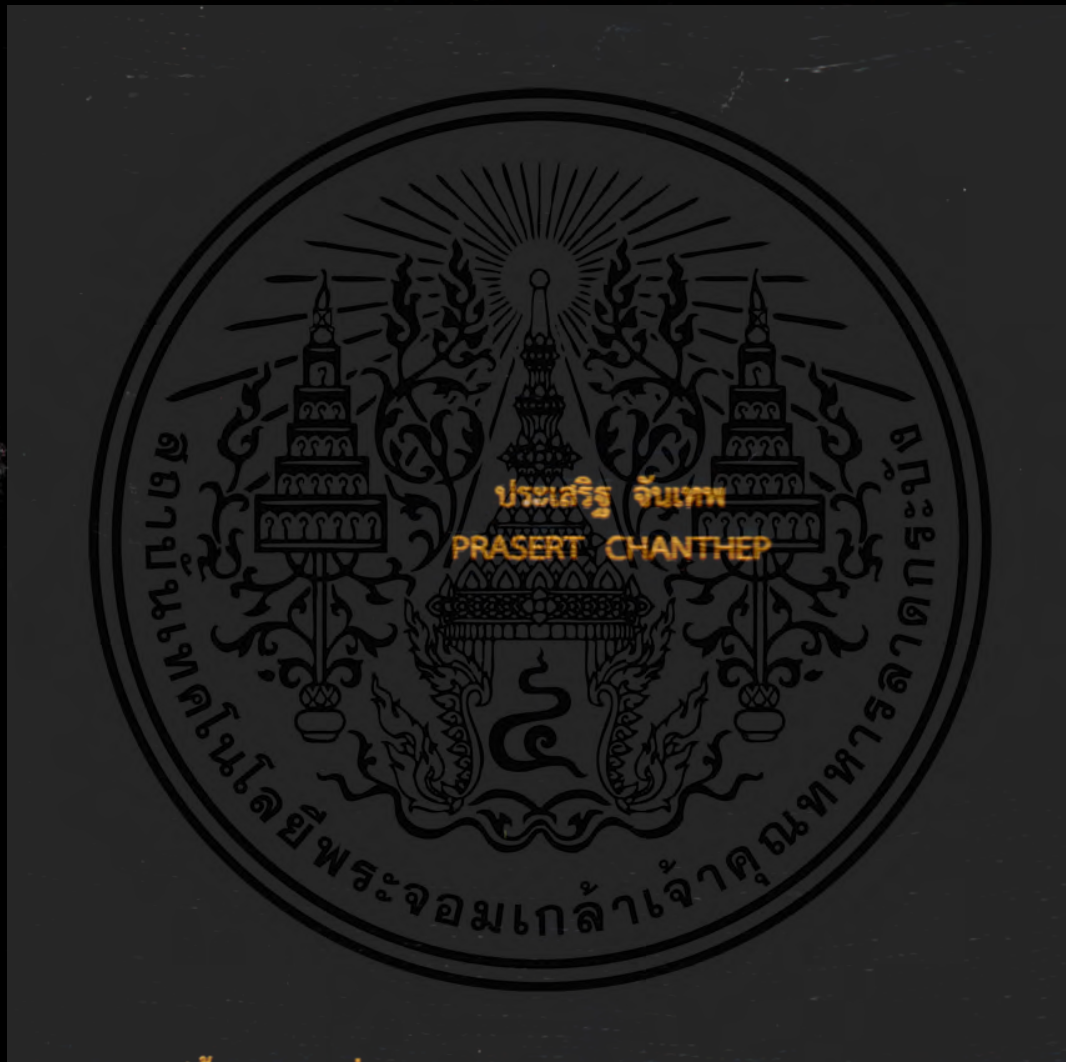


กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรเอ็กทรินซิกด้วยวิธี HFCVD  
โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส

SYNTHESIS OF EXTRINSIC DIAMOND CRYSTAL HFCVD  
AND ADDITION OF BORON AND PHOSPHORUS IMPURITIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-043

กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรเอ็กทรินซิคด้วยวิธี HFCVD  
โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส

SYNTHESIS OF EXTRINSIC DIAMOND CRYSTAL HFCVD  
AND ADDITION OF BORON AND PHOSPHORUS IMPURITIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560  
KMITL-2017-EN-M-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF EXTRINSIC DIAMOND CRYSTAL HFCVD  
AND ADDITION OF BORON AND PHOSPHORUS IMPURITIES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017  
KMITL-2017-EN-M-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรเอ็กทรินซิก ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอม สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส

