่างการผสมในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งได้เติมสารเชื่อมขวาง คือ ซัลเฟอร์ กับสารเติมแต่งอีก หรือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ หลังจากการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนแรงกระแทก ได้ตรวจสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงานเหล่านี้ นอกจากนี้ยังตรวจสอบค่าดัชนีการไหล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาเชิงพื้นผิวของของผสมเหล่านี้ด้วย ได้พบว่าของผสมของโพลิโพรพิลีนและยางผง แต่ละขนาดซึ่งใช้ 3 ขนาดด้วยกัน ที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกันซึ่งสูงกว่าโพลิโพรพิลีนเล็กน้อย อย่างไรก็ตามได้พบว่าของผสมที่ใช้ยางผงขนาด 40 เมช มีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุดทั้งที่ทำวัลคาไนเซชันโดยใช้ซัลเฟอร์เป็นสารเชื่อมขวางและที่ไม่ได้ทำวัลคาไนเซชัน ในกรณีของของผสมของโพลิโพรพิลีนและยางรีไซเคิล ได้ใช้อัตราส่วนผสมต่างๆกัน ได้แก่ 80/20 70/30 และ 60/40 โดยทำวัลคาไนเซชันด้วยซัลเฟอร์ และไม่ได้ทำวัลคาไนเซชัน พบว่าของผสมที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุดทั้งที่ทำวัลคาไนเซชัน และไม่ได้ทำวัลคาไนเซชัน เมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ได้พบว่าของผสมของโพลิโพรพิลีนและยางรีไซเคิลที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าความทนแรงกระแทกสูงมากขึ้นอีก เหตุผลเนื่องมาจากโคอีชันระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ในแต่ละเฟส คือ เฟสของโพลิโพรพิลีน และเฟสของยางรีไซเคิล และแอดฮีชันระหว่างสายโซ่โพลิโพรพิลีนในเฟสของโพลิโพรพิลีนกับสายโซ่ของยางรีไซเคิลในเฟสของยางรีไซเคิล ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่การแพร่และการกระจายของยางรีไซเคิลในเฟสของโพลิโพรพิลีนได้ดี ซึ่งได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในสแกนิงอิเล็กตรอนไมโครกราฟของของผสมเหล่านี้

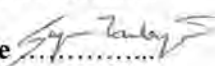
สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
หลักสูตร ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

**# # 4172489323 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE**  
**KEY WORD : GROUND RUBBER TIRE / RECLAIMED TIRE-RUBBER /**  
**MORPHOLOGY / CRYSTALLINITY / RHEOLOGY**  
**SUKUNYA JUIKHAM: TOUGHENING OF POLYPROPYLENE**  
**WITH RECYCLED TIRE-RUBBER. THESIS ADVISOR**  
**ASSOC. PROF. SUPAWAN TANTAYANON, Ph.D. pp.107**  
**ISBN 974-13-0001-8**

The immiscible blends of recycled tire rubber, either reclaimed tire-rubber or ground rubber tire and homopolypropylene had been investigated. TGA demonstrated that reclaimed tire-rubber was the miscible mixture of devulcanized natural rubber, styrene-butadiene rubber and butadiene rubber, whereas ground rubber tire was the mixture of vulcanized natural rubber, styrene-butadiene rubber and butadiene rubber. These blends were prepared by melt-mixing in two consecutive machines, firstly a two-roll mill and then a counter-rotating twin screw extruder. Two types of crosslinking agents, sulfur with other additives or maleic anhydride and dicumyl peroxide, were added into the blend during milling. After injection to the impact specimens, they were subjected to the measurement for their notch-Izod impact strength. In addition, the melt flow index, thermal properties and surface morphology of these blends were also observed. It was found that homopolypropylene/ground rubber tire blends, with three different mesh sizes of ground rubber tire, at the ratio of 70/30 had similar impact strength which were slightly higher than homopolypropylene. However, it was observed that homopolypropylene/ground rubber tire blend, containing ground rubber tire with mesh size of 40, exhibited the highest impact strength for both vulcanization using sulfur crosslinking agent and non-vulcanization. In case of homopolypropylene/reclaimed tire-rubber blends, various ratios, i.e., 80/20, 70/30 and 60/40, were attempted both with vulcanization using sulfur crosslinking agent and without vulcanization. The homopolypropylene/reclaimed tire-rubber blends at 70/30 had highest impact strength for both vulcanized and non-vulcanized blends. When maleic anhydride/dicumyl peroxide was used, it was found that higher impact strength of the homopolypropylene/reclaimed tire-rubber blend at 70/30 was obtained. This could be attributed to the cohesion between the polymer chains in each phase, homopolypropylene phase and rubber phase, and the interfacial adhesion between homopolypropylene and reclaimed tire-rubber chains in these two phases. Such phenomena would lead to good dispersion and distribution of reclaimed tire-rubber in homopolypropylene matrix as clearly exhibited in their scanning electron micrographs.

