

การสังเคราะห์พอลิเมอร์เชื่อมขวางรูปทรงกลมตระกูล(เมทา)อะคริเลต ด้วยเอสพีจีอิมัลชันพีเคชันและ
การประเมินความเป็นวัสดุเชื่อมตัวทำละลาย



นางสาว สุมาลี ถาวรศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาปิโตรเคมีวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา พ.ศ. 2542
ISBN 974-333-682-6
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**SYNTHESIS OF CROSSLINKED (METH) ACRYLATE SPHERES
BY SPG EMULSIFICATION AND THEIR EVALUATION AS
SOLVENT-ABSORBING MATERIAL**

MISS SUMALEE TAWONSREE

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment 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 1999
ISBN 974-333-682-6**

Thesis Title SYNTHESIS OF CROSSLINKED (METH)ACRYLATE SPHERES BY SPG EMULSIFICATION AND THEIR EVALUATION AS SOLVENT-ABSORBING MATERIAL

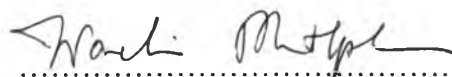
By Miss Sumalee Tawonsree

Department Petrochemistry and Polymer Science

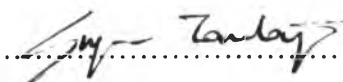
Thesis Advisor Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D.


Thesis Co-advisor Professor Shinzo Omi, Ph.D.

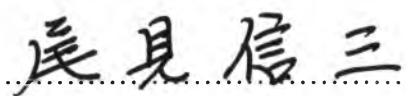
Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for Mater's Degree.



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

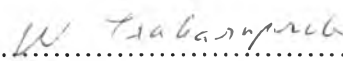
Thesis Committee


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


..... Thesis Advisor
(Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D.)


..... Thesis Co-advisor
(Professor Shinzo Omi, Ph.D.)


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


..... Member
(Associate Professor Wimonrat Trakarnpruk, Ph.D.)

สุมาลี ถาวรศรี : การสังเคราะห์พอลิเมอร์เชื่อมขวางรูปทรงกลมตระกูล(เมทา)อะคริเลต
ด้วยเอสพีจีอิมัลชันและการประเมินความเป็นวัสดุดูดซับตัวทำละลาย (SYNTHESIS
OF CROSSLINKED (METH)ACRYLATE SPHERES BY SPG EMULSIFICATION AND
THEIR EVALUATION AS SOLVENT-ABSORBING MATERIAL) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. สุดา
เกียรติกิจรวงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร. Shinzo Omi; 105 หน้า. ISBN 974-333-682-6