Thesis Title Synthesis of Extrinsic Diamond Crystal HFCVD and Addition of Boron and Phosphorus Impurities

นักศึกษ นายประเสริฐ จันทเพ

รหัสประจำตัว 58601329

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

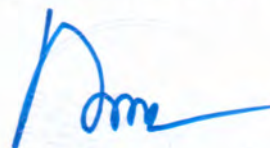
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-043-206

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.รังสรรค์	เมืองเหลือ	
ดร.นรินทร์	อติวงศ์แสงทอง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2560  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรเอ็กทรีนซิค ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส
นักศึกษา	นาย ประเสริฐ จันท
รหัสนักศึกษา	58601329
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรเอ็กทรีนซิค จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) โดยจะทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีจากการเติมอะตอมสารเจือโบรอน และจะทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นจากการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy แสดงตำแหน่งจุดยอดกราฟ  $1332\text{ cm}^{-1}$  ผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดใหญ่มากกว่า 2 มิลลิเมตร จากการยืนยันด้วยภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) จากการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วย Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น พบว่าปริมาณโบรอนค่าเท่ากับ 1.564 4.884 7.928 และ 11.052 wt% ตามลำดับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนความเข้มข้น (B/C) ที่มากขึ้น ในส่วนของผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นพบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น (P/C) ที่มากขึ้น ปริมาณของฟอสฟอรัสมีค่าเท่ากับ 1.318 4.698 7.786 และ 10.924 wt% ตามลำดับ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การวิเคราะห์ชนิดของพาหะส่วนมากของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น (B/C) ค่าต่างๆ ด้วยวิธี Hot-point probe พบว่าพาหะส่วนมากของผลึกเพชรนั้นเป็นโฮล จึงสามารถยืนยันได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และในส่วนของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น (P/C) ที่ต่างๆ พบว่าพาหะส่วนมากนั้นเป็นอิเล็กตรอนทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีกับอัตราส่วนความเข้มข้นพบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น (B/C) ที่เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 877.19 k $\Omega$ , 595.23 k $\Omega$ , 355.87 k $\Omega$  และ 104.49 k $\Omega$  ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง สำหรับผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นพบว่า มีค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 892.85 k $\Omega$ , 602.40 k $\Omega$ , 373.13 k $\Omega$  และ 106.26 k $\Omega$  ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วน (P/C) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งสองชนิดนั้นมีคุณสมบัติไฟฟ้าที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	SYNTHESIS OF EXTRINSIC DIAMOND CRYSTAL HFCVD AND ADDITION OF BORON AND PHOSPHORUS IMPURITIES
<b>Student</b>	Mr. PRASERT CHANTHEP
<b>Student ID</b>	58601329
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. NARIN ATIWONGSANGTHONG

## ABSTRACT

This thesis proposes the synthetic process of extrinsic diamond crystal using the hot filament chemical vapor deposition (HFCVD). P-type diamond crystal was synthesized by the addition of boron impurity and n-type diamond crystal was synthesized by the addition of phosphorous impurity. From the analysis using Raman Spectroscopy, peak at  $1332\text{ cm}^{-1}$  was observed. The size of the synthetic diamond is larger than 2 millimeters. The relationship of element quantitatively and concentration ratio were confirmed from the images of scanning electron microscopy (SEM) and the analysis of p-type diamond crystal of energy dispersive X-ray spectrometer (EDX). It was found that the quantity of boron 1.564 4.884 7.928 และ 11.052 wt% respectively and tends to directly increase with the concentration ratio (B/C). For the n-type crystal diamond, the quantity of phosphorous 1.318 4.698 7.786 และ 10.924 wt% respectively and tends to directly increase with the concentration ratio (P/C). The analysis of carrier type of p-type crystal diamond at various concentration ratios (B/C) using hot-point probe shows that the majority of carrier of the diamond crystal is holes; hence it can be confirmed that it is p-type semiconductor. For the n-type crystal diamond at various concentration ratios (P/C), it was found that most of carriers are electron. Therefore it can be confirmed that it is n-type semiconductor. The relationship between resistance and the concentration ratio of p-type diamond crystal is obtained from the analysis of current and voltage. It was found that, the resistance of 877.19 k $\Omega$ , 595.23 k $\Omega$ , 355.87 k $\Omega$  and 104.49 k $\Omega$  respectively decreased as the concentration ratio (B/C) increased. For the n-type crystal diamond, the resistance of 892.85 k $\Omega$ , 602.40 k $\Omega$ , 373.13 k $\Omega$  and