**Field of studies** Petrochemistry and Polymer Science **Student's signature**.....

**Program** Petrochemistry and Polymer Science **Advisor's signature**.....

**Academic year** 2000

## ACKNOWLEDGEMENT

I want to thank Associate Professor Dr. Supawan Tantayanon, my advisor, for her suggestions, guidance and encouragement during my research and for reviewing my thesis.

I am also grateful to Professor Dr. Pattarapan Prassarakich, Associate Professor Chaiyoot Changsarn, Assistant Professor Dr. Warintorn Chavasiri and Dr. Jatuphorn Wootthikanokkhan for serving as chairperson and members of the thesis committee, respectively.

In addition, I would like to thank HMC Polymers Co., Ltd., for donating the virgin polypropylene. Special thanks is extended to King Mongkut's University of Technology Thonburi, Chulalongkorn University and Mahidol University for allowing me use of their library facilities. Furthermore, the Faculty of Chemistry, and the School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Petroleum and Petrochemical College, Mr. Roongroj Phoogpan, the production controller, Thai Petrochemical Industry (Public) Co., Ltd. For access to their research instruments. Without all of this kind support my research would not have been possible.

Finally, I wish to express to my gratitude to my family for their encouragement and moral support. Many thanks to my friends and colleagues, whose names are too numerous to mention here, who contributed suggestions and support during the course of my research.

## CONTENTS

|   | <b>PAGE</b> |
|---|-------------|
| ABSTRACT (IN THAI).....                                       | iv          |
| ABSTRACT (IN ENGLISH).....                                    | v           |
| ACKNOWLEDGMENT.....   | vi          |
| CONTENTS.....   | vii         |
| LIST OF TABLES.....   | xi          |
| LIST OF FIGURES.....  | xii         |
| LIST OF SCHEMES.....  | xv          |
| LIST OF ABBREVIATIONS.....                                    | xvi         |
| <br>CHAPTER I: INTRODUCTION                                   |             |
| 1.1 Introduction.....   | 1           |
| 1.2 Objective.....  | 2           |
| 1.3 Scope of the Research.....                                | 2           |
| <br>CHAPTER II : THEORETICAL BACKGROUND                       |             |
| 2.1 Reclaimed Tire-Rubber.....                                | 4           |
| 2.1.1 Definitions.....  | 4           |
| 2.1.2 Reclaimed Rubber Production.....                        | 4           |
| 2.1.2.1 Digester Process.....                                 | 5           |
| 2.1.2.2 Heater or Pan Process.....                            | 6           |
| 2.1.2.3 Reclaimator Process.....                              | 7           |
| 2.1.2.4 Further Advantages of Reclaiming and Applications...7 |             |
| 2.2 Blending Method.....                                      | 9           |



**CONTENTS (continued)**

|   | <b>PAGE</b> |
|---|-------------|
| 2.3 Types of Dynamic Crosslinking in Thermoplastic Elastomer (TPE)..... | 9           |
| 2.3.1 Crosslinking with Peroxides.....                                  | 10          |
| 2.3.2 Crosslinking with Sulfur.....                                     | 12          |
| 2.3.3 Crosslinking with Sulfur Donors.....                              | 15          |
| 2.4 Maleic Anhydride Modified Polymer .....                             | 17          |
| 2.5 Rubber Toughening Mechanisms.....                                   | 18          |
| 2.5.1 Energy Absorption by Rubber Particles.....                        | 19          |
| 2.5.2 Matrix Crazing.....   | 20          |
| 2.5.3 Shear Yielding.....   | 21          |
| 2.5.4 Crazing and Shear Yielding.....                                   | 22          |
| 2.6 Parameters Effecting the Toughening.....                            | 23          |
| 2.6.1 Rubber Types.....   | 23          |
| 2.6.2 Loading of Rubber.....  | 23          |
| 2.6.3 Particle Size of Rubber.....                                      | 24          |
| 2.6.4 Rubber – Matrix Adhesion.....                                     | 25          |
| 2.6.5 Matrix Types.....   | 26          |
| 2.7 Crystallisation.....  | 26          |
| 2.7.1 Crystallisation of Polypropylene.....                             | 27          |
| 2.7.2 Crystallisation of Polypropylene Blends.....                      | 28          |
| 2.8 Literature Review.....  | 30          |

