

**DEVELOPMENT OF CONDUCTIVE POLYTHIOPHENE FOR  
ACTUATOR APPLICATIONS: ELECTORRHEOLOGICAL FLUID**

Datchanee Chotpattananont

A Dissertation Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy  
The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University  
in Academic Partnership with  
The University of Michigan, The University of Oklahoma,  
and Case Western Reserve University

2005

ISBN 974-9651-79-0

I 2224 2983

**Thesis Title:** Development of Conductive Polythiophene for Actuator Applications: Electrorheological Fluid  
**By:** Datchanee Chotpattananont  
**Program:** Polymer Science  
**Thesis Advisor:** Assoc. Prof. Anuvat Sirivat  
Prof. Alexander M. Jamieson

---

Accepted by the Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

*Nantaya Yanumet*  
..... College Director  
(Assoc. Prof. Nantaya Yanumet)

Thesis Committee:

*Nantaya Yanumet*  
.....  
(Assoc. Prof. Nantaya Yanumet)

*Anuvat Sirivat*  
.....  
(Assoc. Prof. Anuvat Sirivat)

*Alexander M. Jamieson*  
.....  
(Prof. Alexander M. Jamieson)

*Pitt Supaphol*  
.....  
(Assist. Prof. Pitt Supaphol)

*Cattaleeya Pattamaprom*  
.....  
(Dr. Cattaleeya Pattamaprom)

## บทคัดย่อ

ครุชนิ โขติพัฒนานนท์ : การพัฒนาพอลิธิโอฟินสำหรับประยุกต์เป็นแอกชูเอเตอร์:  
ของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอล (Development of Conductive Polythiophene for Actuator  
Applications: Electrorheological Fluid) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์ และ ศ.ดร.  
อเล็กซานเดอร์ เอ็ม จาไมซัน 218 หน้า ISBN 974-9651-79-0

ของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยอนุภาค  
ของแข็งที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่ไม่นำไฟฟ้า สมบัติทางกระแสวิทยาของของไหล  
นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาค  
เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ในทิศทางขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งอนุภาคใน  
สายโซ่เหล่านี้ยึดติดกันด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ในงานวิจัยนี้ อนุภาคพอลิธิโอฟิน ได้ถูกสังเคราะห์ด้วย  
การพอลิเมอไรส์แบบออกซิเดทีฟ หลังจากนั้น ของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลได้ถูกเตรียมโดย  
กระจายอนุภาคพอลิธิโอฟินในซิลิโคน ออยล์ และทำการศึกษาผลของความแรงของสนามไฟฟ้า  
ปริมาณของอนุภาค ค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาค อุณหภูมิ และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ที่มี  
ต่อสมบัติทางกระแสวิทยาของของไหลนี้ เมื่อทำการทดลองวัดสมบัติทางกระแสวิทยาภายใต้  
สนามไฟฟ้าของของไหลนี้ พบว่า ของไหลนี้แสดงสมบัติเป็นของไหลอิเล็กโตรรีโอโลจิคอล และ  
จากการทดลองภายใต้แรงเฉือนแบบกวัดแกว่ง พบว่า ค่าสโตเรจและลอสโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  
เพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้า และค่ามอดูลัสนี้เพิ่มสูงขึ้นถึง 10 ลำดับชั้น เมื่อทำการเพิ่มความแรง  
ของสนามไฟฟ้าจาก 0 ถึง 2 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณของอนุภาคและ  
ค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาค จะมีผลต่อสมบัติทางอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลของของไหลนี้ ในช่วง  
ความแรงของสนามไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนักเท่านั้น เมื่อทำการทดลองเปิด-ปิดสนามไฟฟ้าสลับไปมา  
ผลปรากฏว่า ของไหลพอลิธิโอฟินมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อมีการเปิดสนามไฟฟ้า ค่า  
มอดูลัสของของไหลนี้จะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดจนถึงค่าสมมูลค่าหนึ่ง และเมื่อนำสนามไฟฟ้าออก ค่า  
มอดูลัสจะลดลงทันที แต่ไม่ลดลงถึงค่าเริ่มต้นก่อนการให้สนามไฟฟ้า และจากการวัดสมบัติทาง  
กระแสวิทยาภายใต้แรงเฉือนแบบกวัดแกว่งนี้ ยังพบอีกว่า เมื่อสนามไฟฟ้ามีความแรงมากพอ  
พฤติกรรมของของไหลพอลิธิโอฟินนี้จะเปลี่ยนไป โดยเปลี่ยนจากของไหลที่มีสมบัติคล้ายของ  
ไหลเป็นของไหลที่มีสมบัติคล้ายของแข็ง ซึ่งการวิเคราะห์ตามทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงจาก  
สารละลายเป็นของแข็ง สามารถนำมาใช้ได้กับการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่สภาวะสมมูลของของไหล  
นี้ จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าของเลขดัชนีหักเหกำลังวิสโคอีลาสติกในสภาวะเจลของของไหลนี้อยู่

