

## บทที่ 4

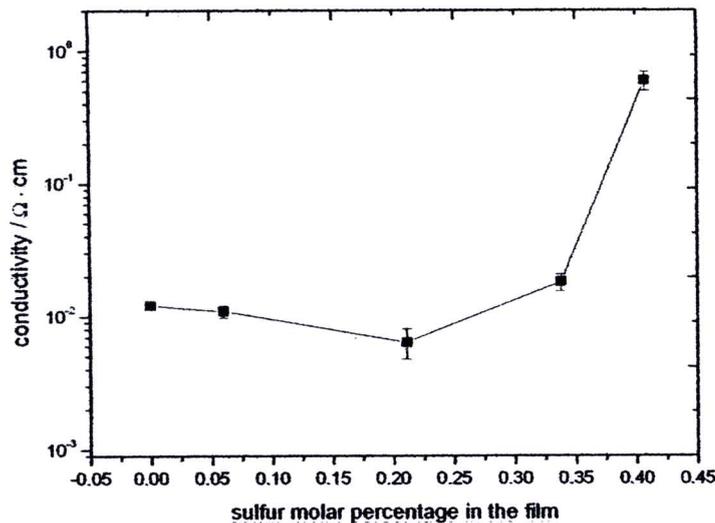
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากเทคนิคของเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆในบทที่ 3 ในบทนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์โดยศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ทางกายภาพ ทางโครงสร้าง และทางแสง ของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และเวลา

#### 4.1 สมบัติทางไฟฟ้า

##### 4.1.1 ผลของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่ใช้เป็นเป้าต่อลักษณะสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC

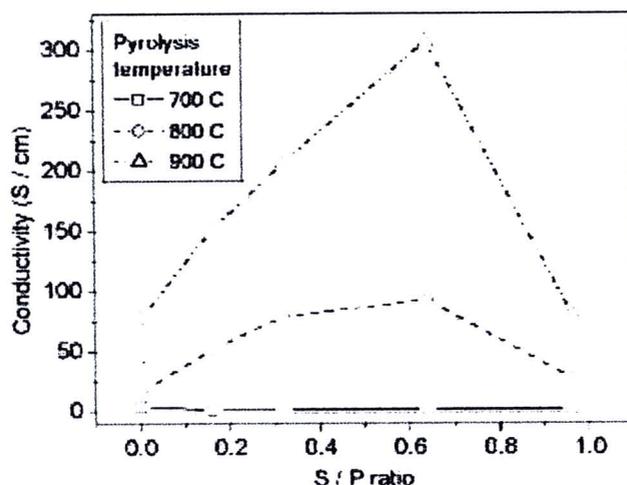
ในการทดลองศึกษาผลของสภาพนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ ที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V บนตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน พบว่าเมื่อฟิล์ม DLC มีค่าสภาพนำไฟฟ้า  $1.21 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แต่เมื่อเจือปริมาณซัลเฟอร์ 0.21% ในฟิล์ม กลับพบว่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าลดลงจนถึง  $6.39 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ไปจนถึง 0.41% ในฟิล์ม กลับพบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง  $5.95 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม ต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Latha Kumari และ S V Subramanyam [29] สังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอน-ซัลเฟอร์คอมโพสิต โดยวิธี vapour phase pyrolysis ของ maleic anhydride และซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส  $700^{\circ}\text{C}$ ,  $800^{\circ}\text{C}$  และ  $900^{\circ}\text{C}$  พบว่าสมบัติสภาพไฟฟ้าของฟิล์มขึ้นอยู่กับอุณหภูมิไพโรไลซิสและปริมาณซัลเฟอร์ โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ไปจนค่าที่

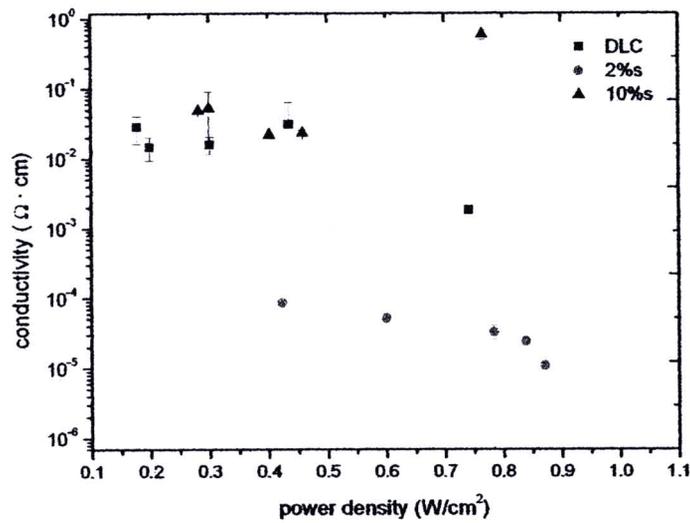
เหมาะสม จากนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณซิลเฟอรืเพิ่มมากขึ้น ค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยรวมเกิดจากการกระโดดหรือ tunnelling ของประจุพาหะระหว่างสภาพนำไฟฟ้า โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าขึ้นกับความเข้มข้นของพาหะและความเป็นผลึก การที่มีสภาพนำไฟฟ้าน้อย เนื่องจากฮอลล์โมบิลิตีต่ำเกิดจากข้อบกพร่องของผลึกและเกิดเกรน boundary โดยการเติมซิลเฟอรืที่ความเข้มข้นของพาหะต่ำเกิดจากการไอออนเซชันของอะตอมซิลเฟอรืที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.2 สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700°C 800°C และ 900°C [29]

#### 4.1.2 สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

จากการศึกษาผลจากการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 400- 500 V ที่อัตราส่วนซิลเฟอรื 0, 0.06 และ 0.41% ในฟิล์ม พบว่าฟิล์ม DLC ให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในช่วง  $1.84 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $1.46 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  และ 0.41% ซิลเฟอรืในฟิล์ม ให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในช่วง  $5.21 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $5.95 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ที่อัตราส่วนซิลเฟอรื 0.41% ในฟิล์ม ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าเจือซิลเฟอรืในปริมาณ 0 และ 0.06 % ในฟิล์ม ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ากลับให้แนวโน้มที่ลดลงคือมีค่าในช่วง  $1.01 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $1.09 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ทั้งนี้การที่ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของพาหะเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เหมาะสม ค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยรวมเกิดจากการกระโดดของประจุพาหะ จึงทำให้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ 0 และ 0.06% ซิลเฟอรืในฟิล์ม กลับให้แนวโน้มลดลงทั้งนี้เนื่องจากการทดลองมีปริมาณของอะตอมในฟิล์มลดลงเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ส่งผลให้มีความเข้มข้นของพาหะต่ำลงจึงทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลง [29]

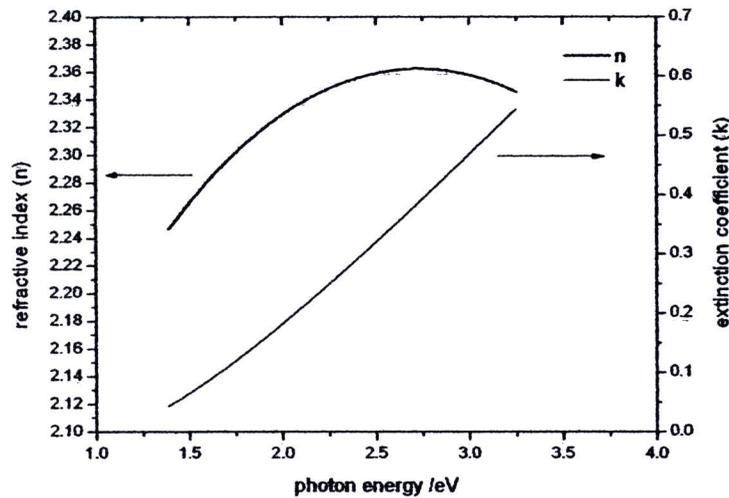


รูปที่ 4.3 พิล์ม DLC และ พิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม  
ต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า

