

จลนพลศาสตร์ของปฏิบัติการเชื่อมขวางของพอลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ
และพอลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นโดยใช้ไดคิมิดเปอร์ออกไซด์
เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

นายชัยวัฒน์ คงน้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-598-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**KINETICS OF CROSSLINKING REACTION OF LOW DENSITY
POLYETHYLENE AND LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE USING
DICUMYL PEROXIDE
AS INITIATOR**

Mr. Chaiwat Kongnoi

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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-598-4

Thesis Title KINETICS OF CROSSLINKING REACTION OF LOW DENSITY POLYETHYLENE AND LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE USING DICUMYL PEROXIDE AS INITIATOR

By Mr. Chaiwat Kongnoi

Department Petrochemistry and Polymer Science

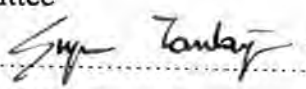
Thesis Advisor Professor Pattarapan Prasassarakich, Ph.D.


Thesis Co-advisor Anucha Euapermkiati, Ph.D.


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


..... Dean of Graduate School
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

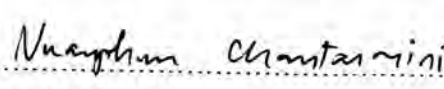
Thesis Committee

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

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

 Thesis Co-advisor
(Anucha Euapermkiati, Ph.D.)

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

 Member
(Assistant Professor Nuanphun Chantarasiri, Ph.D.)

ชัยวัฒน์ กงน้อย : จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นโดยใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (KINETICS OF CROSSLINKING REACTION OF LOW DENSITY POLYETHYLENE AND LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE USING DICUMYL PEROXIDE AS INITIATOR) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร. ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. อนุชา เอื้อเพิ่มเกียรติ, 107 หน้า. ISBN 974-638-598-4.

ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นโดยใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ เตตระคิส[เมทิลีน 3-(3',5'-ไดเทอร์เชียรี-บิวทิล-4'-ไฮดรอกซิล)โพรพาโนเอต](เออร์กานอก 1010) เป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาด้วยเครื่องบราเบนเคอร์-พลาสติ-คอร์เคอร์(บีพีซี) และเครื่องคิฟเฟอร์เรนเซิลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (ดีเอสซี) อันดับของปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเมื่อไม่มีตัวยับยั้งปฏิกิริยามีค่าเป็น 1 เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในขณะที่เมื่อมีตัวยับยั้งปฏิกิริยามีค่าเป็น 1 เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาและมีค่า 0.21-0.31 เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของตัวยับยั้งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 446 เคลวิน สำหรับเครื่องบีพีซี และที่อุณหภูมิ 413 เคลวิน สำหรับเครื่องดีเอสซี ค่าคงที่อัตราเมื่อมีตัวยับยั้งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าเมื่อไม่มีตัวยับยั้งปฏิกิริยาประมาณ 3 เท่า ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 118 และ 112 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ สำหรับเทคนิคบีพีซี และ 184 และ 176 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ สำหรับเทคนิคดีเอสซี ค่าปัจจัยการชนของปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 3.23×10^{11} และ 0.82×10^{11} ต่อวินาทีตามลำดับสำหรับเทคนิคบีพีซี และ 3.56×10^{19} และ 3.64×10^{18} ต่อวินาทีตามลำดับ สำหรับเทคนิคดีเอสซี ได้หาสัดส่วนของการเกิดปฏิกิริยาการหยุดยั้งและพบว่าประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ เกิดการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ ในขณะที่ 35 เปอร์เซ็นต์ เกิดปฏิกิริยาคิสพอพรอซันเนชัน และปฏิกิริยาการปิดวง

ปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ที่มากกว่า 1.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ใช้ในปฏิกิริยาการเชื่อมขวางให้การเชื่อมขวางในพอลิเมอร์มีค่าคงที่ที่มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และ เมื่อเติมเออร์กานอก 1010 เข้มข้น 0.1-0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณการเชื่อมขวางมีค่าคงที่ที่มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อปริมาณเออร์กานอก 1010 เพิ่มขึ้นมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาณการเชื่อมขวางจะลดลง เมื่อปริมาณเออร์กานอก 1010 เพิ่มมากขึ้น

ภาควิชา
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต นายชัยวัฒน์ กงน้อย
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

#C651023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEY WORD: KINETICS / CROSSLINK / POLYETHYLENE / DICUMYL PEROXIDE

CHAIWAT KONGNOI : KINETICS OF CROSSLINKING REACTION
OF LOW DENSITY POLYETHYLENE AND LINEAR LOW DENSITY
POLYETHYLENE USING DICUMYL PEROXIDE AS INITIATOR. THESIS
ADVISOR : PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., THESIS CO-
ADVISOR : ANUCHA EUAPERMKIATI, Ph.D. 107 pp. ISBN 974-638-598-4.