ระหว่าง 0.01 ถึง 0.16 ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาค่า fractal dimension พบว่าอยู่ในช่วง 2.4-2.5 และค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้า นอกเหนือจากการศึกษาข้างต้นแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติทางอิเล็กโตรรีโอโลจิคอลของของไหลพอลิธรีโอพินภายใต้แรงเฉือนแบบต่อเนื่องด้วย จากการทดลองพบว่า ภายใต้สนามไฟฟ้า ของไหลนี้จะมีพฤติกรรมแบบของไหลบิงแฮม โดยของไหลประเภทนี้จะมีค่าความเค้นวิกฤตค่าหนึ่ง การไหลของของไหลบิงแฮมจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการให้แรงเค้นที่มากกว่าค่าความเค้นวิกฤตนี้ ซึ่งค่าความเค้นวิกฤตนี้มีความสัมพันธ์กับความแรงของสนามไฟฟ้าและปริมาณของอนุภาคเป็นฟังก์ชันยกกำลัง โดยเลขชี้กำลังที่กำกับของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นวิกฤตและความแรงของสนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยทฤษฎีพอลาไรเซชัน ซึ่งเท่ากับ 2 ก็ต่อเมื่อปริมาณและค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคไม่สูงมากนัก และจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นวิกฤตของของไหลนี้ พบว่า ค่าของความเค้นวิกฤตเพิ่มขึ้นเฉพาะในช่วงที่มีการเพิ่มของอุณหภูมิจนถึง 25 องศาเซลเซียสเท่านั้น โดยหลังจากนั้นค่าของความเค้นวิกฤตจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอีกต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบในปริมาณเล็กน้อยสามารถเพิ่มค่าของความเค้นวิกฤตได้ โดยอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวนี้สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อสนามไฟฟ้ามีความแรงต่ำ และจากการทดลองเปิด-ปิดสนามไฟฟ้าสลับไปมา ผลปรากฏว่า ของไหลพอลิธรีโอพินมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อมีการเปิดสนามไฟฟ้า ค่าความเค้นวิกฤตของของไหลนี้เพิ่มขึ้นทันที และเมื่อปิดสนามไฟฟ้า ของไหลภายใต้แรงเฉือนแบบต่อเนื่องนี้สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์ การจัดเรียงตัวของอนุภาคในของไหลพอลิธรีโอพิน สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพภายใต้สภาวะไร้แรงเฉือน ซึ่งพบว่า เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้านั้นอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างสายโซ่ โดยปริมาณและความหนาของโครงสร้างสายโซ่จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความแรงสนามไฟฟ้าและความเข้มข้นของอนุภาคในของไหล นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นแขนงย่อยของโครงสร้างสายโซ่อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในของไหลที่มีปริมาณอนุภาคมากและอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความแรงสูง

## ABSTRACT

4282001063: Polymer Science Program

Datchanee Chotpattananont: Development of Conductive  
Polythiophene for Actuator Applications: Electrorheological Fluid