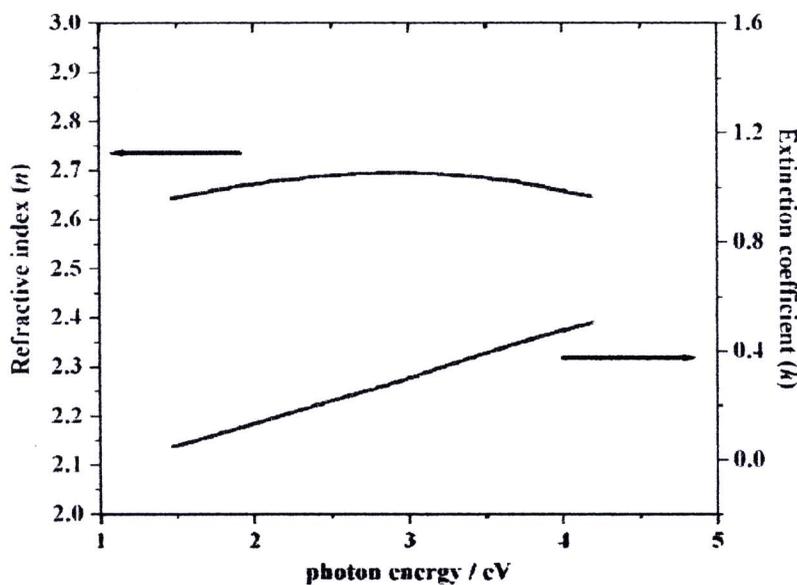
## 4.2 สมบัติทางแสง

### 4.2.1 ดัชนีหักเหของการสะท้อนแสง (Refractive Index) และการดูดกลืนแสง (Extinction Coefficient)

ดัชนีหักเหของการสะท้อนแสง ( $n$ ) และการดูดกลืนแสง ( $k$ ) สามารถวัดโดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี แสดงดังรูปที่ 4.4 ตัวอย่างของค่า  $n$  และ  $k$  ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ที่มีค่าเปลี่ยนตามพลังงานโฟตอนอยู่ที่ 1-3.5 eV แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่า  $n$  มีค่าในช่วง 2.24-2.34 และมีค่า  $k$  ในช่วง 0.04 – 0.54 โดยค่า  $k$  เพิ่มมากขึ้นเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มมากขึ้น และค่า  $n$  พบว่าในช่วงแรกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อพลังงานโฟตอน 1-2.5 eV และจะมีค่าลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K.Honglertkongsakul [32] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซิลเฟอร์ โดยวิธี pulsed laser ablation ArF ที่ 193 nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่ามีค่า  $n$  ในช่วง 2.0-3.0 และค่า  $k$  ในช่วง 0-0.6 และทั้งนี้ในงานวิจัยอื่นให้ผลการทดลองค่า  $n$  อยู่ในช่วง 2.5-2.8 และค่า  $k$  อยู่ในช่วง 0-0.5 โดยฟิล์ม DLC มีสมบัติที่พิเศษทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มที่มีปริมาณของ  $sp^3$  มากกว่า 95% จะให้สมบัติที่คล้ายเพชร [32] แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของค่า n และ k ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร 0.06% ในฟิล์ม

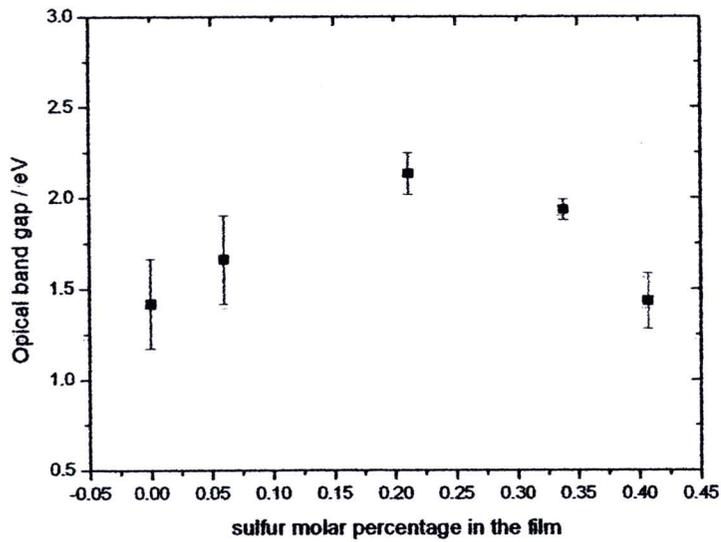


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของค่า n และ k ของฟิล์ม DLC โดยวิธี pulsed laser ablation ArF ที่ 193 nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน [32]

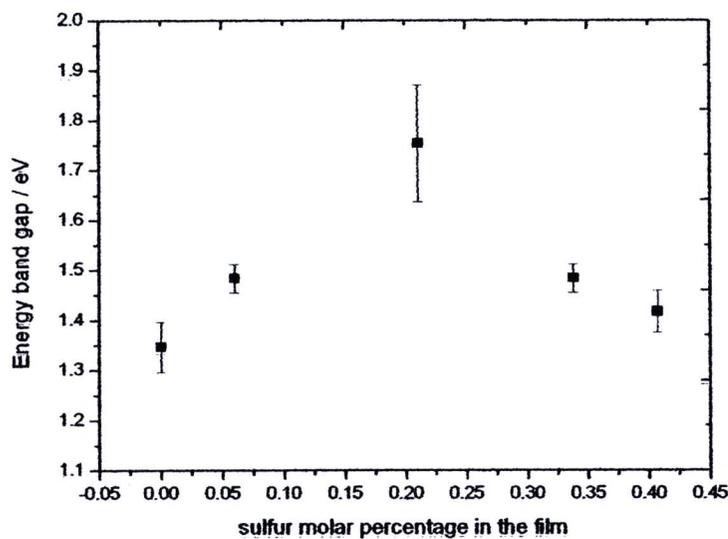
#### 4.2.2 แถบพลังงานของฟิล์มDLC เจือซิลเฟอร 0-10%

จากหัวข้อที่ 2.6 และหัวข้อที่ 2.9 ได้แสดงวิธีการหาค่าแถบพลังงานซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพลังงานโฟตอนของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร 0-0.41% ในฟิล์ม โดยใช้สเปกโตรสโคปออลลิปโซเมทรีและยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีเนื่องจากแถบพลังงานของฟิล์ม DLC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างภายในฟิล์ม โดยทั่วไปเพอร์มี indirect แถบพลังงานกว้างโดยมีค่า 5.5 eV ในขณะเดียวกันแกรไฟต์ไม่มีแถบพลังงาน จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าแถบพลังงานซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดย

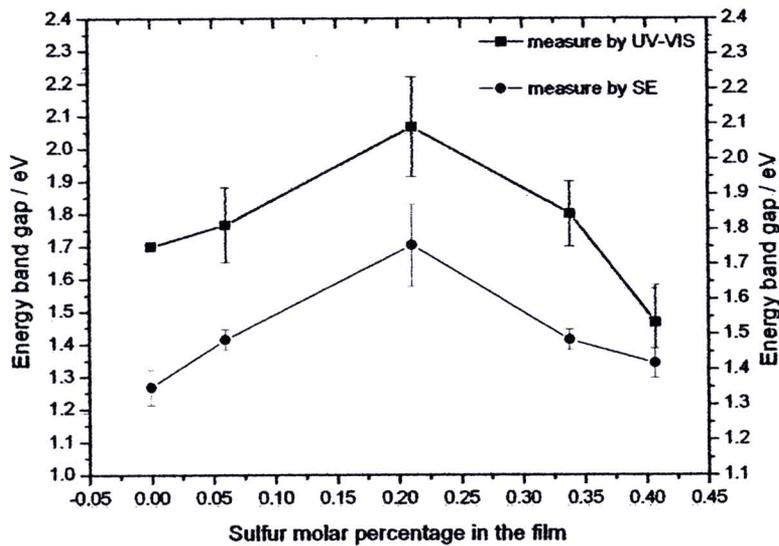
ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม มีค่าแถบพลังงานในช่วง 1.4-2.2 eV ทั้งนี้แถบพลังงานขึ้นอยู่กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม



รูปที่ 4.6 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

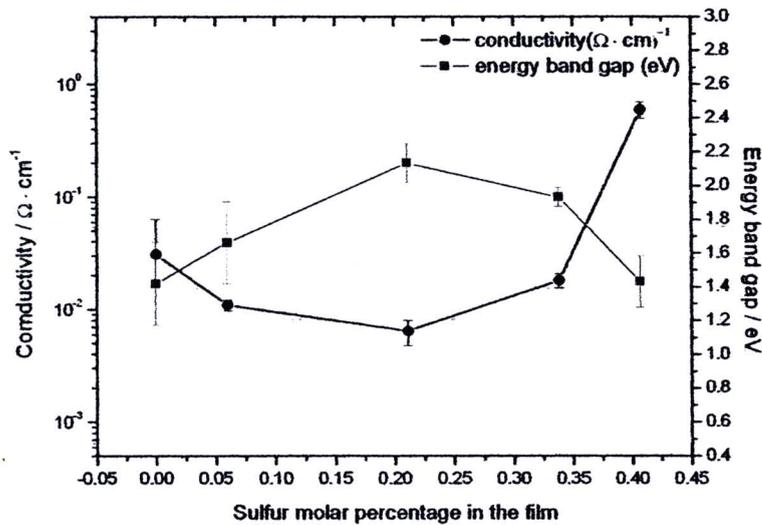


รูปที่ 4.7 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC โดยสเปกโทรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต

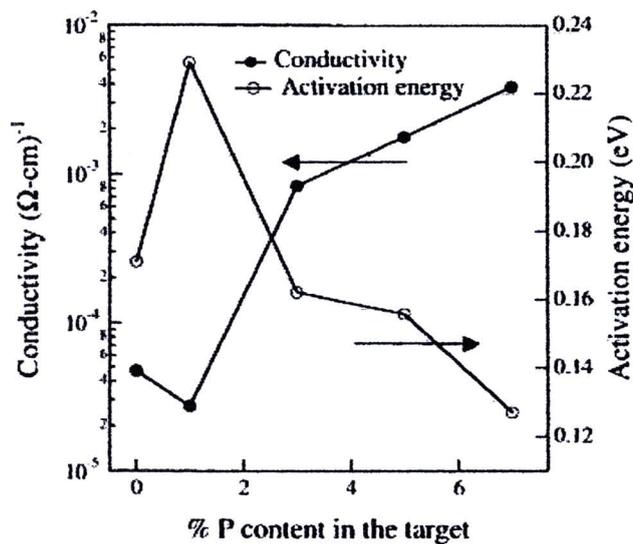


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีและสเปกโทรสโคปอิลลิปโซเมทรี

เมื่อศึกษาลักษณะของแถบพลังงานและค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม พบว่าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.21% ในฟิล์ม ค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลง แต่ค่าแถบพลังงานเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.211-0.41% ในฟิล์ม ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ค่าแถบพลังงานลดลงแสดงดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้เป็นไปตามทฤษฎีเมื่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลงค่าแถบพลังงานจะมีระยะห่างระหว่าง valence band และ conduction band เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ระยะห่างระหว่าง valence band และ conduction band เข้าใกล้กันมากขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mominuzzaman และคณะ[33] ศึกษาผลของปริมาณฟอสฟอรัสต่อสภาพนำไฟฟ้าบนวัสดุรองรับควอตซ์และพลังงานกระตุ้นโดย spectral transmittance and reflectance พบว่าพลังงานกระตุ้นในฟิล์ม DLC มีค่า 0.17 eV และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.23 eV ที่ปริมาณฟอสฟอรัส 1% และสภาพนำไฟฟ้าลดลงจาก  $5 \times 10^{-5} (\Omega \text{cm})^{-1}$  เป็น  $2.5 \times 10^{-5} (\Omega \text{cm})^{-1}$  เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มเพิ่มมากขึ้นถึง 7% พบว่าพลังงานกระตุ้นลดลงและสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.12 และ  $3.8 \times 10^{-3} (\Omega \text{cm})^{-1}$  ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเข้าร่วมของสารเจือที่อยู่ในฟิล์ม โดยปริมาณฟอสฟอรัสมีผลทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจนถึงในระดับหนึ่งค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเจือฟอสฟอรัสในปริมาณมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.10

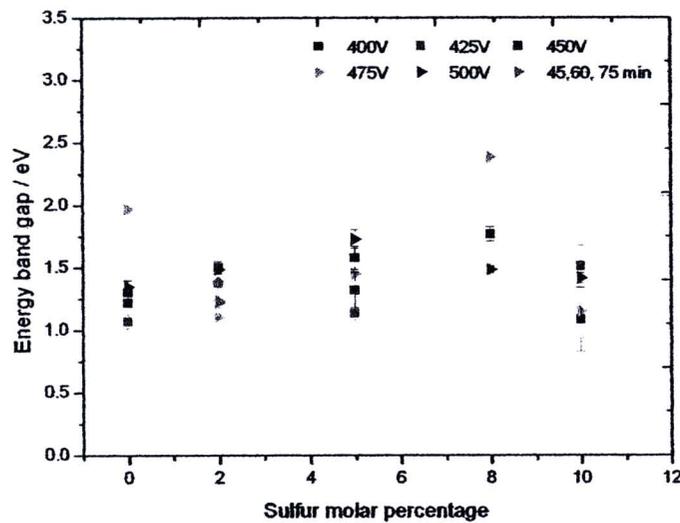


รูปที่ 4.9 แถบพลังงาน โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม



รูปที่ 4.10 แถบพลังงาน โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสภาพการไฟฟ้าของฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส 0-7% [33]

เมื่อศึกษาผลของแถบพลังงานต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ 400-500V พบว่าฟิล์ม DLC ให้ค่าแถบพลังงานในช่วง 1.06-1.97 eV เป็นไปตามทฤษฎี ฟิล์ม DLC ชนิด a-C มีค่าแถบพลังงาน 0.5-1.5 eV และฟิล์ม DLC ชนิด a-C:H มีค่า 1.0-2.2 eV และฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม ให้ค่าแถบพลังงานในช่วง 1.1-2.38eV ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และเวลา

