

อิทธิพลของตัวแปรต่อความสามารถในการควบน้ำของนิวทรัลไลซันต์
โพลี(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์) ซึ่งสังเคราะห์โดยวิธี
อินเวอร์สซัสเพนชัน โคลโพลิเมอไรเซชัน

นางสาวปัทมา พูลเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ สหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539
ISBN 974-635-919-3
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20502963

INFLUENCES OF REACTION PARAMETERS ON WATER SORPTION OF
NEUTRALIZED POLY(ACRYLIC ACID-CO-ACRYLAMIDE)
SYNTHESIZED BY INVERSE SUSPENSION POLYMERIZATION

Miss Pattama Phuncharoen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Polymer Science
Multidisciplinary Program of Petrochemical and Polymer

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-635-919-3

Copyright of the Graduate School, Chulalongkorn University

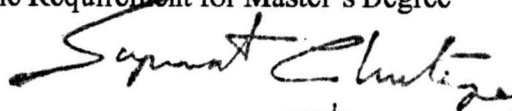
Thesis Title Influences of reaction parameters on water sorption of
neutralized Poly(acrylic acid-co-acrylamide) synthesized by
Inverse suspension polymerization

By Miss Pattama Phuncharoen

Department Polymer Science

Thesis advisor Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D.

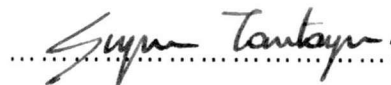
Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of the Requirement for Master's Degree



.....Dean of Graduate School

(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

Thesis Committee



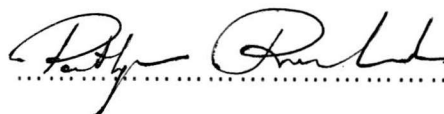
.....Chairman

(Associate Professor Supawan Tantayanon, Ph.D.)



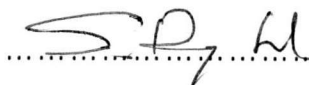
.....Thesis Advisor

(Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D.)



.....Member

(Professor Pattarapan Prasassarakich, Ph.D.)



.....Member

(Professor Somsak Damronglerd, Ph.D.)



.....Member

(Assistant Professor Khemchai Hemachandra, Ph.D.)

C 785252 : MAJOR POLYMER SCIENCE

KEY WORD: INVERSE SUSPENSION POLYMERIZATION / POLY(POTASSIUM ACRYLATE-CO-ACRYLAMIDE)

PATTAMA PHUNCHAROEN : INFLUENCES OF REACTION PARAMETERS ON WATER SORPTION OF NEUTRALIZED POLY(ACRYLIC ACID-CO-ACRYLAMIDE) SYNTHESIZED BY INVERSE SUSPENSION POLYMERIZATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUDA KIATKAMJORNWONG, Ph.D. 179 pp. ISBN 974-635-919-3.

Syntheses of highly water-absorbing polymers of poly(potassium acrylate-co-acrylamide) were carried out by an inverse suspension copolymerization. Acrylamide and potassium acrylate were used as comonomers and N,N'-methylenebisacrylamide as a cross-linker. They were polymerized by ammonium persulphate, a thermal initiator, in n-hexane emulsified by sorbitan monooleate (Span 80) surfactant at the temperature of 60°C for 2 h. The synthesized beads were collected by precipitation with excess methanol. The water absorption of synthesized copolymers were determined in distilled water.

The effects of the influential reaction parameters on water absorption of the synthesized copolymers were investigated from which they were produced with 5 molar of total monomer concentration, 1.4 g/l of initiator, 1:1.5 volume ratio of the aqueous phase to the organic phase, a cross-linking agent, 0.025 %mole of monomer and a stirring speed of 200 rpm. The water absorption ability of the synthesized copolymer, at 40 : 60 molar ratio of potassium acrylate to acrylamide was as high as 775 times the weight of dry polymer and having a high liquid absorption time (21.41 sec.) but with a rather low gel strength when swollen. The synthesized copolymer was soluble in water in the absence of the cross-linking agent. The water retention capability of the copolymers decreased with increasing the cross-linking agent and salt concentrations because of the osmotic pressure differential between the inside and outside of the swollen gel. The water absorption depended largely on the pH of buffer solution, type and concentration of salt solutions, which were used for liquid absorption capability of the copolymer, type and concentration of the suspending agent, concentration of the initiator, degree of neutralization of acrylic acid, total comonomer concentration and molar ratio of the comonomer. In addition, the synthetic copolymers were investigated for the ratio of polymerization, functional groups, thermal properties, and surface morphology by EA, FTIR, DSC and SEM, respectively.