Thesis Advisors: Assoc. Prof. Anuvat Sirivat

and Prof. Alexander M. Jamieson, 218 pp. ISBN 974-9651-79-0

Keywords: Polythiophene/ Conductive polymer/ Actuator/ Electrorheological  
fluid/ Suspension/ Gelation/ Oscillatory shear/ Steady-state shear/  
Yield stress

Electrorheological (ER) fluids are suspensions that exhibit a dramatic change in rheological properties in the presence of AC or DC electric fields. Commonly, they are composed of polarizable particles dispersed in a non-conducting fluid. In this study, poly(3-thiophenacetic acid), PTAA was synthesized via an oxidative polymerization and doped with perchloric acid to control its conductivity. The suspension containing perchloric acid-doped poly(3-thiophenacetic acid) as dispersed particles and silicone oil as medium was then prepared. The ER characteristics of PTAA/silicone oil suspensions were further investigated in both oscillatory and steady shear using rheometer which equipped to a high-voltage generator. The effects of electric field strength, particle concentration, particle conductivity, operating temperature, nonionic surfactant were examined. When the electric field is applied, the PTAA/silicone oil suspension exhibits viscoelastic behavior and the ER response is enhanced with increasing electric field strength. From oscillatory shear experiment, the dynamic moduli of the suspension grew up dramatically by ten orders of magnitude as the electric field strength is increased through the range 0-2 kV/mm. Moreover, the effects of particle concentration and conductivity become apparent at intermediate electric field strength ( $\sim 100$  V/mm). Upon subsequent applications of electric field, the suspension shows instantaneously response. After the electric field is released, the sample recovers but not completely. In addition, the equilibrium rheological properties of the suspension satisfy the sol-

gel transition conditions where  $\tan \delta$  becomes independent of frequency when the sufficiently strong electric field strength is provided. According to the gelation analysis, the values of the viscoelastic exponent  $n$  located in the range 0.05-0.83 result in the fractal dimension values of 2.5-1.5. The steady shear experimental results show that the PTAA/silicone oil suspension shows the typical ER response of Bingham flow behavior upon the application of electric field. The yield stress increases with electric field strength,  $E$ , and particle volume fraction,  $\phi$ , according to a scaling law of the form,  $\tau_y \propto E^\alpha \phi^\gamma$ . The scaling exponent  $\alpha$  approaches the value of 2, predicted by the polarization model, as the particle volume fraction decreases and when the doping level of the particles decreases. In addition, the yield stress under electric field initially increases with temperature up to 25 °C, and then levels off. The effect of nonionic surfactant addition is evident at relatively weak electric field strength. On applying and subsequently releasing the electric field, respectively, the steady state viscosity and the complex viscosity each instantaneously increase and then return to their baseline values, i.e., complete recovery. Morphology of PTAA/silicone oil suspension under quiescent conditions is further observed using optical microscope. The micrographs show that the particles are randomly distributed at zero field, whereas on application of the electric field, a transition to an organized fibrillar structure occurs. The density and thickness of the fibrils increases with the field strength and particle concentration and some branching is obviously observed. Furthermore, we investigated the creep and recovery behaviors of PTAA particles in silicone oil suspensions upon the application of electric field. The effects of field strength, particle concentration, and the doping degree (conductivity values) on creep and recovery behaviors of the ER fluid were examined. The data show that the creep curves of this ER fluid consisted of both elastic and viscous responses at low stresses. With increasing stress, the fluid showed an instantaneous elastic response whereas the retarded elastic and the viscous responses diminished. After the removal of the applied stress, the strain decreased but did not completely relax to the original value indicating that this fluid exhibited a partially elastic recovery. The elastic recovery response decreased with increasing stress and then disappeared at some critical stress value, corresponding to the static

yield stress. The equilibrium compliance parameters,  $J_C$  and  $J_R$ , were found to decrease with increasing particle concentration and particle conductivity. The recovery increased with increasing electric field strength, particle concentration, and particle conductivity. Moreover, the equilibrium compliance parameters at zero electric field,  $J_{C0}$  and  $J_{R0}$ , strongly depend on the particle concentration and particle conductivity. The activation electric field,  $E_C$ , and the recovery electric field,  $E_R$ , depend only on the particle conductivity but independent of particle concentration.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Appreciation is expressed to those who have made contributions to this dissertation. First the author gratefully acknowledges her advisors, Assoc. Prof. Anuvat Sirivat from The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University and Prof. Alexander M. Jamieson from Department of Macromolecular Science, Case Western Reserve University, for giving her the opportunity to be in the interesting avenue of research, their attention to the development of this work, invaluable knowledge, meaningful guidance, tolerance, and their encouragement all along the way.