**CHAPTER III: EXPERIMENTAL PROCEDURE**

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.1 Materials.....              | 35 |
| 3.1.1 Polypropylene.....        | 35 |
| 3.1.2 Recycled Tire-Rubber..... | 35 |



## CONTENTS (continued)

|   | <b>PAGE</b> |
|---|-------------|
| 3.1.3 Antioxidant.....                        | 36          |
| 3.1.4 Crosslinking Agents.....                | 36          |
| 3.2 Instruments.....                          | 37          |
| 3.3 Experimental Procedure.....               | 37          |
| 3.3.1 Recycled Tire-Rubber Compositions.....  | 37          |
| 3.3.2 Composites Preparation.....             | 38          |
| 3.4 Measuring Notch-Izod Impact Strength..... | 40          |
| 3.5 Measuring Melt Flow Index (MFI) .....     | 41          |
| 3.6 Measuring Thermal Properties.....         | 42          |
| 3.7 Examination of Surface Morphology.....    | 42          |

## CHAPTER IV: RESULTS AND DISCUSSION

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Compositions of Recycled Tire-Rubber.....  | 43 |
| 4.2 Preparation of PP/Recycled Tire-Rubber Blends.....                               | 49 |
| 4.3 Effect of Blending Processes on Physical and Mechanical<br>Properties of PP..... | 50 |
| 4.4 PP/GRT Blends using Sulfur Crosslinking Agent.....                               | 51 |
| 4.5 PP/RTR Blends using Sulfur Crosslinking Agent.....                               | 56 |
| 4.5.1 Effect of RTR Loading.....   | 56 |
| 4.5.1.1 Effect of RTR Loading on Impact Strength.....                                | 57 |
| 4.5.1.2 Effect of RTR Loading on Morphology.....                                     | 61 |
| 4.5.1.3 Effect of RTR Loading on Thermal Properties.....                             | 64 |
| 4.5.1.4 Effect of RTR Loading on MFI.....  | 66 |

## CONTENTS (continued)

|   | PAGE |
|---|------|
| 4.6 Comparison of PP/RTR with PP/GRT Blends.....            | 69   |
| 4.7 PP/RTR Blends using MA/DCP.....                         | 71   |
| 4.7.1 Impact strength of PP/RTR blends using MA/DCP.....    | 72   |
| 4.7.1.1 Utilization of MA.....                              | 72   |
| 4.7.1.2 Utilization of DCP.....                             | 74   |
| 4.7.1.3 Utilization of MA and DCP.....                      | 76   |
| 4.7.2 Morphology of PP/RTR blends using MA/DCP.....         | 79   |
| 4.7.3 Thermal properties of PP/RTR blends using MA/DCP..... | 80   |
| 4.7.4 MFI of PP/RTR blends using MA/DCP.....                | 82   |
| 4.8 Reproducible melt-mixing of PP and RTR.....             | 84   |
| 4.9 Applications and Economics.....                         | 84   |
| CHAPTER V: CONCLUSION AND SUGGESTIONS                       |      |
| 5.1 Conclusion.....   | 86   |
| 5.2 Suggestions for Further Work.....                       | 87   |
| REFERENCES.....   | 88   |
| APPENDICES  |      |
| APPENDIX A.....   | 95   |
| APPENDIX B.....   | 96   |
| APPENDIX C.....   | 97   |
| APPENDIX D.....   | 105  |
| APPENDIX E.....   | 106  |
| VITA.....   | 107  |