ภาควิชา..... สหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลีเมอร์

สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์โพลีเมอร์

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต..... *Suda Kiatkamjornwong*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Suda Kiatkamjornwong*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -

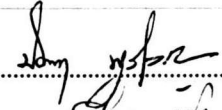
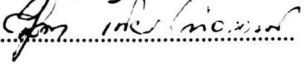
พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ปัทมา พูลเจริญ : อิทธิพลของตัวแปรต่อความสามารถในการดูค้ำของนิวทรัลไลซัด โพลี (อะครี ลิก กอเอช ดี-โค-อะครี ละไมด์) ซึ่งสังเคราะห์ โดยวิธี อินเวอร์ สซัสเพนชัน โคลิโพลิเมอไรเซชัน อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สุภา เกียรติกิจจรวงศ์ ; 179 หน้า, ISBN 974-635-919-3

งานวิจัยได้สังเคราะห์โพลิเมอร์ดูค้ำสูงของโพลี(โพแทสเซียมอะคริเลต-โค-อะครีละไมด์) โดยวิธีการสังเคราะห์แบบอินเวอร์สซัสเพนชัน โคลิโพลิเมอไรเซชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยา โคลิโพลิเมอไรเซชัน โดยมีอะครีละไมด์และโพแทสเซียมอะคริเลตเป็นโมโนเมอร์ร่วม พร้อมด้วยมีเอ็น, เอ็นเมทิลินบิสอะครีละไมด์เป็นสารเชื่อมขวาง และมีแอมโมเนียเพอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยาอยู่ในตัวกลางของนอร์มอลเฮกเซนที่ได้รับ การอิมัลซิไฟซ์ด้วยสารลดแรงตึงผิวซอร์บิทันโมโนโอเลอเตต(Span 80) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C. เป็นเวลา 2 ชม.สามารถตกตะกอนเม็ดของผลิตภัณฑ์ในเมทานอลปริมาณมากเกินพอ หาค่าความสามารถในการดูค้ำของโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ในน้ำกลับ

ได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการดูค้ำของโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยวิธีนี้พบว่า โคลิโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากภาวะที่ความเข้มข้นของโมโนเมอร์รวม 5 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารเริ่มปฏิกิริยา 1.4 กรัมต่อลิตรของวัฏภาคของน้ำ สัดส่วนของวัฏภาคน้ำต่อวัฏภาคสารอินทรีย์เท่ากับ 1 ต่อ 1.5 โดยปริมาตร ปริมาณสารเชื่อมขวาง 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยโมลของโมโนเมอร์ อัตราเร็วในการกวน 200 รอบต่อ นาที และสัดส่วนความเข้มข้นของโพแทสเซียมอะคริเลตต่ออะครีละไมด์เท่ากับ 40 : 60 มีความสามารถในการ ดูค้ำสูงถึง 775 เท่าของน้ำหนักโพลิเมอร์แห้งและอัตราการดูค้ำสูงถึง 21.41 วินาที แต่ความแข็งแรงของ เจลที่บวมน้ำยังไม่ดีนัก และโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้สามารถละลายในน้ำจากการเตรียมโพลิเมอร์นี้ ปรากฏจากสารเชื่อมขวาง ความสามารถในการดูค้ำของโพลิเมอร์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวาง เพิ่ม ความเข้มข้นของเกลือในสารละลาย อันเนื่องมาจากความแตกต่างของแรงดันออสโมซิสระหว่างภายในและ ภายนอกโมเลกุลของโพลิเมอร์ นอกจากนี้ค่าความสามารถในการดูค้ำของโพลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับค่าความ เป็นกรด-เบสของสารละลายบัฟเฟอร์ ชนิด และความเข้มข้นของสารละลายเกลือซึ่งใช้ทดสอบความสามารถ ในการดูค้ำของเหลวของโพลิเมอร์ ชนิด และปริมาณของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของสารเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณการนิวทรัลไลซัดของกรดอะครีลิก ความเข้มข้นรวมของโมโนเมอร์ร่วม และสัดส่วนของโมโนเมอร์ ร่วมด้วย นอกจากนี้ได้นำโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ตรวจสอบอัตราส่วนการโคลิโพลิเมอไรเซชัน หมู่ฟังก์ชัน สมบัติเชิงความร้อนและลักษณะพื้นผิว โดยใช้ EA, FTIR, DSC และ SEM ตามลำดับ