She gratefully acknowledges all faculty members and staffs at The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University for their knowledge and assistances. C.P.O. Poon Arjpru is especially thanked for his valuable advice to the experiments and many fruitful discussions.

Assoc. Prof. Nantaya Yanumet, Assist. Prof. Pitt Supaphol, and Dr. Cattaleeya Pattamaprom are further acknowledged for being her dissertation committee, making comments, and their helpful ideas and suggestion.

She wishes to express her deep gratitude to her family for their unconditional love, continual encouragement, understanding, and for being her limitless inspiration source during all these years she has spent for her PhD study.

She owes her special thanks to all of her teachers in her life for giving her knowledge and supports. She is thankful for the contributions, wonderful friendship, liveliness, and supports from her friends and the other members of her research groups.

This work would not be carried out successfully without financial supports provided by the Thailand Research Fund (the RGJ grant no. PHD/0128/2542 and TRF-BGJ grant no. BGJ/03/2544), the American Fulbright Association (through the Fulbright – TRF Junior Research Scholarship Program), the Postgraduate Education and Research Programs in Petroleum and Petrochemical Technology (PPT Consortium), and the Conductive and Electroactive Polymers Research Unit.

## TABLE OF CONTENTS

	<b>PAGE</b>
Title Page	i
Abstract (in English)	iii
Abstract (in Thai)	vi
Acknowledgements	viii
Table of Contents	ix
List of Tables	xii
List of Figures	xiii
Abbreviations	xviii
List of Symbols	xix
 <b>CHAPTER</b>	
<b>I INTRODUCTION</b>	1
<b>II LITERATURE SURVEY</b>	12
<b>III EXPERIMENTAL</b>	21
<b>IV ELECTORRHEOLOGICAL PROPERTIES OF PERCHLORIC ACID-DOPED POLYTHIOPHENE SUSPENSIONS</b>	26
4.1 Abstract	26
4.2 Introduction	27
4.3 Experimental	28
4.4 Results and Discussion	31
4.5 Conclusions	39
4.6 Acknowledgements	39
4.7 References	40

<b>CHAPTER</b>		<b>PAGE</b>
<b>V</b>	<b>SCALING OF YIELD STRESS OF POLYTHIOPHENE SUSPENSIONS UNDER ELECTRIC FIELD</b>	<b>51</b>
	5.1 Abstract	51
	5.2 Introduction	52
	5.3 Experimental	53
	5.4 Results and Discussion	56
	5.5 Conclusions	61
	5.6 Acknowledgements	62
	5.7 References	62
<b>VI</b>	<b>GELATION OF POLYTHIOPHENE SUSPENSION DRIVEN BY AN ELECTRIC FIELD</b>	<b>77</b>
	6.1 Abstract	78
	6.2 Introduction	79
	6.3 Experimental	79
	6.4 Results and Discussion	80
	6.5 Conclusions	87
	6.6 Acknowledgements	88
	6.7 References	88
<b>VII</b>	<b>CREEP AND RECOVERY BEHAVIORS OF POLYTHIOPHENE-BASED ELECTRORHE- OLOGICAL FLUID</b>	<b>98</b>
	7.1 Abstract	98
	7.2 Introduction	99
	7.3 Experimental	100
	7.4 Results and Discussion	101
	7.5 Conclusions	107
	7.6 Acknowledgements	108
	7.7 References	108

