สารบัญเรื่อง

บทที่	เรื่อง	เลขหน้า
บทที่ 1	**บทนำ**	14
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	14
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	21
บทที่ 2	**วิธีการทดลอง**	22
	2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
	2.2 การสังเคราะห์กราฟโคพอลิเมอร์	23
	- *การสังเคราะห์ bis-sulfonium salt โมโนเมอร์*	23
	- *การสังเคราะห์พอลิเมอร์พรีเคอเซอร์*	24
	- *การสังเคราะห์แมคโครอินนิเฟอร์เตอร์*	25
	- *การสังเคราะห์ PPX-g-PSCMS กราฟโคพอลิเมอร์*	25
	- *การเตรียม PPX-g-PSFu*	26
	2.3 การสังเคราะห์ฟลูเลอรีนกราฟ พอลิไสตรีน (PSFu)	27
	2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างพอลิเมอร์	29
	- *โครงสร้างเคมี*	29
	- *น้ำหนักโมเลกุล*	29
	- *สมบัติทางความร้อน*	29
	2.5 การตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยา	30
	2.6 เทคนิคโวลแทมเมทรี	30
	2.7 การขึ้นรูปและทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์	31
	2.8 การวัดค่ากระแสและความต่างศักย์	33
บทที่ 3	**ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล**	34
	3.1 การสังเคราะห์โมโนเมอร์และพรีเคอเซอร์	34
	3.2 การดัดแปรพอลิเมอร์พรีเคอเซอร์เพื่อเตรียมเป็นสารแมคโครอินนิเฟอเดอร์	35
	3.3 การสังเคราะห์กราฟโคพอลิเมอร์	37
	3.4 การสังเคราะห์ PPX-g-PSFu	42
	3.5 การศึกษาผลของปัจจัยในการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุกึ่งตัวนำ	45
	3.6 ผลของปัจจัยในการเตรียมฟิล์มต่อความหนา	48
	3.7 ผลของชนิดและปริมาณสาร PPX-*g*-PSFu ต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์	53

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	เรื่อง	เลขหน้า
	- *ผลการวิเคราะห์ด้านไฟฟ้าเคมีและค่าระดับพลังงาน*	59
	3.8 ผลของชนิดอิเลคโทรด	63
	3.9 การสังเคราะห์ PSFu เพื่อศึกษาการใช้งานเป็นตัวรับอิเล็กตรอน	69
	- *การสังเคราะห์ P(S-CMS)*	69
	3.10 การเตรียมฟลูเลอรีนกราฟพอลิสไตรีน	72
	- *ค่าระดับชั้นพลังงาน HOMO-LUMO ของ PSFu*	73
	3.11 ผลของชนิดและปริมาณสารรับอิเล็กตรอนต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์	79
	3.12 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบบัลค์เฮทเทอโรจังก์ชันระบบที่ใช้ *rr*-P3HT เป็นตัวให้อิเล็กตรอน	85
บทที่ 4	**สรุปผลการทดลอง**	92
เอกสารอ้างอิง		94
Output		95
ภาคผนวก	• Reprint of the first published paper	96
	• Proof of the submitted second manuscritp	

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	เลขหน้า
รูปที่ 1.1	กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์	15
รูปที่ 1.2	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์	15
รูปที่ 1.3	กลไกการแยกตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลใน exciton ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ	16
รูปที่ 1.4	หลักการทำงานของ donor-acceptor hetero junction	17
รูปที่ 1.5	หลักการทำงานของ bulk Hetero-junction solar cell	18
รูปที่ 1.6	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ bulk heterojunction ซึ่งประกอบด้วยเฟสของ donor และ acceptor ผสมกัน	19
รูปที่ 2.1	เส้นทางการสังเคราะห์ PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์	24
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ฟลูเลอรีนกราฟพอลิสไตรีน	27
รูปที่ 2.3	เซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับทดสอบด้วยเทคนิค CV	31
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของวัสดุฐานรองและชั้นผิวเคลือบที่ประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์	32