ภาควิชา สหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลิเมอร์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express her sincere gratitude to advisor, Associate Professor Suda Kiatkamjornwong, Ph.D. for her encouraging guidance, supervision and helpful suggestion throughout this research. In addition, she is also thankful to Associate Professor Supawan Tantayanon, Ph.D., Professor Pattarapan Prasassarakich, Ph.D., Assistant Professor Khemchai Hemachandra, Ph.D., and Professor Somsak Damronglead, Ph.D. for serving as chairman and on members of this thesis committee, respectively.

The financial research grants from Chulalongkorn University are very much appreciated. Many thanks are also extended to the Graduate School of Chulalongkorn University for partial research grant, during the period of 1995 to 1996, to Siam Resin Co.,Ltd., for kind support of acrylic acid and acrylamide, to Kao Industrial(Thailand) Co.,Ltd., for kind support of suspending agents, as well as the provision of all facilities from Polymer and Imaging Chemistry Laboratory, Department of Photographic Science and Printing Technology of Faculty of Science, Chulalongkorn University and The King Mongkut's Institute of Technology, North Bangkok for DSC utilities.

Finally, the author wishes to thanks towards all who have contributed suggestions and supports throughout this work, especially her family for love, aspiration, support, and encouragements.

CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT (IN ENGLISH).....	I
ABSTRACT (IN THAI).....	II
ACKNOWLEDGEMENTS.....	III
LIST OF TABLES.....	VIII
LIST OF FIGURES.....	X
NOMENCLATURE.....	XIV
CHAPTER	
1 INTRODUCTION	
1.1 Introduction.....	1
1.2 Objectives.....	2
1.3 Expected Benefits Obtainable for Future Development of the Research.....	2
1.4 Scope of the Investigation.....	3
2 THEORY AND LITERATURE REVIEW	
2.1 Superabsorbent Polymers(SAPs).....	5
2.2 Polyacrylates by Free Radical Chain Polymerization.....	24
2.2.1 Monomer concentration.....	27
2.2.2 Initiators.....	28
2.2.3 Neutralization.....	29
2.2.4 Other polymerization additives.....	30
2.2.5 Kinetics.....	31
2.2.6 Cross-linkers.....	31
2.3 Specific Polymerization Techniques.....	35
2.3.1 Solution polymerization.....	35

CHAPTER	PAGE
2.3.2 Graft copolymerization.....	36
2.3.3 Cross-linking after polymerization.....	36
2.3.4 Suspension polymerization.....	37
2.3.4.1 The aqueous phase and suspending agent	42
2.3.4.2 The monomer phase.....	46
2.3.5 Inverse suspension polymerization.....	47
2.4 Literature survey.....	59
3 EXPERIMENTAL	
3.1 Chemical, equipment, and glassware.....	73
3.1.1 Chemicals.....	73
3.1.2 Equipment and glassware.....	73
3.2 Apparatus.....	74
3.3 The synthesis of potassium poly(acrylate-co-acrylamide)	75
3.3.1 Optimum total concentration and molar ratio of the monomer solution.....	75
3.3.2 Optimum concentration of the cross-linking agent	76
3.3.3 Optimum neutralization degree of acrylic acid....	76
3.3.4 Optimum concentration of the initiator.....	77
3.3.5 Optimum concentration of the suspending agent..	78
3.3.6 Type of the suspending agent.....	78
3.4 Characterization of the copolymer.....	78
3.4.1 Identification of the functional groups of the copolymer.....	79
3.4.2 Determination of the thermal properties of the copolymer.....	79