การสังเคราะห์พอลิเมอร์เชื่อมขวางของ(เมทา)อะคริเลตที่มีพื้นฐานวิทยาลัยหลากหลาย
ประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเตรียมพอลิเมอร์ที่มีขนาดเท่า ๆ กันโดยใช้เอสพีจี
เมมเบรนที่มีรูพรุน 0.9, 5.25 และ 9.0 ไมโครเมตร พอลิเมอร์ประกอบด้วยตัวเร่ง ตัวทำละลาย
และสารผสมพอลิเมอร์ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ประกอบด้วยสารคงเสถียรภาพและ
ตัวยับยั้ง หลังจากนั้นถ่ายอิมัลชันสู่ถังปฏิกรณ์ และทำปฏิกิริยาซอสพอลิเมอร์ไรเซชัน ณ 70 °ซ.
ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราคน 160 รอบต่อนาที (เมทา)อะคริเลต
พอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ 2-เอทิลเฮกซิลอะคริเลต (2-EHA) 2-เอทิลเฮกซิลเมทาคริเลต
(2-EHMA) ลอริลอะคริเลต(LA) ลอริลเมทาคริเลต(LMA) ไซโครเฮกซิลอะคริเลตและเมทิลเมทาคริเลต(MMA)
การทดลองนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนระหว่างพอลิเมอร์และตัวเชื่อมขวาง ปริมาณของตัวเจือจาง
ชนิดของพอลิเมอร์ และชนิดของตัวเจือจางหรือตัวทำละลาย ต่อลักษณะของอนุภาคพอลิเมอร์
อัตราการบวมตัวและขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ได้พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเอทิลไกลคอลไดเมทาคริเลต
และเฮปแทน ทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นมากขึ้น และขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ลดลง
ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผันมีค่าใกล้เคียงกันร้อยละ 10 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความสามารถของ
อนุภาคพอลิเมอร์ในการดูดซับตัวทำละลาย พบว่าค่าอัตราการบวมตัวมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ลอริลอะคริเลต
เป็นพอลิเมอร์ อนุภาคพอลิเมอร์มีขนาดประมาณ 4.31 ไมโครเมตร ซึ่งเตรียมโดยเอสพีจีเมมเบรนที่
มีรูพรุน 0.9 ไมโครเมตร อนุภาคพอลิเมอร์สามารถดูดซับตัวทำละลายได้ทั้งประเภทอะลิเฟติก
ไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และตัวทำละลายผสมระหว่างอะลิเฟติกไฮโดรคาร์บอน
กับอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เฮปแทน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการดูดซับตัวทำละลาย
อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมีค่าสูงกว่าตัวทำละลายอะลิเฟติกไฮโดรคาร์บอน ลักษณะของอนุภาคไม่
แตกหักหรือฟุ้งเปื้อนหลังจากดูดซับตัวทำละลายทั้งสามประเภท

ภาควิชา

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

สุมาลี ถาวรศรี
Prof. Tesolkiat
尾見信三

4072436023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEY WORD: MEMBRANE EMULSIFICATION; POLY (METH)ACRYLATE MICROSPHERES / SHIRASU POROUS GLASS / SUSPENSION POLYMERIZATION / HOLLOW MICROSPHERE

SUMALEE TAWONSREE : SYNTHESIS OF CROSSLINKED (METH) ACRYLATE SPHERES BY SPG EMULSIFICATION AND THEIR EVALUATION AS SOLVENT-ABSORBING MATERIAL. THESIS ADVISOR: PROF. SUDA KIATKAMJORNWONG, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: PROF. SHINZO OMI, Ph.D. 105 pp. ISBN 974-333-682-6

Crosslinked poly(meth)acrylate polymers with a variety of morphologies were synthesized in two steps. In the first step, a microporous glass membrane (Shirasu Porous Glass, SPG) was employed to prepare uniform emulsion droplets by applying adequate pressure to the monomer phase, which is composed of an initiator, solvent, and a mixture of monomers. The droplets were formed continuously through the membrane and suspended in the aqueous solution, which contains a suspending agent, an emulsifier and an inhibitor to suppress the nucleation of secondary particles. The SPG pore sizes of 0.90, 5.25 and 9.25 μm were used. Then, the emulsion droplets were polymerized at 70°C with the rotation rate 160 rpm for 24 h. The (meth)acrylate monomers, such as, 2-ethylhexyl acrylate (2-EHA), 2-ethylhexyl methacrylate (2-EHMA), cyclohexyl acrylate, methyl methacrylate (MMA), lauryl acrylate (LA) and lauryl methacrylate (LMA) were used in this research. The influences of the ratios of monomer and crosslinking agent, ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA), the amount of diluents (toluene and heptane), the monomer types and the diluent/solvent types on the polymer particle morphology, the swelling degree and the polymer particle sizes were investigated. We found that an increase in the concentration of ethyleneglycol dimethacrylate and heptane resulted in higher coarse porous spheres and smaller polymer particle size. A coefficient of variation close to 10% was obtained. The capacity of these spheres as solvent absorption materials was examined. The highest swelling degrees of heptane and toluene were obtained when lauryl acrylate was employed as a monomer with 30% (by weight) of ethyleneglycol dimethacrylate and 70% (by weight) of heptane as an inert solvent. The highest capacity of solvent absorption was obtained when 4.81 μm of the polymer particle sizes prepared by the SPG pore size 0.9 μm was used. The polymer particles were able to absorb aliphatic hydrocarbon solvents, aromatic hydrocarbon solvents and the mixed solvents between the aliphatic hydrocarbon solvent and the aromatic hydrocarbon solvent, such as toluene and heptane. The capacity of the solvent absorption in the aromatic hydrocarbon solvents was higher than the aliphatic hydrocarbon solvents. Besides, the particles did not rupture or collapse after the absorption in solvents.