The kinetics of crosslinking reaction of low density polyethylene (LDPE) and linear low density polyethylene (LLDPE) using dicumyl peroxide (DCP) as the initiator and tetrakis [methylene 3-(3',5'-di-t-butyl-4'-hydroxyl)propanoate] (Irganox 1010) as the inhibitor were studied using Brabender Plasti-Corder (BPC) and Differential Scanning Calorimeter (DSC). The crosslinking reaction in the absence of inhibitor was found to be first order with respect to initiator concentration, while in the presence of inhibitor, the reaction was first order with respect to initiator concentration and 0.21-0.31 with respect to inhibitor concentration at 446 K for BPC and 413 K for DSC. In addition, the rate constant in the presence of inhibitor was found to be around three time lower than that in the absence. The activation energy of crosslinking reaction of LDPE and LLDPE were 118 and 112 kJ/mol, respectively for BPC technique and 184 and 176 kJ/mol, respectively for DSC technique. The pre-exponential factor of crosslinking reaction of LDPE and LLDPE were respectively 3.23×10^{11} and $0.82 \times 10^{11} \text{ sec}^{-1}$ for BPC technique and 3.56×10^{19} and $3.64 \times 10^{18} \text{ sec}^{-1}$ for DSC technique. The fraction of termination was determined and found that approximately 65% was terminated by combination of polymer radicals, while 35% was terminated by disproportionation and cyclization.

The amount of DCP higher than 1.6%w/w used for the crosslinking reaction gave the degree of crosslinking in polymer greater than 80%. When 0.1-0.2%w/w of Irganox 1010 was used in the preparation of compound LDPE or LLDPE containing about 2%w/w DCP, the degree of crosslinking was constant at more than 80%. For the Irganox 1010 concentration greater than 0.2%w/w, the degree of crosslinking decreased with increasing inhibitor concentration.

ภาควิชา.....

สาขาวิชา.....

ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิติ นายชัยวัฒน์ กรณ์ชัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ACKNOWLEDGMENTS

The author wishes to thank Professor Dr. Pattarapan Prasassarakich, advisor, for encouragement during the research work and the thesis preparation. Sincere thanks and gratification are going to Dr. Anucha Euapermkiati, co-advisor, for valuable guidance and encouragement throughout the course of the research and during preparation of the thesis.

He is also grateful to Associate Professor Supawan Tantayanon, Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, and Assistant Professor Dr. Nuanphun Chantarasiri for serving as chairperson and members of thesis committee, respectively.

In addition, he would like to acknowledge the Research and Development Department, Thai Petrochemical Industry (Public) Co., Ltd. allowed to use equipments and instruments during courses of studies. Without the company supports this thesis has never been completed.

Finally, he is grateful to his family for their encouragement, and supports. Many thanks are going to friends and everyone who contributed suggestions and supports during the course of research.

CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT (IN THAI).....	IV
ABSTRACT (IN ENGLISH).....	V
ACKNOWLEDGEMENTS	VI
CONTENTS	VII
LIST OF TABLES	X
LIST OF FIGURES	XIII
ABBREVIATIONS	XVI
CHAPTER 1 : INTRODUCTION.....	1
CHAPTER 2 : THEORY AND LITERATURE REVIEW	
2.1 Crosslinkable Polymer	3
2.1.2 Degree of Crosslinking.....	3
2.1.2 Effect of Crosslinking on Physical Properties.....	5
2.2 Crosslinking Processes of Polyolefins.....	6
2.2.1 Radiation Crosslinking.....	6
2.2.2 Peroxide Crosslinking.....	7
2.2.3 Silane Crosslinking.....	9
2.3 Major Compositions of the Peroxide Crosslinked Polyolefins	11
2.3.1 Polyolefins.....	11
2.3.2 Crosslinking Agents.....	12
2.3.3 Inhibitors or Antioxidants	12
2.3.4 Additives.....	15
2.4 Kinetics of Crosslinking Reaction of Polyethylene in the	
Absence of an Inhibitor	16
2.4.1 The Kinetics Mechanism.....	16
2.4.2 The Kinetics Expression.....	17

CONTENTS (continued)