CHAPTER	PAGE
3.4.3 Determination of the surface morphology of the copolymers.....	79
3.4.4 Determination of the copolymerization ratios of the initial monomer concentrations.....	80
3.4.5 Determination of rheological properties of the copolymers.....	80
3.5 Water absorbency of the copolymers.....	81
3.5.1 Indistilled water.....	81
3.5.2 In salt solutions.....	81
3.5.3 In buffer solutions.....	81
3.6 Aqueous absorbing rate of the copolymer.....	82
4 RESULT AND DISCUSSION	
4.1 Characterization the functional groups of the copolymer by FTIR.....	83
4.2 The optimum total monomer concentration, the molar ratio of monomer solutions and cross-linking agent concentration.....	87
4.3 Optimum the neutralization degree of acrylic acid.....	98
4.4 Optimum concentration of the initiator.....	99
4.5 The optimum concentration of the suspending agent.....	102
4.6 Type of suspending agent.....	104
4.7 Buffer effect on swelling behavior.....	108
4.8 Swelling behavior in salt solution.....	113
4.9 The rheological properties of the copolymers.....	118

CHAPTER	PAGE
4.10 Characterization.....	122
4.10.1 Thermal properties of the copolymers.....	122
4.10.2 Surface morphology of the copolymer beads...	126
5 CONCLUSION AND SUGGESTION FOR FUTURE WORK	
5.1 Conclusion.....	130
5.2 Suggestion for future work.....	134
REFERENCES.....	136
APPENDIX A.....	147
APPENDIX B.....	149
APPENDIX C.....	153
APPENDIX D.....	157
VITA.....	162

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
2.1 Application of SAPs.....	7
2.2 Classification of SAPs.....	8
2.3 Classification of hydrogels.....	10
2.4 Commercially available products.....	11
2.5 Major superabsorbent polymers and their features.....	13
2.6 Cross-linker reactivity effect on gel fraction.....	32
2.7 Reactivity ratios for structural analogs of cross-linkers.....	33
2.8 Polymerization process in heterogeneous aqueous dispersions.....	40
3.1 Chemicals.....	74
3.2 Inverse suspension copolymerization recipe.....	77
4.1 Assignments for FTIR spectrum of the poly(acrylate-co-acrylamide).....	83
4.2 Effect of the total monomer concentration and molar ratio of the monomers on the water absorbency and water absorption speed of the synthesized copolymer, without cross-linking agent..	88
4.3 Effect of the total monomer concentration and molar ratio of the monomers on the water absorbency and water absorption speed of the synthesized copolymer, in the presence of N,N' -MBA, cross- linking concentration = 0.025% mole of monomer	89
4.4 Effect of the total monomer concentration and molar ratio of the monomers on the water absorbency and water absorption speed of the synthesized copolymer, in the presence of N,N' -MBA, cross- linking concentration = 0.05% mole of monomer	90

TABLE	PAGE
4.5 Effect of the total monomer concentration and molar ratio of the monomers on the water absorbency and water absorption speed of the synthesized copolymer, in the presence of N,N' -MBA, cross-linking concentration = 0.075% mole of monomer	91
4.6 Effect of the neutralization degree of acrylic acid at various cross-linking agent concentration on water absorbency of the synthesized beads.....	98
4.7 Effect of the concentration of the initiator on water absorption capacity of synthesized copolymer beads.....	100
4.8 Effect of the suspending agent concentration on the water absorbency of the synthesized.....	102
4.9 Effect of type of the suspending agent on water absorbency.....	104
4.10 The chemical and physical properties of suspending agents.....	107
4.11 Effect of pH on swelling behavior beads at 25°C.....	109
4.12 Effect of different salt solution concentrations on water absorbency of the copolymer.....	113
4.13 Ionic strength of the salt solutions.....	117
4.14 The rheological properties of the copolymers.....	118
4.15 Effect of shear rates on viscosity and relationship between shear rates and shear stress of the copolymers, synthesized with various cross-linking agent concentrations.....	120
4.16 The T_g and T_m of the copolymers, synthesized with different suspending agents.....	123
Table A-1 Determination of copolymer composition of CHN/O method.....	148