ภาควิชา

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต.....SUMALEE TAWONSREE.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....Suda Kiatkamjornwong.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....尾見信三.....

ACKNOWLEDGEMENTS

First of all, I am grateful to my advisor Prof. Suda Kiatkamjornwong for her guidance and kindness throughout the course of study. I would like to express my sincere gratefulness to my co-advisor Prof. Shinzo Omi for valuable advice and comments, his kindness and attention throughout the one year of the research work in Japan. I would like to take this opportunity to thank Dr, Guang Hui Ma for the helpful discussions and suggestions.

I am obliged to the Department of Imaging and Printing Technology of the Faculty of Science, and the Graduate School of Chulalongkorn University; and Graduate School of Bio-Applications and System Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology for the generous access to research facilities. I would like to thank the AIEJ short-term student Exchange Promotion Program, and National Science and Technology Development Agency (ASTDA) for their special financial support.

Finally, I am grateful to my parents for their love and moral support. Thanks are also extended to my friends for their helpful support during the year of hard work.

CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT (IN THAI).....	iv
ABSTRACT (IN ENGLISH).....	v
ACKNOWLEDGEMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	xi
LIST OF FIGURES.....	xiii
ABBREVIATIONS.....	xvi
CHAPTER	
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 The significant importance of SPG emulsification technique.....	1
1.2 Objectives of the research work.....	3
1.3 Scope of the research work.....	3
2 BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW.....	5
2.1 SPG emulsification technique.....	5
2.1.1 Principle of membrane emulsification.....	5
2.1.2 Manufacturing process of SPG.....	8
2.1.3 Preparation of each emulsion type by SPG emulsification.....	9
2.1.3.1 Preparation of an oil-in-water (O/W) emulsion.....	9
2.1.3.2 Preparation of a water-in-oil (W/O) emulsion.....	10
2.1.3.3 Preparation of a double emulsion.....	10
2.1.4 Application of SPG.....	11
2.2 The formation of hollow bead.....	13
2.3 Kinetics of Absorption-Desorption.....	15
2.3.1 Absorption kinetics.....	15
2.3.2 Desorption kinetics.....	18

CONTENTS (Continued)

	PAGE
2.4 Literature Review.....	19
3 EXPERIMENTAL.....	25
3.1 Materials, apparatus, and analytical instruments.....	25
3.1.1 Materials.....	25
3.1.1.1 Monomers and crosslinking monomer.....	25
3.1.1.2 Solvents.....	26
3.1.1.3 Initiator.....	26
3.1.1.4 Inhibitor.....	26
3.1.1.5 Stabilizer and emulsifier.....	26
3.1.1.6 Other chemicals.....	27
3.1.2 Apparatus.....	27
3.1.2.1 SPG emulsification apparatus.....	27
3.1.2.2 Polymerization setup.....	27
3.1.3 Analytical instruments.....	29
3.2 Procedures.....	30
3.2.1 Purification of the monomers.....	30
3.2.2 Preparation of emulsion droplets.....	30
3.2.3 Polymerization of the emulsion droplets.....	31
3.2.4 Treatment of the polymer particles.....	31
3.3 Characterization	34
3.3.1 Percent conversion of the monomer.....	34
3.3.2 Determination of swelling degree.....	34
3.3.3 Determination of average diameters of the particles.....	34
3.3.4 Determination of the general feature of polymer particles.....	35
3.3.5 Determination of Tg of the polymer.....	35
3.3.6 Determination of the copolymer composition.....	35
3.3.7 Determination of the polymer porosity.....	36