รูปที่ 2.5	ฟิล์มทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกระแสและความต่างศักย์	33
รูปที่ 3.1	สเปคตรัม FTIR ของไดคลอโรพาราไซลีนและเกลือของบิสซัลโฟเนียมโมโนเมอร์	34
รูปที่ 3.2	พอลิเมอร์พรีเคอเซอร์ (PPX) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา (ซ้าย) ในขณะแช่ในถุงไดอะไลซิส (กลาง) และหลังจากทำให้บริสุทธิ์ (ขวา)	35
รูปที่ 3.3	สเปคตรัม FTIR ของสารพอลิเมอร์พรีเคอเซอร์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับ NaDTC	36
รูปที่ 3.4	ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ PPX ก่อน (ภาพซ้าย) และหลังทำ heat treatment (ภาพขวา)	36
รูปที่ 3.5	สเปคตรัม ^{1}H-NMR ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดัดแปลงพรีเคอเซอร์ด้วย NaDTC	37
รูปที่ 3.6	สเปคตรัม ^{1}H-NMR ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกราฟสไตรีนและ คลอโรเมธิลสไตรีนลงบนโมเลกุลสารแมคโครอินนิเฟอเตอร์	39
รูปที่ 3.7	DSC เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยากราฟโคพอลิเมอร์ไรเซชัน	40
รูปที่ 3.8	GPC โครมาโตแกรมของสารแมคโครอินนิเฟอเตอร์และของกราฟโคพอลิเมอร์	41
รูปที่ 3.9	สเปคตรัม FTIR ของ PPX-*g*-P(S-CMS) กราฟโคพอลิเมอร์ ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา ATRA	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	เลขหน้า
รูปที่ 3.10	สเปคตรัม UV/Visible ของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับจากการทำปฏิกิริยา ATRA	43
รูปที่ 3.11	แสดง TGA เทอร์โมแกรมของ PPX-*g*-P(S-CMS) ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ATRA	44
รูปที่ 3.12	สารละลายของ *rr*-P3HT (ซ้าย) และ *rd*-P3HT (ขวา) ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน	45
รูปที่ 3.13	ผิวเคลือบ *rd*-P3HT บนซิลิกอนเวเฟอร์เคลือบโดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่เตตระไฮโดรฟูราน (ก), ไดคลอโรเบนซีน (ข), โทลูอีน (ค), และ คลอโรฟอร์ม (ง)	47
รูปที่ 3.14	ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบแสงของ *rd*-P3HT ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน ผสมโทลูอีนที่อัตราส่วน 4:6 (ก), 6:4 (ข), 2:8 (ค) และ 8:2 (ง) โดยปริมาตร	48
รูปที่ 3.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความหนาของชั้นฟิล์ม *rd*-P3HT	49
รูปที่ 3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเคลือบเหวี่ยงกับความหนาของชั้นฟิล์ม *rr*-P3HT	50
รูปที่ 3.17	DSC เทอร์โมแกรมของ *rd*-P3HT และ *rr*-P3HT	50
รูปที่ 3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์ม BHJ กับปริมาณฟลูเลอรีน	51
รูปที่ 3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์ม BHJ กับปริมาณ PSFu	52
รูปที่ 3.20	สเปคตรัม ^{1}H-NMR ของสารแมคโครอินนิเฟอเตอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้สัดส่วนน้ำหนัก bissulfonium salt ต่อไดเอธิลไดไธโอคาบาเมต เท่ากับ 1/0.1	55
รูปที่ 3.21	สเปคตรัม ^{1}H-NMR ของสารแมคโครอินนิเฟอเตอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้สัดส่วนน้ำหนัก bissulfonium salt ต่อไดเอธิลไดไธโอคาบาเมต เท่ากับ 1/0.3	56
รูปที่ 3.22	โครงสร้างเคมีและแผนภาพแสดงโครงสร้างอย่างง่ายของ PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์	53
รูปที่ 3.23	แผนภาพแสดงโครงสร้างอย่างง่ายของ PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	57
รูปที่ 3.24	ตัวอย่างกราฟ cyclic voltamogram ของ PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์	59
รูปที่ 3.25	ตัวอย่างสเปคตรัม UV/Visible ของ PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์	60