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
2.1 Diagram of water absorption.....	18
2.2 Mechanism of swelling of superabsorbent polymers.....	20
2.3 The cross-linked, network structure of superabsorbent polymer and structure of cross-link(in detail).....	21
2.4 Relationships between swelling degree.....	23
[a] with ionization degree of polymer electrolyte	
[b] with cross-linking density of polymer network	
[c] with ionic strength of salt solution	
[d] with pH of polymer solution	
2.5 Dependence of the swelling ratio on the cross-link density and the functionality of the cross-linker. The two cross-linkers differ in efficiency.....	34
2.6 Comparison of the difference of inverse suspension polymerization and suspension polymerization.....	48
4.1 FTIR spectrum of the poly(acrylamide-co-potassium acrylate)	84
4.2 FTIR spectrum of the poly(acrylic acid).....	85
4.3 FTIR spectrum of the polyacrylamide.....	86
4.4 Effect of the cross-linking agent on the water absorbency of the synthesized copolymers at various molar ratios of the monomers when the total monomer concentration = 5 M	92
4.5 Effect of the cross-linking agent on the water absorbency of the synthesized copolymers at various molar ratios of the monomers when the total monomer concentration = 7 M	93

FIGURE	PAGE
4.6 Effect of the cross-linking agent on the water absorbency of the synthesized copolymers at various molar ratios of the monomers when the total monomer concentration = 10 M	94
4.7 Effect of the neutralization degree of acrylic acid at various cross-linking agent concentrations on the water absorbency of the synthesized beads.....	99
4.8 Effect of the concentration of initiator on water absorbing capacity of the synthesized copolymer beads.....	101
4.9 Effect of the suspending agent concentration on the water absorbency of the synthesized beads.....	103
4.10 SEM of copolymer beads, synthesized by Span 80.....	105
4.11 SEM of copolymer beads, synthesized by Span 60.....	106
4.12 SEM of copolymer beads, synthesized by Span 40.....	106
4.13 Effect of pH on swelling behavior of copolymer beads at 25°C	110
4.14 Effect of different salt solution concentrations on water absorbency of the copolymer.....	114
4.15 Effect of cation in series of salt of chloride on water absorbency of the copolymer.....	116
4.16 Effect of anion of salt solutions on water absorbency of the copolymer.....	116
4.17 The relationship between shear modulus and water absorbency of the synthesized copolymers, at various cross-linking agent concentrations.....	119
4.18 Effect of shear modulus on water absorbency of the synthesize copolymers.....	121

FIGURE	PAGE
4.19 Effect of shear rates on viscosity of the synthesized copolymers.....	121
4.20 The relationship between shear rates and shear stress of the synthesized copolymers.....	122
4.21 DSC Thermogram of the copolymers, synthesized with various type of Span, and 0.025% N,N'-MBA	124
4.22 DSC Thermogram of the copolymers, synthesized with various cross-linking concentrations, and Span 80.....	125
4.23 SEM micrograph of the water-soluble copolymer, without cross-linking agent.....	126
4.24 SEM micrograph of the cross-linked copolymer, with 0.025% N,N'-MBA.....	127
4.25 SEM micrograph of the cross-linked copolymer, with 0.05% N,N'-MBA.....	127
4.26 SEM micrograph of the cross-linked copolymer, with 0.075% N,N'-MBA.....	128
4.27 SEM micrograph showing the cellular structure of the copolymer beads at 500 x magnification.....	128
4.28 SEM micrograph showing the cellular structure of the copolymer beads at 1000 x magnification.....	129
4.29 SEM micrograph showing the huge cellular structure of the copolymer.....	129
Appendix B-1 Reversible deformation. A is the area and F is the applied force.....	150

FIGURE	PAGE
Appendix B-2 Irreversible deformation. A is the area and F is the applied force.....	151
Appendix C-3 Apparatus for determining ρ_x by uniaxial compression of the gel sample.....	156
Appendix D-1 DSC Thermogram of the copolymer, synthesized with Span 80, and 0.025% N,N'-MBA.....	157
Appendix D-2 DSC Thermogram of the copolymer, synthesized with Span 60, and 0.025% N,N'-MBA.....	158
Appendix D-3 DSC Thermogram of the copolymer, synthesized with Span 40, and 0.025% N,N'-MBA.....	159
Appendix D-4 DSC Thermogram of the copolymer, synthesized with Span 80, and non cross-linking agent.....	160
Appendix D-5 DSC Thermogram of the copolymer, synthesized with Span 80, and 0.075% N,N'-MBA.....	161