CONTENTS (Continued)

	PAGE
4 RESULTS AND DISCUSSION.....	37
4.1 Effect of the crosslinking agent (EGDMA) on properties of polymer particles.....	37
4.1.1 The surface feature of polymer particle microspheres	37
4.1.2 The degree of the polymer swelling.....	38
4.1.3 The size of emulsion droplet and polymer Particle.....	42
4.2 Effect of solvent on the properties of polymer particles.....	44
4.2.1 The surface feature of polymer particle microsphere.....	44
4.2.2 The degree of polymer swelling.....	44
4.2.3 The size of emulsion droplet and polymer particle.....	47
4.2.4 The effect of the solvent type.....	48
4.3 Effect of the monomer types on properties of polymer Particles.....	52
4.3.1 The surface feature of microsphere and degree of the polymer swelling.....	52
4.3.2 The size of emulsion droplet and polymer particle.....	58
4.4 Effect of the third monomer on properties of polymer Particles.....	60
4.4.1 The microsphere morphology and degree of the polymer swelling.....	60
4.4.2 The size of emulsion droplet and polymer particle.....	65
4.5 Absorption kinetics.....	66
4.5.1 Effect of particle size on the capacity of the solvent absorption.....	67
4.5.2 Effect of absorption times on the capacity of the solvent absorption.....	70

CONTENTS (Continued)

	PAGE
4.5.3 Effect of penetrant types on the capacity of the solvent absorption.....	72
4.6 Other characterizations.....	74
4.6.1 Porosity of the beads.....	74
4.6.2 Glass transition temperature of the polymer particles.....	78
5. CONCLUSIONS.....	82
REFERENCES.....	85
APPENDICES.....	89
APPENDIX A Estimation of solubility parameters of polymers.....	90
APPENDIX B Estimation of solubility parameters of mixtures.....	95
APPENCIX C Fourier-Transform infrared spectra of the polymer.....	98
VITA.....	105

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
4.1	Effect of EGDMA concentration at 35%, 45% and 70% heptane on polymer swelling	40
4.2	Effect of EGDMA concentration at 35%, 45% and 70% heptane on the size of emulsion droplets and polymer particles	43
4.3	Effect of solvent concentrations at 20,30 and 40% EGDMA	45
4.4	Effect of solvent concentrations at 20,30 and 40% EGDMA	49
4.5	Effect of solvent types at 30% EGDMA 70% solvent	50
4.5	Effect of monomer types on bead appearance at 70% monomer and 70% heptane	55
4.7	Effect of the monomer compositions at 70% heptane	57
4.8	The relationship between the monomer types and the size of emulsion droplet and polymer particle	59
4.9	Effect of the monomer compositions at 70% heptane	60
4.10	Effect of the monomer compositions at 30% EGDMA and 70% heptane	62
4.11	Effect of the monomer compositions at 70% heptane	63
4.12	Effect of the monomer compositions at 30% EGDMA and 70% heptane	65
4.13	Effect of EGDMA at 2-EHA:MMA, 1:1 and 70% heptane	66
4.14	The recipe of the polymerization	68
4.15	The effect of SPG pore size on polymer particle size	68
4.16	The relationship between swelling degree and particles size	68
4.17	Physical properties of penetrants and swelling degree	73
4.18	Characteristic of polymer particle surface and pore	76
4.19	Glass transition temperture of the homopolymer and their crosslinked copolymer	79
A-1	Molar attraction constants at 25°C according to Small and Hoy	93
A-2	Atom attraction constants at 25°C according to Van Krevelen (1995)	94

LIST OF TABLES (Continued)

TABLE		PAGE
A-3	Group contributions for V (cm^3/mol)	94
B-1	The property of heptane and toluene	95
B-2	The property of 2-EHA and EGDMA	97