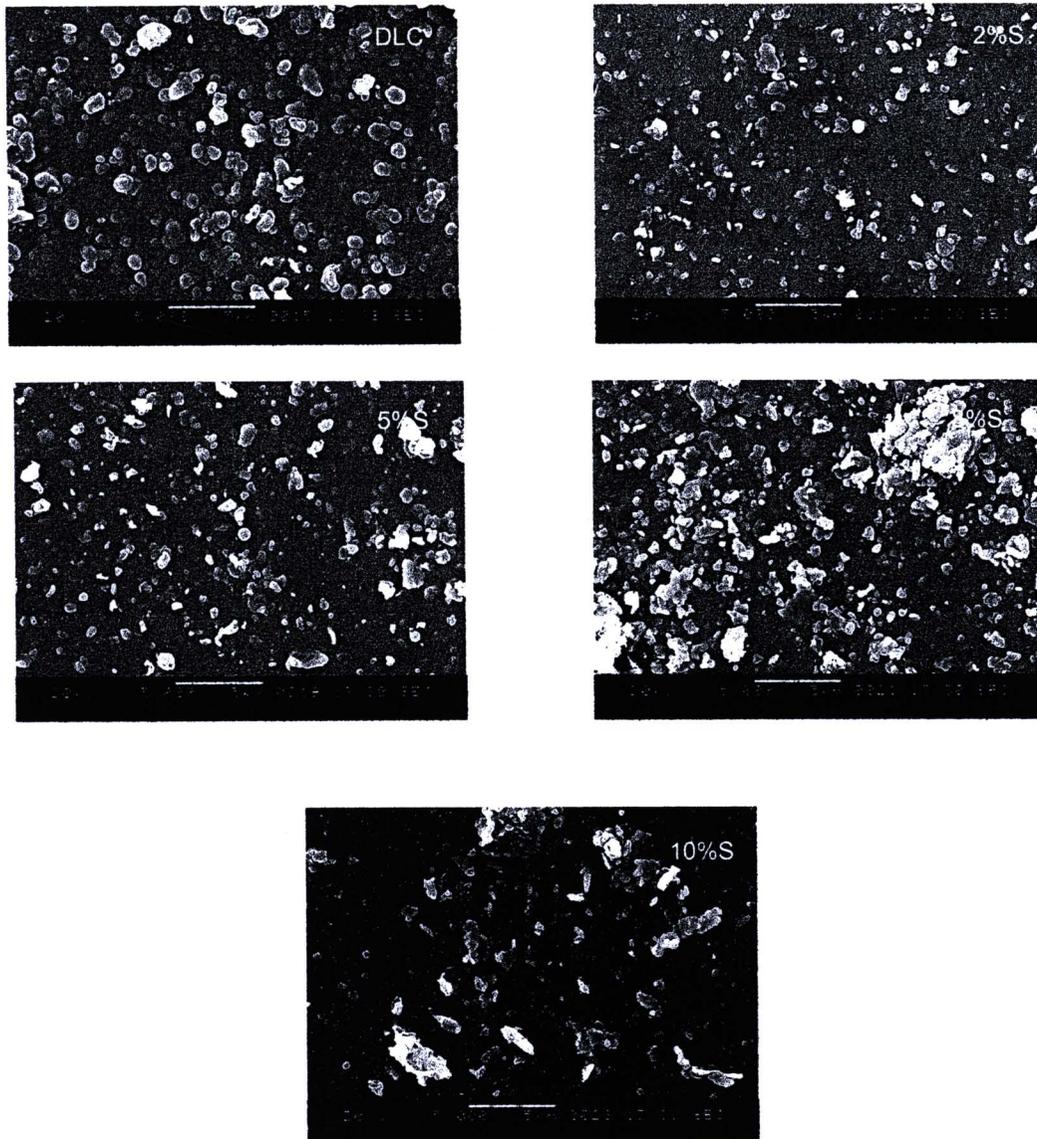


รูปที่ 4.11 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม ความต่างศักย์ 400-500V และเวลา 30-75 min โดยสเปกโตรสโคปอัลตราไวโอเล็ต

#### 4.3 สมบัติทางกายภาพ

##### 4.3.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%

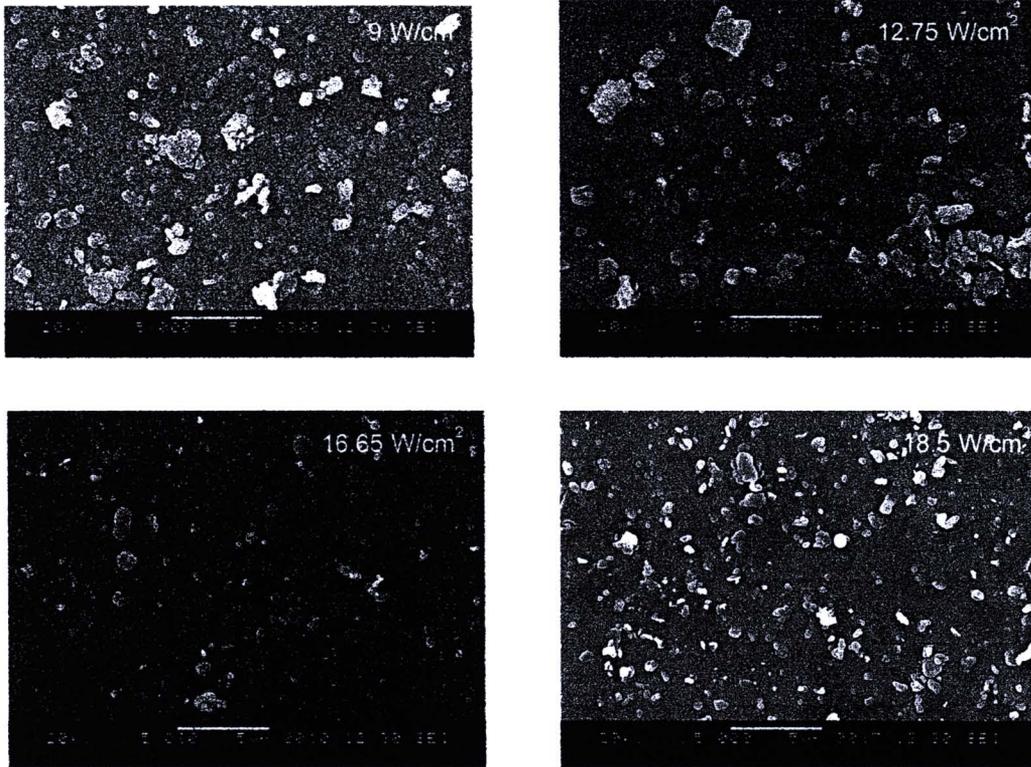
ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ในปริมาณ 0-0.41% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่า ฟิล์ม DLC มีลักษณะพื้นผิวเป็นเกรน แต่เมื่อเจือปริมาณซัลเฟอร์ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กๆ กระจายทั่วฟิล์ม นอกจากนี้ในฟิล์มจะประกอบด้วยปริมาณแกรไฟต์และซัลเฟอร์ยังประกอบด้วยธาตุ ซิลิคอน 18.23-31.08 % โดยน้ำหนัก ออกซิเจน 19.19-36.52% โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจน 4.82-6.45% โดยน้ำหนัก แมกนีเซียม 0.91-1.78% โดยน้ำหนัก และแคลเซียม 3.26-5.41% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณการเจือ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ของ Latha K Fumari และ S V Subramanyam [29] สังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอน-ซัลเฟอร์คอมโพสิตพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟอร์ความหนาแน่นของอะตอมคาร์บอนจะไม่สม่ำเสมอ มีรูปร่างคล้ายทรงกลมคือแกรไฟต์ขนาดเฉลี่ย 0.5-0.7  $\mu\text{m}$  และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไม่ได้ทำให้ขนาดของแกรไฟต์เดี่ยวใหญ่ขึ้นแต่จะเกิดการเข้าไปรวมกลุ่มของอะตอมแกรไฟต์ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V

#### 4.3.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

ในการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 9 -18.5 W/cm<sup>2</sup> บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่าฟิล์ม DLC มีลักษณะพื้นผิวเป็นเกรน แต่เมื่อเจือปริมาณซิลเฟออร์ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ 0.06% ในฟิล์ม พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กๆกระจายทั่วฟิล์มทั้งนี้ขึ้นกับความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เมื่อให้ปริมาณของอะตอมที่สูงจะเห็นว่าบนพื้นผิวฟิล์มจะให้อะตอมแกรไฟต์มากขึ้นด้วยแสดงดังรูปที่ 4.13