NOMENCLATURES

SAP	: superabsorbent polymer
HWAP	: highly water absorbing polymer
μ	: micron
mm	: millimeter
nm	: nanometer
HLB	: hydrophilic-lipophilic balance
wt%	: weight percent
$K_2S_2O_8$: potassium persulphate
NaCl	: sodium chloride
KI	: potassium iodide
KCl	: potassium chloride
KBr	: potassium bromide
$MgCl_2$: magnesium chloride
$CaCl_2$: calcium chloride
g/g	: gram per gram
$^{\circ}C$: degrees Celsius
AM	: acrylamide
KA	: potassium acrylate
$(NH_4)_2S_2O_8$: ammonium persulphate
N,N'-MBA	: N,N'-methylenebisacrylamide
KOH	: potassium hydroxide
HSPAA	: hydrolyzed starch-poly(acrylic acid) graft copolymer
HSPAN	: hydrolyzed starch-polyacrylonitrile graft copolymer
PAA	: partially cross-linked poly(acrylic acid salt)

PVA	: poly(vinyl alcohol)
PEO	: poly(ethylene oxide)
CMC	: carboxymethyl cellulose
MA-co-IB	: maleic acid-isobutylene copolymer
Span 40	: sorbitan monoplamate
Span 60	: sorbitan monostearate
Span 80	: sorbitan monooleate
g/l	: gram per liter
rpm	: round per minute
cm ³	: cubic centimeter
FTIR	: Fourier transform infrared spectrometry
T _g	: glass transition temperature
T _m	: melting temperature
DSC	: Differential Scanning Calorimetry
SEM	: Scanning Electron Microscopy
sec	: second
kV	: kilovolt
%w/v	: percent weight by volume
H ₂ O	: water
mol/dm ³	: mole per cubic decimeter
Q	: the ratio of the final swollen volume to the original unswollen volume of the network
χ ₁	: the Flory polymer-solvent interaction parameter
V ₁	: the molar volume of solvent
V _{2,r}	: the polymer volume fraction at cross-linking
\overline{M}_c	: the molecular weight of polymer chain between cross-links

\bar{M}_n	: the initial molecular weight of the uncross-linked polymer
ρ_x	: the cross-linking density
\bar{V}	: the specific volume of the polymer
I	: the degree of ionization of polymer electrolyte
$V_{2,}$: the polymer volume fraction in the equilibrium-swollen polymer
N	: the effective number of bond vectors between consecutive cross-links
pH	: the power of hydrogen ion
S^*	: ionic strength of salt solution added
V_u	: the molar volume of polymer repeating unit
V_0	: the volume of the unswollen structure
V_c	: effective number (or number of moles) of chains in a real network
R_p	: the polymerization rate
k_p	: the rate constant for the propagation step
k_d	: the rate constant for initiator decomposition
k_t	: the rate constant for the termination step
[M]	: monomer concentration
f	: efficiency factor for the initiator
[I]	: the concentration of initiator
[oxidant]	: the concentration of oxidant
[reductant]	: the concentration of reductant
\bar{V}	: the kinetic chain length
C_1	: the ionic concentration
Z_1	: the charge on individual ion
Pa	: Pascal
Pa.s	: Pascal sec.

U. S. Pat	: United States of America Patent
ed. (eds.)	: editor
EP	: European Patent
WO	: World Intellectual Property Organization
2 nd ed.	: second edition
3 rd ed.	: third edition
pp.	: page
Vol.	: Volume
J. of Chem. Ed.	: Journal of Chemistry Education
J. Poly. Sci. : Part A Polym. Chem.	: Journal of Polymer Science Part A : Polymer Chemistry
Eur. Polym. J.	: European Polymer Journal
J. of Appl. Polym. Sci.	: Journal of Applied Polymer Science
J. Sci. Res. Chula. Univ.	: Journal of Science Research, Chulalongkorn University