<b>CHAPTER</b>		<b>PAGE</b>
<b>VIII</b>	<b>CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS</b>	123
	<b>REFERENCES</b>	127
	<b>APPENDICES</b>	130
<b>Appendix A</b>	The FTIR spectrum of poly(3-thiophene acetic acid)	130
<b>Appendix B</b>	The <sup>1</sup> H-NMR spectrum of poly(3-thiophene acetic acid)	132
<b>Appendix C</b>	The UV-Visible spectra of poly(3-thiophene acetic acid)	134
<b>Appendix D</b>	The thermal analysis	135
<b>Appendix E</b>	Morphological Observation	138
<b>Appendix F</b>	Four-point probe system for conductivity measurement	140
<b>Appendix G</b>	Determination of ohmic's law regime	142
<b>Appendix H</b>	Determination of the geometric correction factor (K)	145
<b>Appendix I</b>	Specific conductivity measurement	147
<b>Appendix J</b>	The electrorheological properties under the oscillatory shear measurement	157
<b>Appendix K</b>	The electrorheological properties under the steady shear measurement	187
<b>Appendix L</b>	The creep and recovery behaviors of HClO <sub>4</sub> doped poly(3-thiopheneacetic acid)	191
	<b>CURRICULUM VITAE</b>	197

**LIST OF TABLES**

<b>TABLE</b>		<b>PAGE</b>
<b>CHAPTER IV</b>		
4.1	Properties of HClO <sub>4</sub> doped PTAA suspensions in silicone oil and electrical conductivity values of PTAA pellets	43
4.2	Induction and recovery times at 25 ± 0.1 °C of HClO <sub>4</sub> doped PTAA suspensions under various electric field strengths	43
<b>CHAPTER VI</b>		
6.1	Properties of HClO <sub>4</sub> doped PTAA suspensions in silicone oil and electrical conductivity values of PTAA pellets	92
6.2	Viscoelastic properties of HClO <sub>4</sub> doped PTAA suspensions in silicone oil at temperature of 25 °C	93
<b>CHAPTER VII</b>		
7.1	Viscoelastic properties of HClO <sub>4</sub> doped PTAA suspensions in silicone oil (viscosity 100 cSt) at temperature of 25 °C	110
7.2	Values of the equilibrium compliance parameters and the activation electric field of PTAA/silicone oil suspensions	111

## LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
<b>CHAPTER I</b>	
1.1	Approach for classification of smart or active materials <span style="float: right;">1</span>
1.2	Repeating units of several conductive polymers <span style="float: right;">7</span>
1.3	Schematic representation of the band structure of a metal, a semiconductor, and an insulator. ( $E_g$ is the energy gap between the valence band, VB, and the conduction band, CB) <span style="float: right;">8</span>
1.4	Soliton in trans-polyacetylene (left) and electronic state induced between the VB and CB by the soliton (right) <span style="float: right;">9</span>
<b>CHAPTER II</b>	
2.1	Schematic draw of rheological behavior of the electrorheological fluids <span style="float: right;">13</span>
2.2	<p><b>(a)</b> In the presence of an electric field, the particles in an ER fluid form chains or fibrillated structures;</p> <p><b>(b)</b> Mechanism of chains formation and alignment of dipole particles. The interactions of these dipoles cause attraction, repulsion, rotation, and alignment of particles, creating chains that align with the applied electric field <span style="float: right;">14</span></p>
<b>CHAPTER IV</b>	
4.1	Scanning electron microscopy of $\text{HClO}_4$ doped polythiophene particles <span style="float: right;">44</span>
4.2	Storage and loss moduli of 20% wt. $\text{HClO}_4$ highly doped polythiophene/silicone oil suspension (HPT20) at $25 \pm 0.1$ °C: <b>(a)</b> storage moduli $G'$ ; <b>(b)</b> loss moduli $G''$ <span style="float: right;">45</span>