รูปที่ 3.26	กราฟความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ P3HT/C_{60} ระบบปกติและระบบที่มีการเติม PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์ 3 และ 4 ลงไปเป็นสารช่วยผสม	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	เลขหน้า
รูปที่ 3.27	แผนภูมิแสดงระดับชั้นพลังงานของ P3HT, ฟลูเลอรีน PPX-*g*-PSFu และขั้วอิเลคโทรดใช้ในการขึ้นรูปเซลล์ระบบเดิม ITO-PEDOT:PSS/Al (ภาพซ้าย) และระบบใหม่ ITO/TiO_2/Au (ภาพขวา)	63
รูปที่ 3.28	กราฟความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (ทั้งระบบ ITO-PEDOT:PSS/Al และระบบ ITO-TiO_2/Au) ที่มีการเติม PPX-*g*-PSFu ชนิดต่างๆ ลงไป	64
รูปที่ 3.29	ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มวัสดุผสม P3HT/ C_{60} (สัดส่วน 5/1 โดยน้ำหนัก) ระบบปกติปราศจากกราฟโคพอลิเมอร์ (ซ้ายบน) และระบบที่มีการเติม PPX-*g*-PSFu หมายเลข 1 (ขวาบน) PPX-*g*-PSFu หมายเลข 3 (ซ้ายล่าง) และ PPX-*g*-PSFu หมายเลข 4 (ขวาล่าง)	67
รูปที่ 3.30	ภาพถ่าย AFM ในแบบ height image (ซ้าย) และแบบ phase image (ขวา) ของฟิล์มวัสดุผสม P3HT/ C_{60} (สัดส่วน 5/1 โดยน้ำหนัก) ระบบที่มีการเติม PPX-*g*-PSFu หมายเลข 4 ในปริมาณ 40 pph	68
รูปที่ 3.31	สเปคตรัม ^{1}H-NMR ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันของสไตรีนและคลอโรเมธิลสไตรีน	69
รูปที่ 3.32	DSC เทอร์โมแกรมของ P(S-CMS) โคพอลิเมอร์	71
รูปที่ 3.33	สเปคตรัม FTIR ของ P(S-CMS) โคพอลิเมอร์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ATRA	72
รูปที่ 3.34	สเปคตรัม UV/visible ของ P(S-CMS) โคพอลิเมอร์และ PSFu	73
รูปที่ 3.35	TGA เทอร์โมแกรมของ PSFu ชนิดต่างๆ	74
รูปที่ 3.36	สารละลาย PSFu ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ P(S-CMS) ชนิดต่างๆ เป็นสารตั้งต้น	76
รูปที่ 3.37	กราฟ cyclic voltamogram ของ PSFu หมายเลข 1	77
รูปที่ 3.38	สเปคตรัม UV/Visible ของ PSFu หมายเลข 1	78
รูปที่ 3.39	แผนภูมิแสดงระดับชั้นพลังงานของ PSFu และวัสดุกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่ใช้ในการขึ้นรูปเซลล์	79
รูปที่ 3.40	กราฟความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่มีการเติมPSFu (โคพอลิเมอร์หมายเลข 3) เป็นวัสดุรับอิเล็กตรอนในปริมาณต่าง	79
รูปที่ 3.41	ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ rd-P3HT/ C_{60} และ rd-P3HT/PSFu	80
รูปที่ 3.42	ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ของฟิล์ม *rd*-P3HT ผสมกับฟลูเลอรีนในปริมาณต่างๆ 0 pph (ก), 20 pph (ข), 40 pph (ค), 60 pph (ง), 80 pph (จ), และ100 pph (ฉ) (กำลังขยาย 50 เท่า)	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	เลขหน้า
รูปที่ 3.43	ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ของฟิล์ม *rd*-P3HT ผสมกับ PSFu ในปริมาณต่างๆ 20 pph (ก), 40 pph (ข), 60 pph (ค), 80 pph (ง), และ100 pph (จ) (ที่กำลังขยาย 50 เท่า)	81
รูปที่ 3.44	ภาพถ่ายด้วยเทคนิค AFM ในแบบ phase image ของฟิล์ม *rd*-P3HT ผสมกับฟลูเลอรีนในปริมาณต่างๆ 0 pph (ก), 20 pph (ข), 40 pph (ค), 60 pph (ง), 80 pph (จ), และ100 pph (ฉ)	82
รูปที่ 3.45	ภาพถ่ายด้วยเทคนิค AFM ในแบบ phase image ของฟิล์ม *rd*-P3HT ผสมกับ PSFuในปริมาณต่างๆ 20 pph (ก), 40 pph (ข), 60 pph (ค), 80 pph (ง), และ 100 pph (จ)	84
รูปที่ 3.46	ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ *rr*-P3HT/ C_{60} และ *rr*-P3HT/PSFu ที่ปริมาณวัสดุรับอิเล็กตรอนต่างๆ	85
รูปที่ 3.47	ภาพถ่ายด้วยเทคนิค AFM ในแบบ topograph ของฟิล์ม *rr*-P3HT ผสมฟลูเลอรีนในปริมาณต่างๆ 0 pph (ก), 20 pph (ข), 40 pph (ค), 60 pph (ง), 80 pph (จ), และ 100 pph (ฉ)	86