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
2.1 Dispersion phase intrusion into micropore and formation of droplet.	6
2.2 Cross section of the SPG membrane.	7
2.3 Manufacturing process of an SPG.	9
2.4 Diagram of SPG emulsification.	12
2.5 Proposed model for formation of hollow bead.	14
2.6 The typical swelling curve of polyimide gel in water.	18
2.7 The desorption curve of poly(styrene-co-DVB) beads.	19
3.1 The SPG emulsification kit.	28
3.2 Suspension polymerization reactor.	29
3.3 Photographs of emulsion droplets taken by an optical microscope with various SPG pore sizes: a) 0.9 μm , b) 5.25 μm , c) 9.25 μm .	32
3.4 Photographs of emulsion droplets taken by an optical microscope with various SPG pore sizes: a) 0.9 μm , b) 5.25 μm , c) 9.25 μm .	33
4.1 SEM photographs of poly(2-EHA-co-EGDMA) at 20% EGDMA with various concentration of heptane; a) 70% heptane, b) 45% heptane, c) 35% heptane.	39
4.2 SEM photographs of the surface of poly(2-EHA-EGDMA) at 70% heptane with various concentrations of EGDMA, a) 20%, b) 30%, c) 35%, d) 40%.	41
4.3 The effect of heptane concentration on the degree of polymer swelling at 20, 30 and 40% of crosslinking agent.	42
4.4 SEM photographs of the surface of poly(2-EHA-co-EGDMA) with various ratios of heptane:toluene, a) 3.5:3.5, b) 4.5:2.5, c) 5.5:1.5, d)7.0:0, respectively.	46
4.5 The effect of the crosslinking agent concentrations on the degree of polymer swelling at 35, 45 and 70% of heptane.	47

LIST OF FIGURES (Continued)

FIGURE	PAGE
4.6 SEM photographs of the polymer bead of 2-EHA crosslinked with EGDMA with various solvent types at 70% monomer and 70% solvent, a) Isooctane, b) Heptane, c) Cyclohexane.	51
4.7 The effect of solvent types on the degree of polymer swelling.	52
4.8 SEM photographs with various monomer types at 70% monomer and 70% heptane, a) 2-EHA, b) 2-EHMA, c) lauryl acrylate, d) lauryl methacrylate, e) cyclohexyl acrylate, f) MMA.	56
4.9 Effect of the monomer compositions on degree of the solvent swelling.	61
4.10 SEM photographs of hollow polymer by various the monomer compositions of 2-EHA:MMA:EGDMA at 70% heptane: a) 0:6.0:4.0, b) 0:7.0:3.0, c) 0:8.0:2.0, d) 1.4:5.6:3.0, e)3.5:3.5:3.0, f) 4.0:4.0:2.0.	64
4.11 The swelling degree curve of poly(lauryl acrylate-EGDMA) particles against the swelling times, a) 1-10 min, b) 6-48 hr, respectively.	67
4.12 Effect of poly(lauryl acrylate) particle size in toluene on swelling degree at a function of time.	69
4.13 Dependence of swelling degree on particle size.	69
4.14 SEM photographs of surface feature of poly(lauryl acrylate-co-EGDMA) particles with various SPG pore size; a) 0.9 μm , b) 5.25 μm , c) 9.25 μm .	71
4.15 The swelling degree of poly(lauryl acrylate-co-EGDMA) prepared with a SPG pore size of 5.25 μm and the repeated stage as a function of time.	72
4.16 Capacity of solvent absorption with various solvent types	73
4.17 SEM photographs of the polymer particle microsphere of various surface features and morphologies used in the porosity measurements: a) finely porous surface, b) smooth hollow morphology, c) spongy hollow morphology, d) creased surface.	75

LIST OF FIGURES (Continued)