106.26 k $\Omega$  respectively decreased as the concentration ratio (P/C) increased; hence the electrical conductivity of both synthetic diamond crystals is improved.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา [คลิก](#) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XIV
รายการสัญลักษณ์.....	XV
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการ.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 ผลึกของคาร์บอน.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกเพชร.....	5
2.3 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ.....	6
2.4 คุณสมบัติทางกลศาสตร์.....	7
2.5 เทคนิคการสังเคราะห์เพชร.....	7
2.6 หลักการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	8
2.7 กระบวนการของก๊าซเฟส.....	10
2.8 บทบาทของไฮโดรเจน.....	12
2.9 บทบาทของออกซิเจน.....	13
2.10 ปฏิกิริยาที่ใส่หลอด.....	14
2.11 ผลของอุณหภูมิฐานรอง.....	14
2.12 ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน.....	14
2.13 กระบวนการโต.....	18
2.14 การแอนนัล.....	20
2.15 สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค.....	21
2.15.1 อะตอมสารเจือ.....	21
2.15.2 อะตอมสารเจือชนิดอื่น.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15.3 อะตอมสารเจือชนิดพี.....	22
2.15.4 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	22
2.15.5 สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	23
บทที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรและวิธีการทดลอง.....	26
3.1 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD.....	27
3.1.1 กระบวนการเตรียมฐานรองในการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็น.....	27
3.1.2 การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยวิธี HFCVD.....	28
3.1.2.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณโบรอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน B/C ความเข้มข้น 10,000 ppm .....	31
3.1.3 การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD.....	34
3.1.3.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ที่อัตราส่วน B/C ความเข้มข้น 10,000 ppm .....	35
3.1.4 การวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็น ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	38
3.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) .....	39
3.1.6 การวิเคราะห์ธาตุของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นด้วย EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer) .....	40
3.1.7 การวิเคราะห์ชนิดพาหะส่วนใหญ่ของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น ด้วยเทคนิคด้วยวิธี Hot-Point Probe .....	41
3.1.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
4.1 ผลการทดลองสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยวิธี HFCVD .....	43
4.1.1 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy .....	43
4.1.2 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy .....	46
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) .....	49
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) .....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา vvi ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็น ที่ระยะเวลารวมทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยวิธี HFCVD .....	54
4.2.1 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy .....	54
4.2.2 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy .....	57
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดผลึกเพชรชนิดพีที่ ที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) .....	60
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ ที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) .....	62
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer) .....	65
4.2.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer) .....	67
4.2.7 ผลการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธี Hot-Point Probe .....	70
4.2.8 ผลการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธี Hot-Point Probe .....	71
4.2.9 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง .....	73
4.2.10 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็น เวลา 240 ชั่วโมง .....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก ก. เครื่องมือวิเคราะห์.....	86
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	88
ประวัติผู้เขียน .....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆที่อุณหภูมิ 293 °K .....	6
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเพชรกับวัสดุอื่นๆ .....	7
2.3 เงื่อนไขและเทคนิคในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ในรูปแบบต่างๆ.....	8
2.4 ชนิดของฐานรองเมื่อแบ่งตามการฟอร์มตัวของชั้นอินเตอร์มีเดียท.....	16
3.1 อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์.....	29
3.2 แสดงมวลอะตอมของโบรอนและมวลของธาตุต่างๆ .....	31
3.3 อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์.....	35
3.4 แสดงมวลอะตอมของฟอสฟอรัสและมวลของธาตุต่างๆ .....	35
3.5 ตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman spectroscope .....	39
4.1 ค่าต่างๆจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ แบบ Pure Element ของผลึกเพชรชนิดพี .....	61
4.2 ค่าต่างๆจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ แบบ Pure Element ของผลึกเพชรชนิดเอ็น.....	64
4.3 ชนิดของพาหะส่วนมากของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Hot-Point Probe .....	66
4.4 ค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ.....	69
4.5 ค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ.....	73