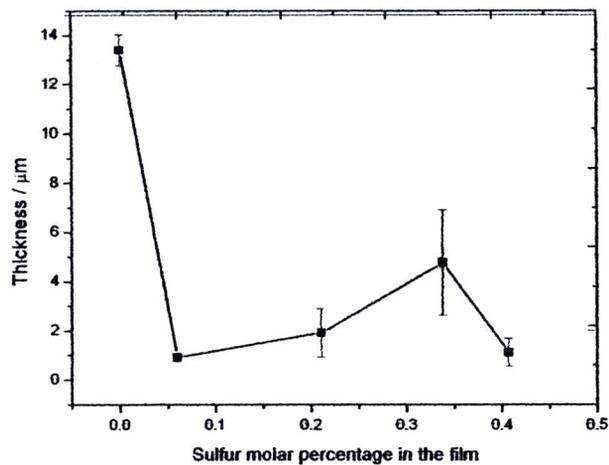


รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบนตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr  
ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (a) 9 (b) 12.75 (c) 16.65 (d) 18.5 W/cm<sup>2</sup>

#### 4.3.3 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

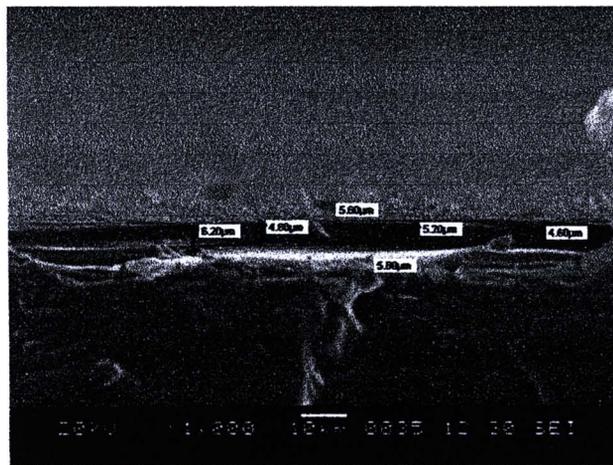
โดย SEM

ในการศึกษาผลของความหนาที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V และนำไปวิเคราะห์ cross section โดย SEM พบว่าฟิล์ม DLC มีความหนาประมาณ 13.8  $\mu\text{m}$  และเมื่อเจือซิลเฟอร์ที่ 0.06-0.41% ในฟิล์ม มีความหนาในช่วง 0.87 -5.7  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์ม DLC มีการจัดเรียงตัวในระนาบเดียวกันอย่างแน่นหนา แต่เมื่อเจือปริมาณซิลเฟอร์พบว่าฟิล์มจะมีความหนาลดลงทั้งนี้เนื่องจากการบรรจุกันในระดับเดียวกันของฟิล์ม DLC และซิลเฟอร์เกิดช่องว่างขึ้นของแต่ละอะตอมจึงทำให้ความหนาที่ได้หลังจากการเจือมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความหนาของฟิล์มกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม โดย cross section จาก SEM

รูปที่ 4.15 แสดง cross section โดย SEM ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 0.211% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V ศึกษาโดยหักฟิล์มเพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มและวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน

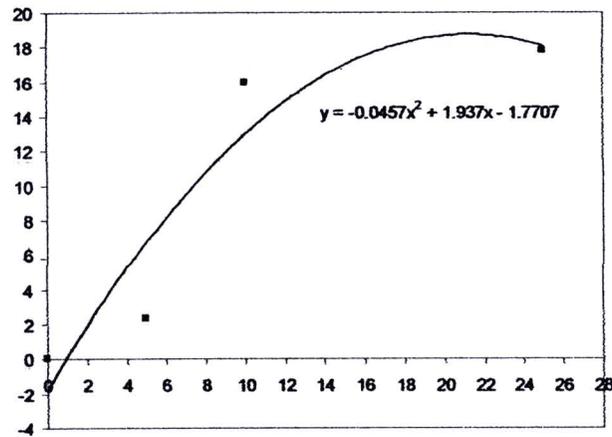


รูปที่ 4.15 Cross-sectional จาก SEM ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.34% ในฟิล์ม บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน

#### 4.3.4 ศึกษาปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดย EDX

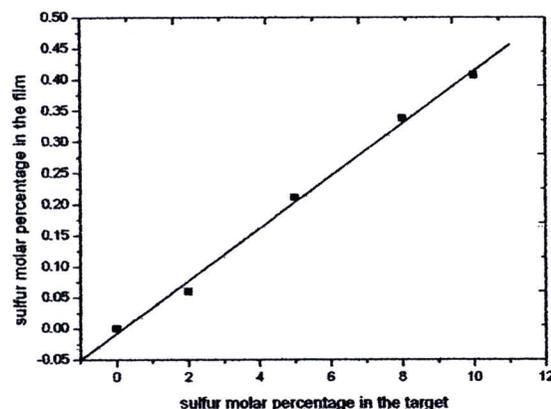
ในการศึกษาปริมาณของซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม DLC ซึ่งเป้าที่ใช้ในการทดลองเป็นเป้าที่ผู้วิจัยอัดขึ้นเองซึ่งกล่าวรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.2 โดยมีปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์

0-0.41% ในฟิล์ม ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาชุดการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 0, 1, 5, 10 และ 25 % ในเป้า ซึ่งสามารถทำคาลิเบรชัน ดังรูปที่ 4.17

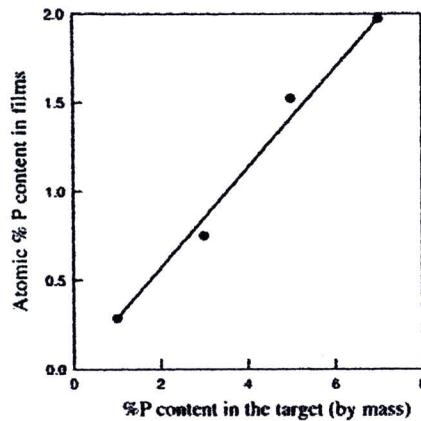


รูปที่ 4.16 กราฟคาลิเบรชันจากการศึกษาชุดการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 0, 1, 5, 10 และ 25% ในเป้า

จากรูปที่ 4.17 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งสามารถทราบปริมาณของซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม จากเป้าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ 0, 2, 5, 8 และ 10% โดยโมล แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อให้ปริมาณซัลเฟอร์ที่ 2-10 % โดยโมล ในฟิล์มจะมีปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น จาก 0.060-0.41 % โดยโมล ซึ่งมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharif Mohammad Mominuzzaman และคณะ[33] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัสที่ 1, 3, 5, 7 โดยมวล ใช้เทคนิค pulsed laser deposition บนวัสดุรองรับ Silicon และ Quartz ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มโดย (X-ray photoelectron spectroscopic, XPS) พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มเป็นฟังก์ชันกับปริมาณฟอสฟอรัสในเป้า โดยปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 0.29-2% โดยมีฟอสฟอรัสในเป้า 1-7% ในฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18