## LIST OF TABLES

| TABLES  | PAGE |
|---|------|
| 3.1 The different mesh sizes of GRT .....   | 35   |
| 3.2 The component in crosslinking agents .....  | 36   |
| 3.3 Formulation of PP/RTR blends using sulfur crosslinking agent.....                                   | 39   |
| 3.4 Formulation of PP/GRT blends using MA/DCP.....  | 39   |
| 3.5 Formulation of PP/GRT blends using sulfur crosslinking agent.....                                   | 40   |
| 4.1 The components of recycled tire-rubber .....  | 46   |
| 4.2 Effect of blending processes on impact strength, MFI and percentage<br>crystallinity of PP.....     | 50   |
| 4.3 The notch-Izod impact strength and MFI of non-vulcanized and<br>vulcanized 70/30 PP/GRT blends..... | 52   |
| 4.4 The notch-Izod impact strength of PP/RTR blends at various RTR loading....                          | 58   |
| 4.5 Thermal analysis of vulcanized and non-vulcanized PP/RTR blends at<br>various RTR loading.....      | 64   |
| 4.6 The MFI of vulcanized and non-vulcanized PP/RTR blends at various<br>RTR loading .....              | 67   |
| 4.7 The notch-Izod impact strength of 70/30 PP/RTR and PP/GRT blends.....                               | 69   |
| 4.8 The notch-Izod impact strength of 70/30 PP/RTR blends using MA/DCP.....                             | 72   |
| 4.9 Thermal analysis of 70/30 PP/RTR blends using MA/DCP.....   | 81   |
| 4.10 The MFI of 70/30 PP/RTR blends using MA/DCP.....   | 82   |
| 4.11 The notch-Izod impact strength of three blends of 70/30 PP/RTR<br>using MA/DCP.....                | 84   |

## LIST OF FIGURES

| FIGURES   | PAGE |
|---|------|
| 2.1 Tire construction.....  | 3    |
| 2.2 Reclaimed rubber production diagram.....  | 5    |
| 2.3 Structural features of peroxide vulcanization.....  | 11   |
| 2.4 Structural features of vulcanizate network.....   | 13   |
| 2.5 An example of craze fibrils.....  | 20   |
| 2.6 An example of shear banding.....  | 22   |
| 2.7 Notched Izod impact strength at $-40^{\circ}\text{C}$ vs volume fraction of EPDM<br>in PA6. Particle size and interfacial adhesion are constant.....                                    | 24   |
| 2.8 Impact strength of PA6-EP blends as a function of particle size<br>(26 vol.% EP rubber; $20^{\circ}\text{C}$ ): the different symbols refer to different<br>manufacturing methods ..... | 25   |
| 2.9 Effect of microstructure and boundaries of crystalline polymers as<br>function of spherulite diameter.....  | 26   |
| 2.10 Fracture toughness of PP as a function of spherulite size :<br>(a) Coarse spherulitic (b) Fine spherulitic morphology .....  | 27   |
| 3.1 Dimensions of Izod-Type Test Specimen.....  | 41   |
| 4.1 TGA thermogram of ground rubber tire(GRT).....  | 44   |
| 4.2 TGA thermogram of reclaimed tire-rubber (RTR).....  | 45   |
| 4.3 DSC plot showing glass-transition temperature of<br>reclaimed tire-rubber (RTR).....  | 48   |
| 4.4 Plot of GRT particle sizes versus notch-Izod impact strength of<br>70/30 PP/GRT blends.....   | 53   |
| 4.5 Plot of GRT particle sizes versus MFI of 70/30 PP/GRT blends.....   | 53   |

## LIST OF FIGURES(continued)

| FIGURES  | PAGE |
|--|------|
| 4.6 SEM micrographs of : (a) non-vulcanized PP/GRT40 (70/30) blend<br>(b) vulcanized PP/GRT40 (70/30) blend.....   | 55   |
| 4.7 Effect of RTR loading on the notch-Izod impact strength of vulcanized<br>and non-vulcanized PP/RTR blends.....   | 59   |
| 4.8 SEM micrographs of non-vulcanized PP/RTR blends at 80/20(a),<br>70/30(b), 60/40(c), and vulcanized PP/RTR blends at 80/20(d),<br>70/30(e) and (f), 60/40 (g).....            | 63   |
| 4.9 DSC thermograms of the non-vulcanized PP/RTR blends at various<br>RTR loading.....   | 65   |
| 4.10 DSC thermograms of the vulcanized PP/RTR blends at various<br>RTR loading.....  | 65   |
| 4.11 Effect of RTR loading on MFI of vulcanized and non-vulcanized<br>PP/RTR blends.....   | 68   |
| 4.12 SEM micrographs of PP/GRT blends (a,b ; non-vulcanization and<br>vulcanization) and PP/RTR blends (c,d ; non-vulcanization and<br>vulcanization), at 70/30 blend ratio..... | 70   |
| 4.13 SEM micrographs of 70/30 PP/RTR blends: (a) no added, (b) with MA,<br>(c) with DCP, (d) with both MA and DCP.....   | 80   |
| 4.14 DSC thermographs of 70/30 PP/RTR blends using MA/DCP.....   | 81   |
| 4.15 Percentage MFI of 70/30 PP/RTR blends using MA/DCP.....   | 83   |
| C.1 DSC thermogram on heating curve of polypropylene.....  | 97   |
| C.2 DSC thermogram on heating curve of vulcanized 80/20 PP/RTR blend<br>using sulfur crosslinking agent.....   | 97   |
| C.3 DSC thermogram on heating curve of vulcanized 75/25 PP/RTR blend<br>using sulfur crosslinking agent.....   | 98   |