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลึกเพชรและแกรไฟต์.....	4
2.2 (ก) ผลึกเพชร	
(ข) โครงสร้างผลึกเพชร	
(ค) แกรไฟต์	
(ง) โครงสร้างแกรไฟต์ .....	5
2.3 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD (Hot filament chemical deposition).....	9
2.4 กระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD .....	10
2.5 กระบวนการการเกิดเพชรและแกรไฟต์ในการสังเคราะห์.....	12
2.6 การเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Promotion).....	13
2.7 กลไกการนิวเคลียสและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง .....	15
2.8 การเกิดนิวเคลียสบนชั้นอินเตอร์มีเดียท.....	17
2.9 ระดับพลังงานออร์บิทัลและการจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอน.....	17
2.10 สภาวะ Recovery และการจัดเรียงตัวของเกรนเริ่มต้นระหว่าง Recovery .....	20
2.11 แผนภาพการก่อเกี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนและอะตอมฟอสฟอรัส .....	22
2.12 แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน.....	23
2.13 แผนภาพการก่อเกี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนและอะตอมโบรอน .....	24
2.14 แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน.....	25
3.1 ตัวอย่างแผ่นซิลิกอนชนิดกริดเป็นร่องเป็นลักษณะตารางขนาด 1 ตารางเซนติเมตร .....	28
3.2 ตัวอย่างแผ่นซิลิกอนชนิดชั้นมันขนาด 1 ตารางเซนติเมตร .....	28
3.3 แผนภาพการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยวิธี HFCVD ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนใน อัตราส่วน 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ.....	29
3.4 แผนภาพการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD ที่อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อ คาร์บอนในอัตราส่วน 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ.....	34
3.5 เครื่อง Raman spectroscope .....	38
3.6 เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) .....	40
3.7 เครื่อง EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer).....	40
3.8 การวิเคราะห์ชนิดของพหุส่วมากของผลึกเพชร .....	41
3.9 ตัวอย่างผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน.....	42
3.10 วงจรวัดค่ากระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **ix** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง ด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีส (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีส.....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วยการเติม อะตอมสารเจือโบรอนด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) B/C 10,000 ppm (ข) B/C 20,000 ppm (ค) B/C 30,000 ppm (ง) B/C 40,000 ppm.....	45
4.3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง ด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีส (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีส.....	47
4.4 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วยการเติม อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) P/C 10,000 ppm (ข) P/C 20,000 ppm (ค) P/C 30,000 ppm (ง) P/C 40,000 ppm.....	48
4.5 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm.....	49
4.6 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm.....	50
4.7 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm.....	50
4.8 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm.....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm.....	52
4.10 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm.....	52
4.11 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm.....	53
4.12 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm.....	53
4.13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง ด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีสล (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีสล.....	55
4.14 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมงด้วยการเติม อะตอมสารเจือโบรอนด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) B/C 10,000 ppm (ข) B/C 20,000 ppm (ค) B/C 30,000 ppm (ง) B/C 40,000 ppm.....	56
4.15 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง ด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีสล (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีสล.....	58
4.16 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมงด้วยการเติม อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) P/C 10,000 ppm (ข) P/C 20,000 ppm (ค) P/C 30,000 ppm (ง) P/C 40,000 ppm.....	59

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm.....	60
4.18 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm.....	61
4.19 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm.....	61
4.20 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm.....	62
4.21 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm.....	63
4.22 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm.....	63
4.23 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm.....	64
4.24 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm.....	64
4.25 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีด้วยเทคนิค EDX ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm.....	65
4.26 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีด้วยเทคนิค EDX ที่ อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm.....	65
4.27 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีด้วยเทคนิค EDX ที่ อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm.....	66
4.28 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีด้วยเทคนิค EDX ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm.....	66
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น B/C .....	67
4.30 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยเทคนิค EDX ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm.....	68
4.31 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยเทคนิค EDX ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm.....	68

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยเทคนิค EDX ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm.....	69
4.33 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยเทคนิค EDX ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm.....	69
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น P/C .....	70
4.35 อุปกรณ์การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพี .....	71
4.36 อุปกรณ์การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็น .....	72
4.37 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm.....	73
4.38 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm.....	74
4.39 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm.....	74
4.40 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm.....	75
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีกับที่อัตราส่วนความ เข้มข้น B/C ที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	76
4.42 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm.....	77
4.43 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm.....	77
4.44 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm.....	78
4.45 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm.....	78
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดเอ็นกับที่อัตราส่วน ความเข้มข้น P/C ที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	79
ก-1 เครื่อง Microscope ของ Nikon รุ่น 1500x ติดตั้งประจำอยู่ที่ TMEC.....	86
ก-2 เครื่อง Scanning Electron Microscope ( SEM ) ของ Hitachi รุ่น S-4700 ติดตั้ง อยู่ที่ TMEC.....	86