FIGURE	PAGE
4.18 The pore size distribution of polymer particle.	77
4.19 The DSC curves of crosslinked polymers; a) poly (MMA-co-EGDMA) particles, b) poly (cyclohexylacrylate-co-EGDMA) particles, c) poly (2-EHMA-co-EGDMA) particles, d) poly (2-EHMA-co-EGDMA) particles, e) poly (laurylacrylate-co-EGDMA) particles, f) poly (lauryl methacrylate-co-EGDMA) particles.	80
4.20 The DSC curves of poly(2-EHA-co-MMA-co-EGDMA) particles with various ratios of the comonomers at the constant content of 30% EGDMA.	81
C-1 The IR spectra of crosslinked polymer: (1) the upper figure is poly(lauryl methacrylate-co-EGDMA) particles, (2) the lower figure is poly(lauryl acrylate-co-EGDMA) particles.	99
C-2 The IR spectra of crosslinked polymer: (1) the upper figure is poly(cyclohexylacrylate-co-EGDMA) particles, (2) the lower figure is poly(MMA-co-EGDMA) particles.	100
C-3 The IR spectra of crosslinked polymer: (1) the upper figure is poly(2-EHMA-co-EGDMA) particles, (2) the lower figure is poly(2-EHA-co-EGDMA) particles.	101
C-4 The IR spectra of crosslinked polymers; (1) the upper figure is poly (MMA-co-EGDMA, 8 g: 2 g) particles, the lower figure is poly (MMA-co-EGDMA, 6 g: 4 g) particles.	102
C-5 The IR spectra of crosslinked polymers; (1) the upper figure is poly (2-EHA-co-MMA-co-EGDMA, 1.4: 5.6: 3.0 g) particles, the lower figure is poly (MMA-co-2-EHA-co-EGDMA, 5.6: 1.4: 3.0 g) particles.	103
C-6 The IR spectra of crosslinked polymers; poly (2-EHA-co-MMA-co-EGDMA, 3.5: 3.5: 3.0 g) particles.	104

ABBREVIATIONS

SPG	Shirasu porous glass
GPC	Gel Permeation Chromatography
DDS	drug delivery system
CV	coefficient of variation
SEM	Scanning Electron Microscope
FT-IR	Fourier Transform Infrared spectroscopy
DSC	Differential Scanning Calorimetry
OM	Optical microscope
HPLC	high performance liquid chromatography
μm	micrometer
nm	nanometer
O/W	oil-in-water emulsion
W/O	water-in-oil emulsion
O/W/O	oil-in-water-in-oil emulsion
W/O/W	water-in-oil-in-water emulsion
P_c	critical pressure
γ_{ow}	the oil/water interfacial tension
θ	the oil/water contact angle
d_m	the average pore size of the membrane of the SPG tube
d_e	average diameter of emulsion droplets
ν	the effective number of moles of cross-linked chains per gram of polymer
M_c	the molecular weight between cross-links
V_p	the volume fraction of polymer in the swollen mass
V_o	the molar volume of the solvent
χ	the polymer-solvent interaction parameter
d_r	the density of the polymer
d_s	the density of the solvent
D	the diffusion coefficient
U	the shear force of polymer network alone
K	the bulk modulus of polymer network alone
f	the frictional coefficient between the network and fluid medium

ABBREVIATIONS (Continued)

a	the final radius of the fully swollen gel
τ	swelling time
a_α	the radius of the gel after swelling
d_α	the diameter of the gel after swelling
d_t	the diameter of the particle at time t
l	depth of penetration
r	the radius of the cylindrical capillaries
t	the time of penetration
γ	is the surface tension of the liquid
θ_l	contact angle of the liquid on the capillary wall
η	the viscosity of the liquid
K_b	the effective radius of noncylindrical capillary pores including a tortuously factor
2-EHA	2-Ethylhexyl acrylate
MMA	Methyl methacrylate
2-EHMA	2-Ethylhexyl methacrylate
EGDMA	Ethyleneglycol dimethacrylate
ADVN	2,2-Azobis-2,4-dimethylvaleronitrile
PVA	Poly(vinyl alcohol)
SLS	Sodium sulfate
d_e	average droplet size
d_p	particle diameter
σ	standard deviation
d_n	the number average
n_i	the number of particles of a diameter d_i .