

# สารบัญ

หน้า

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                     | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                     | III  |
| สารบัญ.....                                              | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                         | VIII |
| สารบัญรูป.....                                           | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                        | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....               | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                         | 3    |
| 1.3 การดำเนินงานวิจัย.....                               | 4    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....            | 4    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....                             | 5    |
| 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์.....                      | 5    |
| 2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์.....                           | 5    |
| 2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม .....                             | 5    |
| 2.1.1.2 ออร์บิทัลโมเลกุล.....                            | 7    |
| 2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล.....                             | 8    |
| 2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....                            | 10   |
| 2.2.1 โมเลกุลขนาดเล็ก.....                               | 13   |
| 2.2.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์.....                             | 14   |
| 2.3 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED).....                 | 15   |
| 2.3.1 กระบวนการทำงานของ OLED.....                        | 16   |
| 2.3.1.1 การฉีดพาหะและการขนส่งพาหะใน OLED.....            | 18   |
| 2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง.....           | 24   |
| 2.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในและภายนอก.... | 25   |
| 2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น.....           | 28   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                              | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.3.3 หน้าทีและตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED.....                         | 30   |
| 2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ .....                                                  | 30   |
| 2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด .....                                                 | 30   |
| 2.3.3.3 ชั้นฉีดโฮล .....                                                     | 31   |
| 2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล .....                                                   | 32   |
| 2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง .....                                                   | 33   |
| 2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน .....                                          | 33   |
| 2.3.3.7 ชั้นฉีดอิเล็กตรอน .....                                              | 34   |
| 2.3.3.8 ขั้วไฟฟ้าแคโทด.....                                                  | 34   |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                                        | 35   |
| 3.1 ระบบประเหยสารอินทรีย์.....                                               | 36   |
| 3.2 สารอินทรีย์ที่ใช้การสร้าง OLED.....                                      | 41   |
| 3.3 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) บนฐานรองรับกระจกสไลด์.....     | 44   |
| 3.4 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ .....                      | 45   |
| 3.5 การสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq <sub>3</sub> /Al.....         | 46   |
| 3.5.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบประเหยสารอินทรีย์.....     | 46   |
| 3.5.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบประเหยสารด้วยความร้อน.....                    | 47   |
| 3.6 การสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq <sub>3</sub> /LiF/Al.....     | 48   |
| 3.6.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบประเหยสารอินทรีย์.....     | 48   |
| 3.6.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบประเหยสารด้วยความร้อน.....                    | 49   |
| 3.7 การสร้าง OLED สีแดงโครงสร้าง ITO/NPB/DCJTB/Alq <sub>3</sub> /LiF/Al..... | 50   |
| 3.7.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบประเหยสารอินทรีย์.....     | 50   |
| 3.7.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบประเหยสารด้วยความร้อน.....                    | 51   |
| 3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....                                    | 53   |
| 3.9 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....                                      | 53   |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10 การตรวจสอบสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ ของ OLED.....                                   | 54 |
| 3.10.1 ระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ที่จัดระบบขึ้นภายใน<br>ห้องปฏิบัติการ.....        | 54 |
| 3.10.2 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer.....                                                 | 57 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....                                                        | 58 |
| 4.1 OLED สีเขียว โครงสร้าง ITO/NPB/Alq <sub>3</sub> /Al.....                                 | 58 |
| 4.1.1 ผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED.....                                     | 59 |
| 4.1.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....                                                  | 60 |
| 4.1.2.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub><br>โดยที่ความหนาของชั้น NPB คงที่ ..... | 60 |
| 4.1.2.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น NPB<br>โดยที่ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่.....  | 62 |
| 4.1.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....                                                    | 64 |
| 4.1.3.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub><br>โดยที่ความหนาของชั้น NPB คงที่.....  | 64 |
| 4.1.3.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น NPB<br>โดยที่ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่.....  | 66 |
| 4.2 OLED สีเขียว โครงสร้าง ITO/NPB/Alq <sub>3</sub> /LiF/Al.....                             | 70 |
| 4.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....                                                  | 71 |
| 4.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....                                                    | 71 |
| 4.3 OLED สีแดง โครงสร้าง ITO/NPB/DCJTBA/Alq <sub>3</sub> /LiF/Al.....                        | 73 |
| 4.3.1 ผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED.....                                     | 74 |
| 4.3.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....                                                  | 75 |
| 4.3.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....                                                    | 76 |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                          | หน้า |
|------------------------------------------|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 78   |
| บรรณานุกรม.....                          | 80   |
| ประวัติผู้เขียน.....                     | 81   |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                              | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงค่า Glass Transition Temperature $T_g$ , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า Mobility ของโฮล และอิเล็กตรอน ของสารแต่ละตัวที่ใช้ใน OLED..... | 34   |
| 3.1 สมบัติของสารอินทรีย์ NPB.....                                                                                                                     | 41   |
| 3.2 สมบัติของสารอินทรีย์ Alq <sub>3</sub> .....                                                                                                       | 42   |
| 3.3 สมบัติของสารอินทรีย์ DCJTb.....                                                                                                                   | 43   |

# สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                          | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม.....                                         | 5    |
| 2.2 ออร์บิทัล 2p ที่ถูกแบ่งโดยระนาบแนบพ คล้ายกับลูกตุ้ม โดยทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน .....      | 6    |
| 2.3 ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย.....                                                      | 6    |
| 2.4 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมา.....                                                          | 7    |
| 2.5 ระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลเมื่อเกิดการซ้อนทับของพันธะซิกมา.....                       | 8    |
| 2.6 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย.....                                                            | 8    |
| 2.7 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด .....                                                                 | 9    |
| 2.8 sp <sup>2</sup> ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....                                                     | 9    |
| 2.9 sp <sup>3</sup> ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....                                                     | 10   |
| 2.10 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....                                                       | 11   |
| 2.11 การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp <sup>2</sup> ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่..... | 11   |
| 2.12 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน .....                                     | 12   |
| 2.13 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน.....                        | 13   |
| 2.14 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็ก                                                     |      |
| (ก) TPD (ข) Alq <sub>3</sub> (ค) DPVBi (ง) CuPc.....                                            | 14   |
| 2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์.....                                              | 14   |
| 2.16 โครงสร้าง OLED แบบต่างๆ (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น                                    |      |
| (ค) แบบหลายชั้น.....                                                                            | 15   |
| 2.17 กระบวนการเกิดอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED.....                                            | 16   |
| 2.18 เปรียบเทียบกระบวนการทำงานของ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวกับแบบสองชั้น                       |      |
| (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น.....                                                            | 17   |
| 2.19 สองกลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ขั้วโลหะ                     |      |
| (ก) การฉีดกระแสแบบ Schottky โดยทางความไม่บริสุทธิ์หรือความไม่เป็นระเบียบของ                     |      |
| โครงสร้าง (ข) การฉีดกระแสแบบทะลุผ่าน Fowler-Nordheim tunneling เกิดภายใต้                       |      |
| สนามไฟฟ้าสูงประมาณ 10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> V/cm.....                                   | 21   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.20 (ก) แผนภาพของ SCLC ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก ( $V/d$ ) บวกกับสนามไฟฟ้าภายใน ( $E_{int}$ ) เหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดของประจุพาหะที่มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสนามไฟฟ้าทั้งหมด $E_{total} = V/d + E_{int}$ มีความหมายอย่างมากต่อการไหลของกระแส เมื่อให้สัญลักษณ์วงกลมเปิด (O) แทนโฮล สัญลักษณ์วงกลมปิด (●) แทนอิเล็กตรอน (ข) กราฟของความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ( $J$ - $V$ )..... | 22   |
| 2.21 ความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) กับความต่างศักย์ ( $V$ ) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของชั้นสารอินทรีย์ (L).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 23   |
| 2.22 สถานะซิงเกรตและทริปเปตของเอกซิตอน.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24   |
| 2.23 (ก) เอกซิตอนแบบซิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง (ข) เอกซิตอนแบบทริปเปตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง.....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 24   |
| 2.24 แผนภาพกระบวนการพื้นฐานของ EL ใน OLED.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 25   |
| 2.25 การไหลของกระแสในการฉีดและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์ $J_h$ และ $J_e$ เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ $J_r$ คือส่วนประกอบของ recombination current density $J_h$ และ $J_e$ คือความหนาแน่นกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับที่ไม่ได้เกิดการ recombination .....                                                                                                                 | 26   |
| 2.26 (ก) สามโครงสร้างพื้นฐานของ OLED โครงสร้าง SH-H, SH-E และ DH เมื่อชั้น hole-transport layer (HTL), electron-transport layer (ETL) และ emitter layer (EML) (ข) โครงสร้างชั้นสูงของ OLED สามโครงสร้าง MH-1, MH-2 และ MH-3 โดยที่โครงสร้างสองชั้นของ HTL และ ETL มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED.....                                                                                                         | 28   |
| 2.27 OLED โครงสร้างแบบหลายชั้น.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 30   |
| 2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ OLED แบบชั้นเดียว $\Phi_C$ คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ $\Phi_A$ คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด $\Delta E_h$ และ $\Delta E_e$ คือค่าพลังงานของการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ $E_g$ คือแถบช่องว่างพลังงานระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์.....                                                                                                                                 | 31   |
| 2.29 สารในชั้นฉีดโฮลที่ใช้ใน OLED.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 32   |
| 2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 32   |
| 2.31 โครงสร้างของ Alq <sub>3</sub> , DPVBi, DCJTb, DCM2 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 33   |
| 2.32 โครงสร้างของ BAlq.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 33   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                              | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                                                   | 35   |
| 3.2 ระบบระเหยสารอินทรีย์.....                                                       | 36   |
| 3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์.....                                  | 33   |
| 3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์.....                                                        | 38   |
| 3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์.....                                | 38   |
| 3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง .....                                               | 39   |
| 3.7 ผลึกควอทซ์.....                                                                 | 39   |
| 3.8 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง.....                                               | 39   |
| 3.9 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง .....                                               | 40   |
| 3.10 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ NPB (ข) ภาพสาร NPB.....                            | 41   |
| 3.11 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ Alq <sub>3</sub> (ข) ภาพสาร Alq <sub>3</sub> ..... | 42   |
| 3.12 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ DCJTb (ข) ภาพสาร DCJTb.....                        | 43   |
| 3.13 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนีตรอนสเป็คเตอริง.....                                        | 44   |
| 3.14 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะดวกฐานรองรับ ITO.....                      | 45   |
| 3.15 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....                                               | 46   |