	PAGE
2.5 Kinetics of Crosslinking Reaction of Polyethylene in the Presence of an Inhibitor	20
2.6 Literature Reviews.....	22
CHAPTER 3 : EXPERIMENTAL	
3.1 Materials and Chemicals	27
3.2 Instrument, Equipment and Glassware.....	28
3.3 Characterization.....	28
3.3.1 Determination of Melting and Crystallization Temperature and Percentage of Crystallinity of LDPE and LLDPE.....	28
3.3.2 Measurement of Melt Flow Index of LDPE and LLDPE.....	28
3.3.3 Measurement of Molecular Weight and Molecular Weight Distribution of LDPE and LLDPE.....	29
3.3.4 Determination of Short Chain Branching Concentration of LDPE and LLDPE by FTIR.....	29
3.4 Experimental : Studies of the Kinetics of Crosslinking Reaction of LDPE and LLDPE.....	30
3.4.1 Kinetics Study of Crosslinking Reaction Using PL2000 Brabender Plasti-Corder.....	32
3.4.2 Kinetics Study of Crosslinking Reaction Using Differential Scanning Calorimeter.....	34
3.5 Preparation of Crosslinked LDPE or LLDPE Sample.....	35
3.5.1 Determination of Gel Content of the Crosslinked LDPE or LLDPE.....	35
3.5.2 Determination of T_m , T_c and Percentage of Crystallinity of Crosslinked LDPE and LLDPE.....	35

CONTENTS (continued)

	PAGE
CHAPTER 4 : RESULTS AND DISCUSSION	
4.1 Characterization of LDPE and LLDPE	36
4.2 Determination of Short Chain Branching of Polyethylene.....	38
4.3 Kinetics Study of Peroxide Crosslinking Reaction of LDPE and LLDPE Using Rheometric and Differential Scanning Calorimetric Techniques	40
4.3.1 Kinetics of Crosslinking Reaction in the Absence of an Inhibitor	40
4.3.2 Kinetics of Crosslinking Reaction in the Absence of an Inhibitor at Various Temperatures	58
4.3.3 Kinetics of Crosslinking Reaction in the Presence of an Inhibitor	67
4.4 Effect of Initiator Concentration on Properties of the Crosslinked LDPE and LLDPE	76
4.4.1 Effect on Melting Temperature, Crystallization Temperature and Crystallinity.....	76
4.4.2 Effect on Gel Content	78
4.5 Effect of Irganox 1010 on Gel Content.....	79
CHAPTER 5 : CONCLUSION	80
REFERENCES	84
APPENDIX A.....	87
APPENDIX B.....	88
APPENDIX C.....	101
APPENDIX D.....	104
VITA	107

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
3.1 Specifications of LDPE J4324 and LLDPE L2020F.....	27
3.2 Amount of DCP and Irganox 1010 for crosslinking reaction of LDPE and LLDPE by Rheometric technique.....	31
3.3 Amount of DCP and Irganox 1010 employed for the studies of the kinetics of crosslinking reactions using DSC technique.....	32
4.1 Total heat of reaction of LDPE and LLDPE at various of DCP concentrations.....	47
4.2 The values of rate constants for crosslinking reaction of LDPE and LLDPE.....	55
4.3 The values of rate constants for crosslinking reaction at various temperatures.....	58
4.4 The values of E_a and A of crosslinking reaction of LDPE and LLDPE using Rheometric and DSC techniques.....	59
4.5 Values of rate constant, k'_{xz} at 446 K (Rheometric technique) and 413 K (DSC technique).....	69
4.6 The melting temperature (T_m), crystallization temperature (T_c), and crystallinity of LDPE and LLDPE after crosslinking.....	76
5.1 Characteristics of LDPE J4324 and LLDPE L2020 F.....	81
5.2 The kinetic values of crosslinking reaction of LDPE and LLDPE with DCP in the absence of Irganox 1010as evaluated by the rheometric and DSC techniques.....	81
A Values of absorbance (A), film density (D) and film thickness (T) of LDPE J4324 and LLDPE L2020F.....	87
B1 Values of maximum torque of crosslinking reaction of LDPE and LLDPE at 446 K with various amount of DCP.....	88
B2-a Torque against time during the crosslinking reaction of LDPE at 446 K with various amount of DCP.....	89

LIST OF TABLES (continued)