FIGURE	PAGE
4.3 Storage and loss moduli of HClO <sub>4</sub> highly doped polythiophene/silicone oil suspensions at 25 ± 0.1 °C: (a) storage moduli G'; (b) loss moduli G''	46
4.4 Storage and loss moduli of 20% wt. HClO <sub>4</sub> doped polythiophene/silicone oil suspensions at temperature of 25 ± 0.1 °C: (a) storage moduli G'; (b) loss moduli G''	47
4.5 G' and G'' values at frequency 0.01 rad/s of HClO <sub>4</sub> doped polythiophene/silicone oil suspensions at temperature of 25 ± 0.1 °C: (a) highly doped, 10% and 20% wt. and (b) lowly doped and highly doped, 20% wt.	48
4.6 Temporal response of storage moduli G' of (a) 20% wt. HClO <sub>4</sub> highly doped polythiophene/Silicone oil suspension (HPT20) at various electric field strength (b) HClO <sub>4</sub> doped polythiophene/Silicone oil suspension at electric field strength 1000 V/mm at temperature of 25 ± 0.1 °C	49
4.7 Master plot superposing G' and G'' data of HClO <sub>4</sub> doped polythiophene/silicone oil suspensions at 25 ± 0.1 °C: (a) storage moduli G'; (b) loss moduli G''. Open symbols represent LPT20 and solid symbols represent HPT20. Here $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-2}$ F/m, $\epsilon_s = 2.71$ F/m, $\mu_s = 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s, and $\beta = 0.9985$ and $0.9999$ , respectively, for LPT20 and HPT20	50

## CHAPTER V

5.1 Measurement of the static yield shear stress with different electric field strengths using controlled shear stress sweep for 5 wt % highly doped polythiophene suspension (HPT5) at 25 °C	67
---	----

<b>FIGURE</b>	<b>PAGE</b>
5.2 Effect of particle concentration on the static yield stress of highly doped polythiophene suspensions at various electric field strengths The lines indicate least squares fits to a power-law which yields scaling exponent values, $\alpha$ , of 1.94, 1.81, and 1.69, for the HPT5, HPT10, and HPT20 suspensions, respectively	68
5.3 Effect of particle conductivity on the static yield stress of 20 wt % HClO <sub>4</sub> doped polythiophene suspension at various electric field strengths; (O) HPT20, (□) LPT20, and (∇) undoped polythiophene. The lines indicate least squares fits to a power-law which yields scaling exponent values, $\alpha$ , of 1.90, 1.90, and 1.69 for the UPT20, LPT20, and HPT20 suspensions, respectively	69
5.4 The dependence of the static yield stress on electric field strength for different volume fractions of highly doped polythiophene suspension (HPT) at 25 °C	70
5.5 The effect of operating temperature on static yield stress of 20 wt % HClO <sub>4</sub> doped polythiophene suspension (HPT20) at various electric field strengths	71
5.6 Effect of addition of Tween20 on the static yield stress of 20 wt % HClO <sub>4</sub> doped polythiophene suspension (HPT20) at various electric field strengths	72
5.7 Effect of switching the applied electric field on the viscosity of a 20 wt % highly HClO <sub>4</sub> doped polythiophene suspensions during stress sweep test at 25 oC: an applied field of 2 kV/mm is switched on and off alternately; (a) steady shear viscosity and (b) complex viscosity	73
5.8 Optical micrographs of 5 wt % highly doped PTAA/silicone oil suspension (HPT5) at various electric field strengths under quiescent conditions	74

FIGURE	PAGE
5.9 Optical micrographs of HPT5 under quiescent conditions, following application of a constant electric field of 3 kV/mm	75
5.10 Optical micrographs of highly doped PTAA/silicone oil suspensions (HPT) under quiescent conditions at different particle concentrations and electric field strengths	76

### CHAPTER VI

6.1 Storage and loss moduli of 20% wt. HClO <sub>4</sub> highly doped polythiophene/0.1 Pa.s silicone oil suspension (HPT20/η0.1) at 25 ± 0.1 °C: <b>(a)</b> storage moduli G'; <b>(b)</b> loss moduli G''	94
6.2 Storage and loss moduli of 20% wt. HClO <sub>4</sub> highly doped polythiophene/0.5 Pa.s silicone oil suspension (HPT20/η0.5) at 25 ± 0.1 °C: <b>(a)</b> storage moduli G'; <b>(b)</b> loss moduli G''	95
6.3 Storage and loss moduli of 20% wt. HClO <sub>4</sub> highly doped polythiophene/silicone oil suspension at 25 ± 0.1 °C: <b>(a)</b> storage moduli G'; <b>(b)</b> loss moduli G''. White symbols are for 0.1 Pa.s oil and filled symbols are for 0.5 Pa.s oil	96
6.4 tan δ vs. frequency of HClO <sub>4</sub> doped polythiophene/silicone oil suspensions as various electric field strengths: <b>(a)</b> HPT20/η0.1 and <b>(b)</b> HPT20/η0.5	97