รูปที่ 3.48	ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ของฟิล์ม *rr*-P3HT ผสมกับฟลูเลอรีนในปริมาณต่างๆ 0 pph (ก), 20 pph (ข), 40 pph (ค), 60 pph (ง), 80 pph (จ), และ100 pph (ฉ) (กำลังขยาย 50 เท่า)	87
รูปที่ 3.49	ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ของฟิล์ม *rd*-P3HT ผสมกับ PSFu ในปริมาณต่างๆ 20 pph (ก), 40 pph (ข), 60 pph (ค), 80 pph (ง), และ100 pph (จ) (กำลังขยาย 50 เท่า)	88
รูปที่ 3.50	ภาพถ่ายด้วยเทคนิค AFM ในแบบ phase image ของฟิล์ม *rr*-P3HT ผสม PSFu ในปริมาณต่างๆ 20 pph (ก), 40 pph (ข), 60 pph (ค), 80 pph (ง), และ 100 pph (จ)	90

สารบัญตาราง

ตารางที่	คำบรรยายตาราง	เลขหน้า
ตารางที่ 2.1	รายการสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	22
ตารางที่ 2.2	เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	23
ตารางที่ 3.1	ปริมาณผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพในการกราฟโมโนเมอร์ลงบนโมเลกุลแมคโครอินนิเฟอเตอร์ชนิดต่างๆ	38
ตารางที่ 3.2	ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	46
ตารางที่ 3.3	ผลการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์จากตัวทำละลายต่างๆ	47
ตารางที่ 3.4	สัดส่วน PPX ต่อ DTC ที่ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แมคโครอินนิเฟอเตอร์และสัดส่วนโมลแมคโครอินนิเฟอเตอร์ต่อโมโนเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ PPX-*g*-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์	54
ตารางที่ 3.5	ร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์จากการกราฟ และร้อยละประสิทธิภาพในการกราฟ รวมทั้งปริมาณฟลูเลอรีนใน PPX-*g*-PSFu ชนิดต่างๆ	58
ตารางที่ 3.6	ศักย์ไฟฟ้า ค่าระดับชั้นพลังงานและค่าพลังงานแถบของ PPX-g-PSFu กราฟโคพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	60
ตารางที่ 3.7	ผลของการเติมสารช่วยผสม PPX-*g*-PSFu (20 pph) ชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ P3HT/C_{60} ในระบบที่ใช้ ITO-PEDOT:PSS และ Al เป็นขั้วอิเลคโทรด	62
ตารางที่ 3.8	ผลของการเติมสารช่วยผสม PPX-*g*-PSFu (20 pph) ชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ P3HT/C60 ในระบบที่ใช้ ITO/TiO_2 และ Au เป็นขั้วอิเลคโทรด	65
ตารางที่ 3.9	ผลการวิเคราะห์ P(S-CMS) โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GPC, ^{1}H-NMR, และ XRF	70
ตารางที่ 3.10	ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟลูเลอรีนใน PSFu ด้วยเทคนิค TGA	74
ตารางที่ 3.11	ความสามารถในการละลายของตัวรับอิเล็กตรอนในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	75
ตารางที่ 3.12	ค่าระดับชั้นพลังงาน HOMO-LUMO และค่าพลังงานแถบของ PSFu วัสดุกึ่งตัวนำอื่นๆ	78

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย
DTC	Diethyldithiocarbamate
P(S-CMS)	Poly(styrene-chloromethylstyrene)
PPX-*g*-P(S-CMS)	Polyphenylene vinylene-g-Poly(styrene-chloromethylstyrene)
PSFu	Poly(styrene-fullerene)
PPX-*g*-PSFu	Polyphenylene-g-Poly(styrene-fullerene)
HOMO	ระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่
LUMO	ระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่
eV	อิเล็กตรอน-โวลต์
ITO	อินเดียมทินออกไซด์
PEDOT	Polyethylenedioxythiophene
CV	Cyclic voltametry
DSC	Differential scanning calorimetry
^{1}H-NMR	Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
GPC	Gel permeation chromatography
ATRA	Atom transfer radical addition
pph	Part per hundred
ppm	Part per million
rr-P3HT	Regioregular grade Poly(hexylthiophene)
rd-P3HT	Regiorandom grade Poly(hexylthiophene)