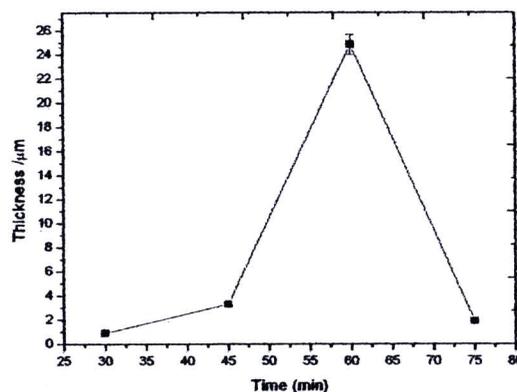
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบปริมาณซัลเฟอร์ในฟิล์มต่อปริมาณซัลเฟอร์ในเป้าที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์ม และในเป้าที่ฟอสฟอรัส 1,3,5,7 โดยมวล [ 33]

#### 4.3.5 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ต่อ อัตราการสังเคราะห์ฟิล์มที่เวลา 30-75 นาที

ในระบบสปีดเตอริงอัตราการเคลือบฟิล์มขึ้นกับปริมาณของอะตอมที่หลุดออกมาจาก เป้าและการเคลื่อนที่ของอะตอมมายังวัสดุรองรับพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสปีดเตอริงจาก 30-60 นาที อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าสูงมากขึ้นจาก 0.03-0.41  $\mu\text{m}/\text{min}$  เนื่องจากอะตอมจากการสปีดเตอริง สปีดเตอริงออกมามากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับได้ดีแต่เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้น อัตราการ สปีดต่ำลง 0.02  $\mu\text{m}/\text{min}$  ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับไม่สะดวก แสดงดัง รูปที่ 4.19

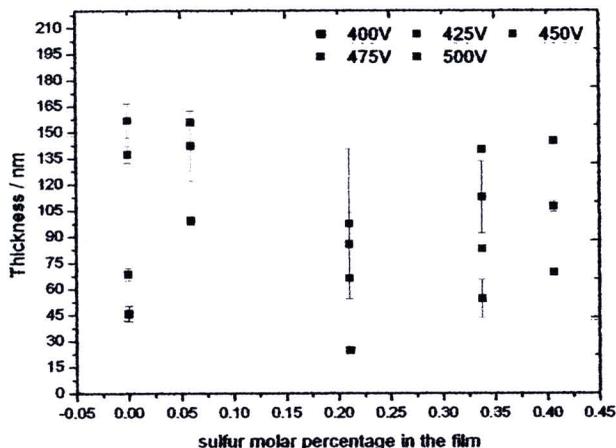


รูปที่ 4.19 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม เวลา 30-75 นาที

#### 4.3.6 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี

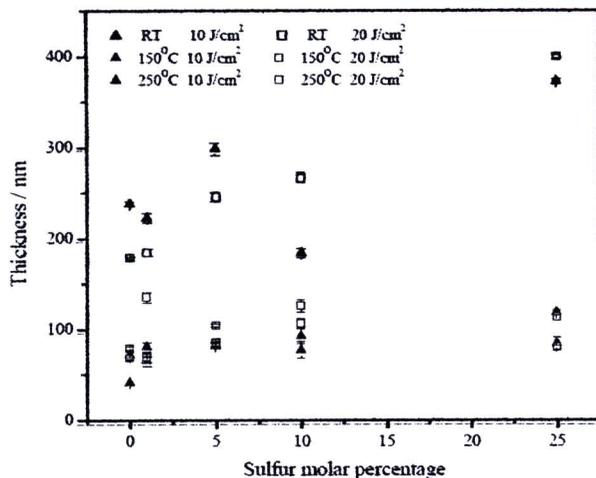
ในการศึกษาผลของความหนาที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V และนำไปวิเคราะห์โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี พบว่า

ฟิล์ม DLC มีความหนาประมาณ 68.28-156.58 nm และฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06-0.41 %ในฟิล์ม มีความหนาในช่วง 24.51-264.79 nm โดยทั้งนี้การหาความหนาได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อ 2.9 โดยทั้งนี้ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับความต่างศักย์และเวลาที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20

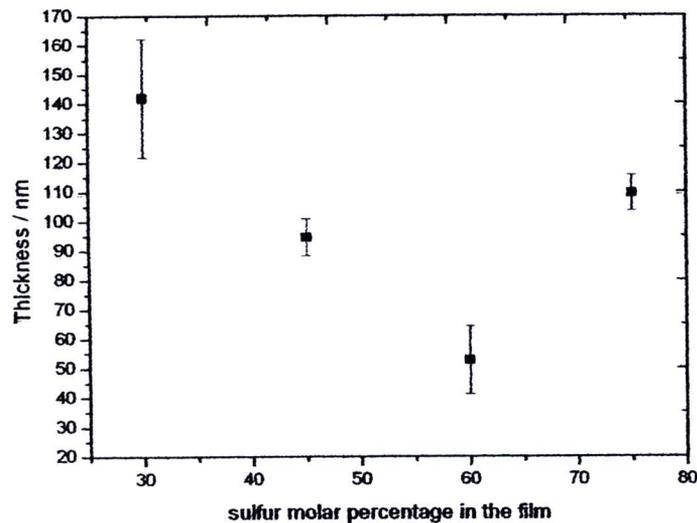


รูปที่ 4.20 ความหนาของฟิล์มกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม ที่ความต่างศักย์ 400-500V เวลา 30-75 นาที

ทั้งนี้ยังพบว่าในงานวิจัยของ K.Honglertkongsakul [32] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซิลเฟอร์ โดยวิธี pulsed laser ablation ArF ที่ 193 nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนหาความหนาของฟิล์มจากทั้ง 2 วิธีพบว่าฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วงร้อยนาโนเมตรทั้งวิธี SEM และ โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี ทั้งนี้ขึ้นกับเงื่อนไขอุณหภูมิของวัสดุรองรับ การกระจายตัวของแกรไฟต์ที่ไม่สม่ำเสมอในเป้าที่ใช้ในการทดลอง และเกิดจากการหักของฟิล์ม ในการวิเคราะห์โดย SEM



รูปที่ 4.21 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซิลเฟอร์ 0-25% ที่เลเซอร์ 10-20 J/cm<sup>2</sup> และอุณหภูมิวัสดุรองรับ 150 และ 250 °C [32]



รูปที่ 4.22 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-0.41 % ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 นาที

ทั้งนี้จากผลการทดลองที่ได้จาก SEM และ โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก วิธี SEM หาค่าความหนาได้จากการหักฟิล์ม เพื่อให้เห็นรอยแยกระหว่างชั้นฟิล์ม ซึ่งเป็นการมองด้วยตา ซึ่งในการทดลองผู้วิจัยเลือกที่จะเชื่อผลของ SEM เนื่องจากวิธีสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี หาได้จากเครื่องมือโดยการพิศกรภาพโดยการเลือกชนิดของสารในการพิศจากรายชื่อสารที่มีทั้งหมดในโปรแกรมจากเครื่อง ปรากฏว่าสารที่ใช้ในการพิศโมเดลอาจจะไม่ตรงกับชนิดของ DLC ที่เราสังเคราะห์ได้ กราฟที่ได้บางเงื่อนไขจึงไม่ค่อยพิศมากนัก