### CHAPTER VII

7.1 Schematic diagram of compliance response of creep and recovery curves under a constant applied shear stress and the removal of stress for the typical viscoelastic material	112
7.2 Creep and recovery curves of the 20 wt% highly doped PTAA suspension under the electric field strength of 1 kV/mm at various applied stress values: (O) 5 Pa and (Δ) 10 Pa	113

FIGURE	PAGE
7.3 Creep and recovery curves of the 20 wt% highly doped PTAA suspension under the electric field strength of 1 kV/mm at various applied stress values: ( $\diamond$ ) 50 Pa, ( $\nabla$ ) 70 Pa, and ( $\square$ ) 76.5 Pa	114
7.4 The % recovery as a function of the applied stress of 20% wt highly doped PTAA suspension under field strength of 1 kV/mm	115
7.5 Creep and recovery curves of the 20 wt% highly doped PTAA suspension at a constant applied stress value of 50 Pa with various electric field strengths	116
7.6 Equilibrium creep compliance, $J_C$ , of highly doped PTAA suspensions at a constant applied stress of 50 Pa at various electric field strengths	117
7.7 Equilibrium recovery compliance, $J_R$ , of the highly doped PTAA suspensions at a constant applied stress of 50 Pa at various electric field strengths	118
7.8 The % recovery as a function of the electric field strength of highly doped PTAA suspensions at a constant applied shear stress of 50 Pa	119
7.9 Equilibrium creep compliance, $J_C$ , of 20% wt doped PTAA suspensions at a constant applied stress of 50 Pa at various electric field strengths.	120
7.10 Equilibrium recovery compliance, $J_R$ , of 20% wt doped PTAA suspensions at a constant applied stress of 50 Pa at various electric field strengths.	121
7.11 The % recovery as a function of the electric field strength of 20% wt. $\text{HClO}_4$ doped PTAA suspensions at a constant applied shear stress of 50 Pa	122

**ABBREVIATION**

ER	Electrorheology
DC	Direct current
AC	Alternate current
PTAA	Poly (3-thiophene acetic acid)
FT-IR	Fourier transform infrared spectrometer
NMR	Nuclear magnetic resonance spectrometer
UV-Vis	Ultraviolet-visible spectrometer
TGA	Thermogravimetric analysis
SEM	Scanning electron microscopy
HPT5	5% wt. highly doped polythiophene suspension
HPT10	10% wt. highly doped polythiophene suspension
HPT20	20% wt. highly doped polythiophene suspension
LPT20	20% wt. lowly doped polythiophene suspension
UPT20	20% wt. undoped polythiophene suspension
CSS	Controlled shear stress

**LIST OF SYMBOL**

$\tau$	shear stress
$\tau_y$	yield stress
$\dot{\gamma}$	shear rate
$E_0$	applied electric field strength
$\eta$	shear viscosity
$G'$	storage modulus (Pa/s)
$G''$	loss modulus (Pa/s)
$t_{ind}$	induction time
$t_{rec}$	recovery time
$\phi$	volume fraction
$\alpha$	scaling exponent
$\gamma$	scaling exponent
$\sigma$	electrical conductivity
R	resistant
t	disk thickness
K	geometric correction fractor
$\beta$	relative polarizability
$K_f$	dielectric permittivity of medium
$\eta^*$	complex oscillatory steady shear viscosity
$\omega$	frequency
Hz	Hertz
$J_C$	equilibrium creep compliance
$J_R$	equilibrium recovery compliance