TABLE	PAGE
B2-b Crosslinking conversion against time of the crosslinking reaction of LDPE at 446 K with various amount of DCP.....	90
B3-a Torque against time during the crosslinking reaction of LLDPE at 446 K with various amount of DCP.....	91
B3-b Crosslinking conversion against time of crosslinking reaction of LLDPE at 446 K with various amount of DCP.....	92
B4-a Torque against time during the crosslinking reaction of LDPE at various temperature; DCP 0.2%.....	93
B4-b Crosslinking conversion against time of the crosslinking reaction of LDPE at various temperature; DCP 0.2%.....	94
B5-a Torque against time during the crosslinking reaction of LLDPE at various temperature; DCP 0.2%.....	95
B5-b Crosslinking conversion against time of the crosslinking reaction of LLDPE at various temperature; DCP 0.2%.....	96
B6-a Torque against time during the crosslinking reaction of LDPE at 446 K. DCP was 2.0% and Irganox 1010 varied from 0-0.6%.....	97
B6-b Crosslinking conversion against time during crosslinking reaction of LDPE at 446 K. DCP was 2.0% and Irganox 1010 varied from 0-0.6%.....	98
B7-a Torque against time during the crosslinking reaction of LLDPE at 446 K. DCP was 1.2% and Irganox 1010 varied from 0-0.6%.....	99
B7-b Crosslinking conversion against time during crosslinking reaction of LLDPE at 446 K. DCP was 1.2% and Irganox 1010 varied from 0-0.6%.....	100
C1-a Crosslink conversion of the crosslinking reaction of LDPE at 413 K with various amount of DCP.....	101

LIST OF TABLES (continued)

TABLE	PAGE
C1-b Crosslink conversion the crosslinking reaction of LLDPE at 413 K with various amount of DCP.....	101
C2-a Crosslink conversion of the crosslinking reaction of LDPE at various temperature using DCP 2.0%.....	102
C2-b Crosslink conversion of the crosslinking reaction of LLDPE at various temperature using DCP 2.0%.....	102
C3-a Crosslink conversion of LDPE at 413 K using DCP 2.0% and Irganox 1010 varied from 0-0.6%.....	103
C3-b Crosslink conversion of LLDPE at 413 K using DCP 2.0% and Irganox 1010 varied from 0-0.6%.....	103
D1 Values of dx/dt of LDPE crosslinking reaction (RHE) at 446 K.....	104
D2 Values of dx/dt of LLDPE crosslinking reaction (RHE) at 446 K.....	104
D3 Values of dx/dt of LDPE and LLDPE crosslinking reaction (RHE) at various temperature using DCP 0.2%.....	105
D4 Values of dx/dt of LDPE and LLDPE crosslinking reaction (RHE) at 446 K with various amount of Irganox 1010.....	105
D5 Values of dx/dt of LDPE and LLDPE crosslinking reaction (DSC) at 413 K.....	105
D6 Values of dx/dt of LDPE and LLDPE crosslinking reaction (DSC) at various temperature using DCP 2.0%.....	106
D7 Values of dx/dt of LDPE and LLDPE crosslinking reaction (DSC) at 413 K with DCP 2.0% and various amount of Irganox 1010.....	106

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
3.1 Typical torque-time curve ; DCP 0.8%w/w, rotor speed 50 rpm at temperature set point 165°C.	33
4.1 The DSC thermograms of LDPE J4324 and LLDPE L2020F.	36
4.2 FT-IR spectra of LDPE J4324 and LLDPE L2020 F.	37
4.3 FT-IR spectra of the methyl symmetrical deformation band at 1300-1400 cm^{-1} of LDPE and LLDPE .	39
4.4 Variation of torques during crosslinking of LDPE at various DCP concentrations.	42
4.5 Variation of torques during crosslinking of LLDPE at various DCP concentrations.	43
4.6 Plot of maximum torque during crosslinking reaction of LDPE and LLDPE versus various DCP loading.	44
4.7 Variation of polymer temperature at various crosslinking conversion.	45
4.8 DSC thermograms of the crosslinking reaction of LDPE at various DCP concentrations.	46
4.9 DSC thermograms of the crosslinking reaction of LLDPE at various DCP concentrations.	46
4.10 Plot of conversion versus time for LDPE crosslinking reaction (RHE) at 446 K at various DCP concentrations.	47
4.11 Plot of conversion versus time of LLDPE crosslinking reaction (RHE) at 446 K at various DCP concentrations.	48
4.12 Plot of conversion versus time for LDPE crosslinking reaction (DSC) at 413K at the various of DCP concentrations.	49
4.13 Plot of conversion versus time LLDPE crosslinking reaction (DSC) at 413K at the various of DCP concentrations.	50
4.14 Plot of $\ln(dx/dt)$ versus $\ln[\text{DCP}]$ (RHE).	52
4.15 Plot of $\ln(dx/dt)$ versus $\ln[\text{DCP}]$ (DSC).	53