| 3.16 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์.....                                             | 46   |
| 3.17 หน้ากากสำหรับระเหยขี้ Al.....                                                  | 47   |
| 3.18 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร.....                          | 47   |
| 3.19 โครงสร้าง OLED แบบสองชั้น.....                                                 | 48   |
| 3.20 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....                                               | 48   |
| 3.21 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์.....                                             | 48   |
| 3.22 หน้ากากสำหรับระเหย LiF กับ ขี้ Al.....                                         | 49   |
| 3.23 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร.....                          | 50   |
| 3.24 โครงสร้าง OLED สีเขียวแบบหลายชั้น.....                                         | 50   |
| 3.25 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....                                               | 50   |
| 3.26 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์.....                                             | 51   |
| 3.27 หน้ากากสำหรับระเหย LiF กับ ขี้ Al.....                                         | 51   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.28 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร.....                                                                                                                                                                                                                                                | 52   |
| 3.29 โครงสร้าง OLED สีแดงแบบหลายชั้น.....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 52   |
| 3.30 ระบบวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ (ก) KEITHLEY 228 voltage/current source<br>(ข) KEITHLEY 195A digital multimeter .....                                                                                                                                                                                | 53   |
| 3.31 กล้องวัดความส่องสว่าง.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 54   |
| 3.32 ระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรลูมิเนสเซนซ์.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 55   |
| 3.33 ไดอะแกรมระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรลูมิเนสเซนซ์.....                                                                                                                                                                                                                                            | 55   |
| 3.34 ไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์.....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 56   |
| 3.35 (a) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (b) โปรแกรม SpectraWiz.....                                                                                                                                                                                                                                     | 57   |
| 4.1 OLED โครงสร้างแบบสองชั้น.....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 58   |
| 4.2 แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 68   |
| 4.3 สเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรลูมิเนสเซนส์ของ OLED สีเขียว .....                                                                                                                                                                                                                                           | 60   |
| 4.4 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ<br>ชั้น Alq <sub>3</sub> โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 นาโนเมตร<br>(ข) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 70<br>นาโนเมตร.....                                        | 62   |
| 4.5 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ<br>ชั้น NPB โดยให้ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ (ก) ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ 50 นาโนเมตร<br>(ข) ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ 70 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ 90<br>นาโนเมตร..... | 64   |
| 4.6 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความ<br>หนาของชั้น Alq <sub>3</sub> โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 30<br>นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น NPB คงที่<br>70 นาโนเมตร.....                                | 66   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.7 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ 50 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ 70 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น Alq <sub>3</sub> คงที่ 90 นาโนเมตร..... | 68   |
| 4.8 OLED ขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 25 โวลต์.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 69   |
| 4.9 OLED แบบคอตเมทริกซ์บนพลาสติก.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 69   |
| 4.10 OLED แบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด.....                                                                                                                                                                                                                                                               | 70   |
| 4.11 แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 70   |
| 4.12 ค่าความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF .....                                                                                                                                                                                                          | 71   |
| 4.13 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF.....                                                                                                                                                                                                              | 72   |
| 4.14 OLED ขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 9 โวลต์.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 72   |
| 4.15 (ก) โครงสร้างของ OLED สีแดงที่ทำการศึกษา (ข) แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา.....                                                                                                                                                                                                         | 73   |
| 4.16 (ก) โครงสร้างของ OLED สีแดงที่ทำการเพิ่มชั้น LiF (ข) แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการเพิ่มชั้น LiF.....                                                                                                                                                                                         | 74   |
| 4.17 สเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์ของ OLED สีแดงที่ทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 13, 15, 16, 17 โวลต์.....                                                                                                                                                                                          | 75   |
| 4.18 ค่าความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF.....                                                                                                                                                                                                           | 76   |
| 4.19 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF .....                                                                                                                                                                                                             | 76   |
| 4.20 OLED สีแดงขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์.....                                                                                                                                                                                                                                               | 77   |
| 4.21 OLED สีแดงแบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 77   |