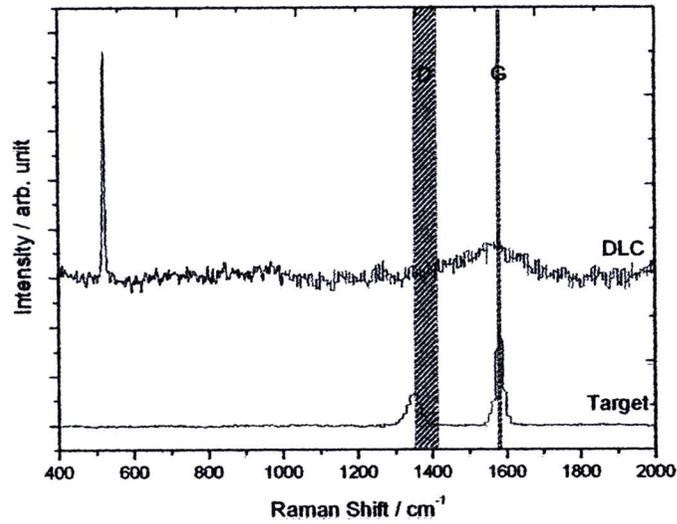
#### 4.4 สมบัติทางโครงสร้าง

ในงานวิจัยนี้ นำเอาฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นในภาวะการสังเคราะห์ต่างๆ ไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยรามานสเปกโตรสโกปี ด้วยเครื่อง DXR SmartRaman โดยใช้เลเซอร์จาก Ar ที่มีความยาวคลื่น 532 nm เป็นตัวกระตุ้น ณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พลาสมา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้แยกศึกษาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

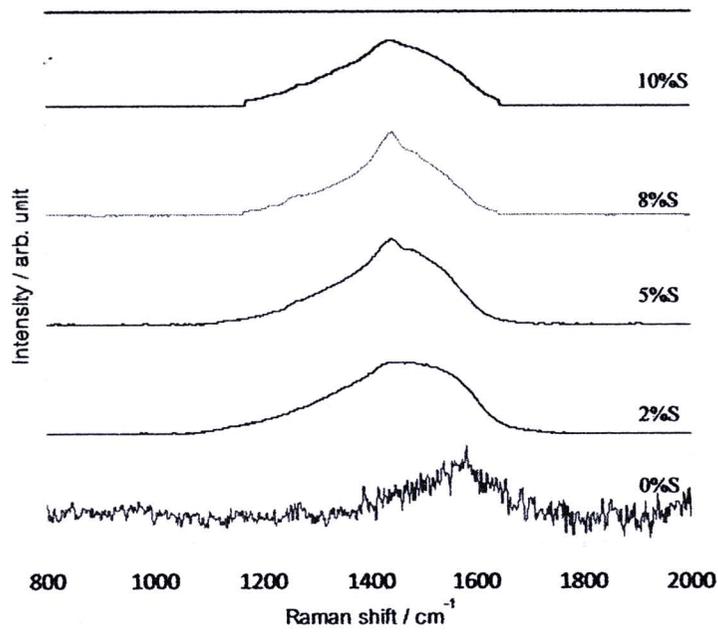
##### 4.4.1 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ต่อฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

ในการศึกษาที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ไฟฟ้า 500 โวลต์ ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยปรากฏสเปกตรัมรามานที่ปรากฏพีก D และพีก G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1413 และ 1573  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม พบว่าตำแหน่งพีก G เลื่อนลงจากเลขคลื่น 1573 ไปที่เลขคลื่น 1477  $\text{cm}^{-1}$  และ

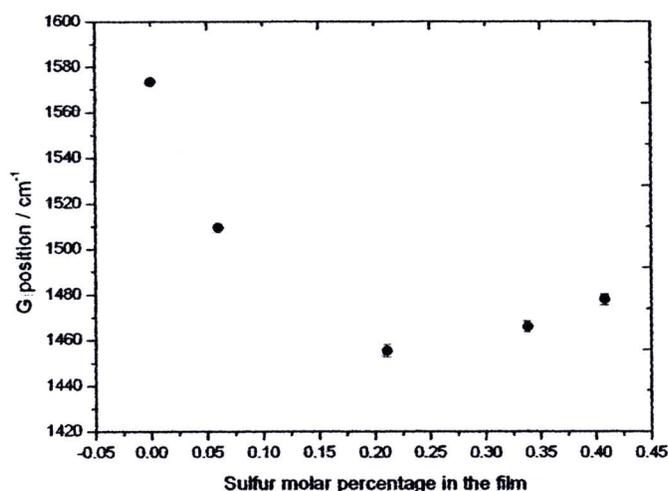
อัตราส่วน  $I_D/I_G$  เพิ่มขึ้นจาก 0.43 ไป 0.52 แสดงถึงความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC และ เป้าแกรไฟต์

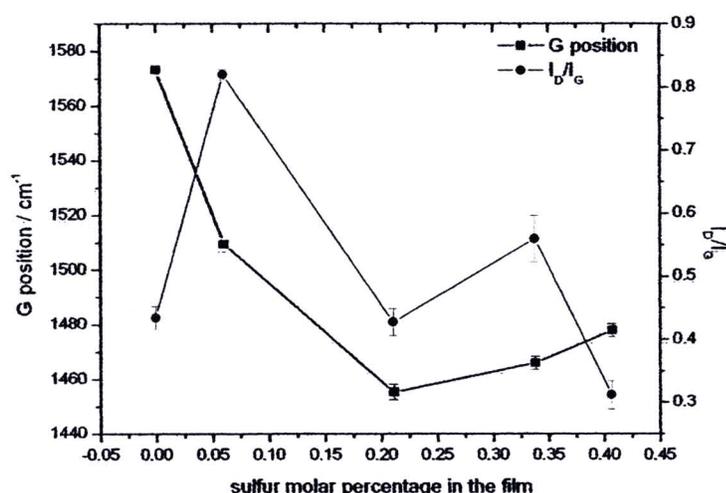


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

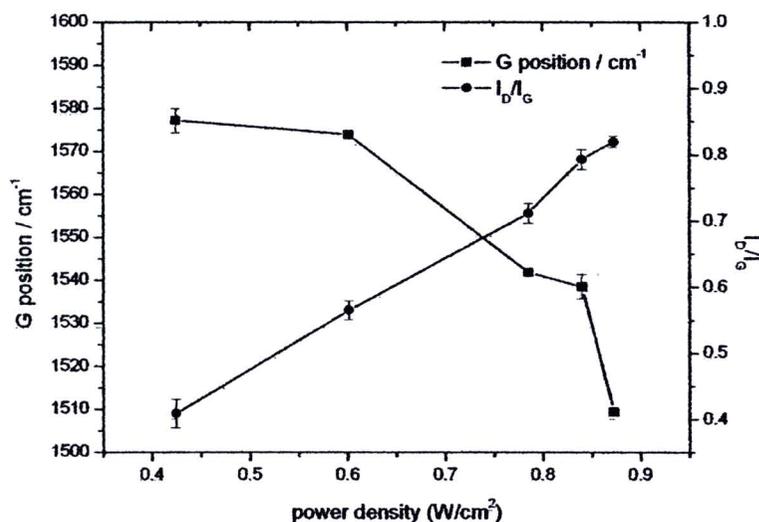
จากการศึกษารายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ พบรายงานผลของรามานต่อการเจือซัลเฟอร์ในฟิล์มเพชร ในการทดลองของ Mikka Nishitani-Gamo และคณะ[28] ศึกษาการปลูกฟิล์มบางผลึกเดี่ยว (homoepitaxial) เจือซัลเฟอร์ในฟิล์มเพชรโดยวิธี CVD บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน ที่มีกรปรับปรุงโครงสร้างให้มีผลึกเดี่ยวโดยทำที่อุณหภูมิและความดันสูงใช้แก๊ส  $H_2S$  ความเข้มข้น 10-100 ppm พบว่าตำแหน่งพีคเคลื่อนจาก 1332.5 ไปยัง 1339  $cm^{-1}$  เมื่อเจือในปริมาณเล็กน้อย 50 ppm ตำแหน่งเลขคลื่นจะเคลื่อนไปเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความยาวของอะตอมคาร์บอนในเพชรมีค่า 154 pm และความยาวของอะตอมซัลเฟอร์มีค่า 185 pm