LIST OF FIGURES (continued)

FIGURE	PAGE
4.16 Plot of $(-(1-x)^{1-m} - 1)/(1-m)$ versus $1 - e^{-k_d t}$ of LDPE crosslinking at 446 K.....	56
4.17 Plot of $(-(1-x)^{1-m} - 1)/(1-m)$ versus $1 - e^{-k_d t}$ of LLDPE crosslinking at 446 K.....	57
4.18 Plot of conversion versus time for LDPE crosslinking at various temperatures(RHE).....	61
4.19 Plot of conversion versus time for LLDPE crosslinking at various temperatures (RHE).....	62
4.20 Plot of conversion versus time for LDPE crosslinking at various temperatures(DSC).....	63
4.21 Plot of conversion versus time for LLDPE crosslinking at various temperatures(DSC).....	64
4.22 Arrhenius plot of $\ln(dx/dt)$ versus $1/T$ for LDPE and LLDPE crosslinking reaction(RHE).....	65
4.23 Arrhenius plot of $\ln(dx/dt)$ versus $1/T$ for LDPE and LLDPE crosslinking reaction (DSC).....	66
4.24 Plot of conversion versus time for LDPE crosslinking at various inhibitor concentrations at 446 K (RHE).....	70
4.25 Plot of conversion versus time for LLDPE crosslinking at various inhibitor concentration at 446 K(RHE).....	71
4.26 Plot of conversion versus time for LDPE crosslinking at various inhibitor concentrations at 413 K (DSC).....	72
4.27 Plot of conversion versus time for LLDPE crosslinking at various inhibitor concentrations at 413 K (DSC).....	73
4.28 Plot of $\ln(dx/dt)$ versus $\ln[\text{Irganox}]$ at 446 K (RHE).....	74
4.29 Plot of $\ln(dx/dt)$ versus $\ln[\text{Irganox}]$ at 413K (DSC).....	75

LIST OF FIGURES (continued)

FIGURE	PAGE
4.30 Melting temperature of LDPE after crosslinking at various DCP concentrations.....	77
4.31 Melting temperature of LLDPE after crosslinking at various DCP concentrations.....	77
4.32 Effect of DCP concentration on the gel content of LDPE and LLDPE, cured at 180°C for 15 minutes.....	78
4.33 Effect of Irganox 1010 concentration on gel content of LDPE and LLDPE.....	79

ABBREVIATIONS

BPC	: Brabender Plasti-Corder
DCP	: Dicumyl peroxide
DSC	: Differential scanning calorimeter
FTIR	: Fourier-transform infra-red spectrophotometer
GPC	: Gel permeation chromatography
[I]	: Initiator concentration
k_d	: Rate constant for the initiator dissociation reaction
k_H	: Rate constant for the hydrogen abstraction reaction
k_t	: Rate constant for the termination
k_{tc}	: Rate constant for the termination by combination
k_{td}	: Rate constant for the termination by disproportionation
k_{tcz}	: Rate constant for the termination by cyclization
k'_x	: Overall rate constant for the crosslinking reaction in the absence of an inhibitor
k'_{xz}	: Overall crosslinking rate for the crosslinking reaction constant in the presence of an inhibitor
k_z	: Rate constant for the inhibition reaction
LDPE	: Low density polyethylene
LLDPE	: Linear low density polyethylene
[PH]	: Polymer concentration
$[P^*]$: Polymer radical concentration
R_d	: Rate of initiator decomposition reaction
R_H	: Rate of hydrogen abstraction reaction
RHE	: Rheometric technique
$[RO^*]$: Peroxy radical concentration
R_t	: Rate of termination reaction
R_{tc}	: Rate of termination reaction by combination
R_{td}	: Rate of termination reaction by disproportionation

ABBREVIATIONS(continued)

- R_{tcz} : Rate of termination reaction by cyclization
 R_x : Rate of crosslinking reaction in the absence of an inhibitor
 R'_x : Rate of crosslinking reaction in the presence of an inhibitor
 R_z : Rate of inhibition reaction
 T_c : Crystallization temperature
 T_m : Melting temperature
XLPE : Crosslinked polyethylene
XLDPE : Crosslinked low density polyethylene
XHDPE : Crosslinked high density polyethylene
XLLDPE: Crosslinked linear low density polyethylene
[Z] : Inhibitor concentration