## LIST OF FIGURES(continued)

| FIGURES  | PAGE |
|--|------|
| C.4 DSC thermogram on heating curve of vulcanized 70/30 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent.....      | 98   |
| C.5 DSC thermogram on heating curve of vulcanized 65/35 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent.....      | 99   |
| C.6 DSC thermogram on heating curve of vulcanized 60/40 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent.....      | 99   |
| C.7 DSC thermogram on heating curve of non-vulcanized 80/20 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent.....  | 100  |
| C.8 DSC thermogram on heating curve of non-vulcanized 75/25 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent.....  | 100  |
| C.9 DSC thermogram on heating curve of non-vulcanized 70/30 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent.....  | 101  |
| C.10 DSC thermogram on heating curve of non-vulcanized 65/35 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent..... | 101  |
| C.11 DSC thermogram on heating curve of non-vulcanized 60/40 PP/RTR blend using sulfur crosslinking agent..... | 102  |
| C.12 DSC thermogram on heating curve of 70/30 PP/RTR blend using MA.....                                       | 102  |
| C.13 DSC thermogram on heating curve of 70/30 PP/RTR blend using DCP.....                                      | 103  |
| C.14 DSC thermogram on heating curve of 70/30 PP/RTR blend using MA and DCP.....                               | 103  |

**LIST OF SCHEMES**

| <b>SCHEMES</b>  | <b>PAGE</b> |
|---|-------------|
| 2.1 Types of peroxide with and without carboxy groups.....  | 10          |
| 2.2 Free-radicals of peroxides.....   | 11          |
| 2.3 Types of vulcanization accelerators.....  | 15          |
| 2.4 Maleic anhydride reaction with elastomers containing main chain or side chain unsaturation.....   | 17          |
| 2.5 Maleic anhydride reaction with saturated hydrocarbon polymers.....  | 18          |
| 4.1 The addition reaction of maleic anhydride onto natural rubber:<br>(a) addition to $\alpha$ -methylene carbon atom; (b) intramolecular addition to the double bond; (c) Intermolecular addition to double bonds in different polymer chains; (d) intermolecular addition to $\alpha$ -methylene carbon atoms in adjacent chains..... | 73          |
| 4.2 The crosslink formation reaction by dicumyl peroxide.....   | 76          |
| 4.3 The crosslink between PP and rubber by the corporation reaction of MA and DCP.....  | 78          |



**LIST OF ABBREVIATIONS**

|              |                                   |
|--------------|-----------------------------------|
| PP           | polypropylene                     |
| RTR          | reclaimed tire-rubber             |
| GRT          | ground rubber tire                |
| MA           | maleic anhydride                  |
| DCP          | dicumyl peroxide                  |
| TMTD         | tetramethylthiuramdisulphide      |
| MBT          | 3-mercaptobenzothiazole           |
| AO           | antioxidant                       |
| MFI          | melt flow index                   |
| $T_g$        | glass-transition temperature      |
| $T_m$        | melting temperature               |
| $T_{onset}$  | onset temperature                 |
| rpm          | round per minute                  |
| phr          | part(s) per hundred of rubber     |
| pbw          | part(s) by weight                 |
| DSC          | Differential Scanning Calorimetry |
| SEM          | Scanning Electron Microscopy      |
| TGA          | Thermogravimetric Analysis        |
| $\Delta H_f$ | heat of fusion                    |