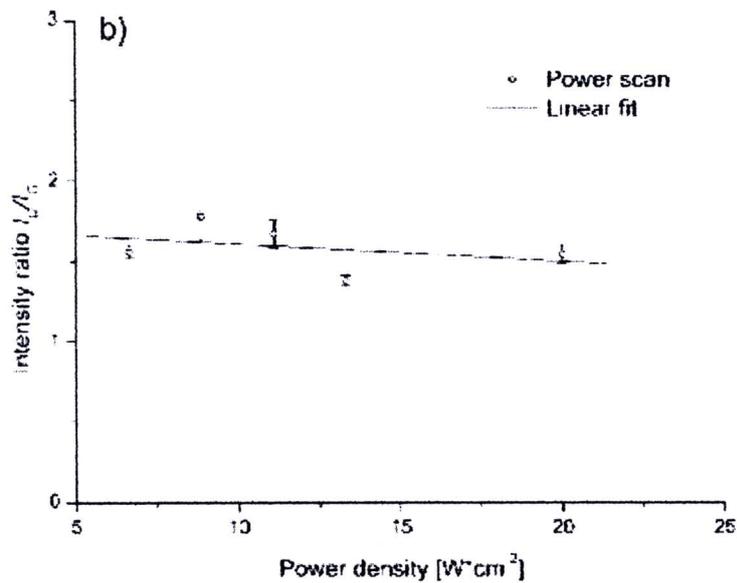
รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_D/I_G$  และ ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

#### 4.4.2 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

ในการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ในปริมาณ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 9 -18.5 W/cm<sup>2</sup> บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่า ฟิล์ม DLC มีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  เพิ่มขึ้น และตำแหน่งของพีก G ลดลง แสดงค่าเมื่อเพิ่มกำลังความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นค่าฟิล์มมีความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับตำแหน่งของพีก G ที่มีแนวโน้มลดลงแสดงดังรูปที่ 4.27 ทั้งนี้ให้ผลการทดลองที่ตรงข้ามกับ Markus Kahn และคณะ [21] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจน โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน (100) และกระจกสไลด์ ความต่างศักย์ในช่วง 600- 700V โดยศึกษาผลของความหนาแน่นของกำลังในการสปัตเตอริงในช่วง 6.7-20 Wcm<sup>2</sup> เมื่อวิเคราะห์โดยรามานชนิด LabRam โดยใช้ Nd-YAG ที่ความยาวคลื่น 532 nm. ปรากฏพีก G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1550 cm<sup>-1</sup> (Graphite band) และปรากฏพีก D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1355 cm<sup>-1</sup> (Disordered band) และอัตราส่วน  $I_D/I_G$  มีค่า  $1.56 \pm 0.04$  ที่การสังเคราะห์ที่ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 6.7 W cm<sup>2</sup> และพบว่าที่กำลังในการสปัตเตอริงต่ำจะทำให้ฟิล์มมีปริมาณของ sp<sup>3</sup> สูง และไม่แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน  $I_D/I_G$  อย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 4.28



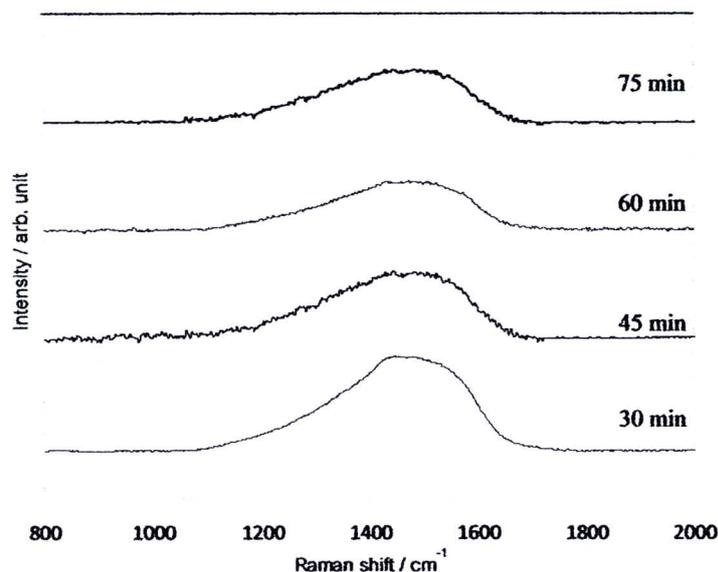
รูปที่ 4.27 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_D/I_G$  และ ตำแหน่งของพีก G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า



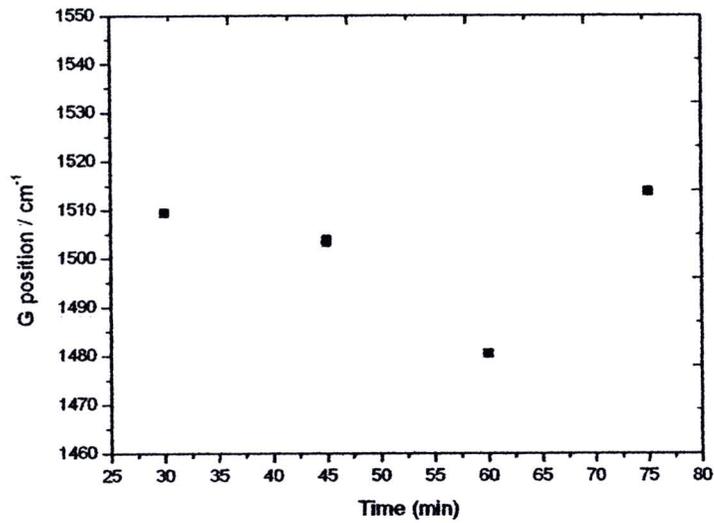
รูปที่ 4.28 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_D/I_G$  จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 6.7-20  $Wcm^{-2}$  [21]

#### 4.4.3 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ต่ออัตราการสังเคราะห์ฟิล์ม

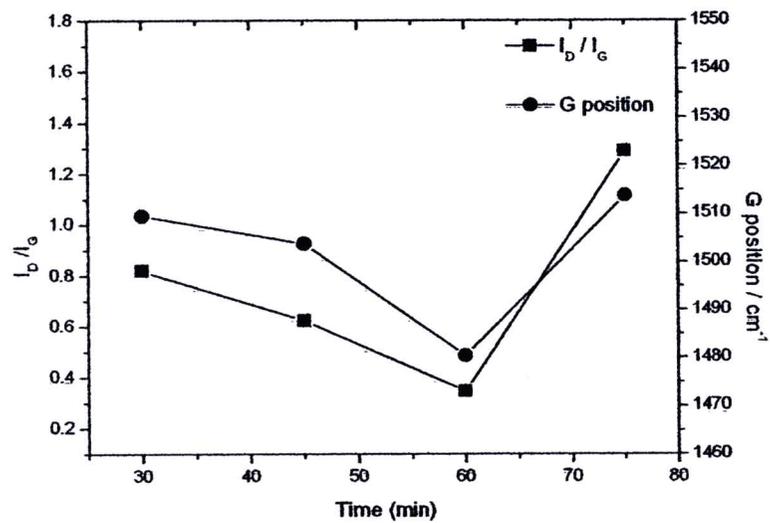
ในการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ในปริมาณ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน โดยศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาจาก 30-60 นาที ฟิล์ม DLC มีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  ลดลง และตำแหน่งของพีก G ลดลงด้วยเช่นกัน แสดงค่าฟิล์มมีค่าสภาพไฟฟ้าที่ลดลงแต่เมื่อเพิ่มเวลาเพิ่มมากขึ้นทั้งอัตราส่วน  $I_D/I_G$  และตำแหน่งของพีก G เพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มมีสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 min



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06 % ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 min



รูปที่ 4.31 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_b / I_g$  จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 min