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-3 เครื่อง Raman Spectroscopy ของ RENISHAW ติดตั้งประจำอยู่ที่ บริษัท WESTERN DIGITAL.....	87
ก-4 เครื่อง Daimond Tester ยี่ห้อ Presidium Multi III .....	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **xiv** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Å	Angstrom	อังสตรอม
Ar	Argon	อาร์กอน
B	Boron	โบรอน
cm	Centimeter	เซนติเมตร
CZ	Czochralski silicon	ฐานรองซิลิคอนโซคราลสกี
DI	De-ionization water	น้ำไร้ประจุ
E <sub>A</sub>	Acceptor Level	ระดับผู้รับ
E <sub>C</sub>	Conduction Level	ระดับพลังงานนำไฟฟ้า
E <sub>D</sub>	Donor Level	ระดับผู้ให้
E <sub>g</sub>	Energy gap	ช่องว่างแถบพลังงาน
E <sub>v</sub>	Valence Level	ระดับพลังงานวาเลนซ์
FZ	Floating zone silicon	ฐานรองซิลิคอนโพลติงโซน
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
n	Negative charge	ประจุไฟฟ้าลบ
N <sub>A</sub>	Acceptor atom	อะตอมผู้รับ
N <sub>A</sub> <sup>-</sup>	Negative ionized acceptor atoms	ไอออนลบของอะตอมผู้รับ
N <sub>D</sub>	Donor atom	อะตอมผู้ให้
N <sub>D</sub> <sup>+</sup>	Positive ionized donor atoms	ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้
n-Si	N type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
nm	Nanometer	นาโนเมตร
P	Phosphorus	ฟอสฟอรัส
p	Positive charge	ประจุไฟฟ้าบวก
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
Pt	Platinum	แพลทินัม
R	Recombination	อัตราการรวมตัวใหม่
Si	Silicon	ซิลิคอน
s	Second	วินาที
μm	Micrometer	ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$A$	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
$A^*$	คือ	ค่าคงตัวริชาร์ดสัน
$C$	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
$D$	คือ	ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดรังสีและอุปกรณ์
$D_{TxR}$	คือ	ปริมาณรังสีที่ดูดซับโดยเฉลี่ยในเนื้อเยื่อ
$E_0$	คือ	ระดับสูญญากาศ
$E_A$	คือ	ระดับผู้รับแบบลิก
$E_a$	คือ	ระดับพลังงานกระตุ้น
$E_C$	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
$E_D$	คือ	ระดับผู้ให้แบบลิก
$E_F$	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
$E_{FM}$	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านโลหะ
$E_{FS}$	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ
$E_g$	คือ	ช่องว่างพลังงาน
$E_i$	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
$E_V$	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
$E_T$	คือ	ระดับพลังงานของจุดบกพร่อง
$\mathcal{E}_s$	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
$h$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
$I_0$	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
$I_F$	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
$I_{MS}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
$I_R$	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ
$I_s$	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
$I_{SM}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
$I_P$	คือ	กระแสแสง
$I_c$	คือ	กระแสคอนดักเตอร์
$I_d$	คือ	กระแสโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **XV** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$J$	คือ	ความหนาแน่นกระแส
$k$	คือ	ค่าคงที่โบสต์มันน์
$kV$	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
$mA$	คือ	กระแสที่ถูกบ่อนให้หัวจ่ายรังสีเอกซ์
$n$	คือ	แพคเตอร์อุคมคติ
$N_A$	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
$N_A^-$	คือ	ไอออนลบของอะตอมผู้รับ
$N_D$	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
$N_D^+$	คือ	ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้
$q$	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
$S$	คือ	เวลาการฉายรังสีเอกซ์
$T$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$V_A$	คือ	แรงดันไบอัส
$V_{bi}$	คือ	แรงดันภายใน
$W_d$	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
$\chi$	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
$\phi_{bn}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อคึกิ
$\phi_M$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_S$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

## รายการคำศัพท์เทคนิค

### ภาษาไทย

กระตุ้น  
กระแสไปข้างหน้า  
กระแสรั่วไหลย้อนกลับ  
กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน  
กระแสอิ่มตัว  
กระแสรั่วไหล  
การนิวเคลียส  
การสะสมประจุพาหะ  
กาวเงิน  
แกรไฟต์  
การฉายรังสีเอกซ์  
การแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม  
การทะลุทะลวง  
การไบอัสไปข้างหน้า  
การไบอัสย้อนกลับ  
การพังทลายแบบบอวาแลนซ์  
การแพร่เข้าไปแทนที่  
กำแพงศักย์ภายใน  
ขั้วแคโทด  
ขั้วแอโนด  
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ  
ความเร็วของอิเล็กตรอน  
ค่าสภาพต้านทาน  
จุดบกพร่อง  
ช่องว่างแถบพลังงาน  
ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ  
ซอฟต์แวร์เอกซ์เรย์  
ไดโอดพี-เอ็น  
ตัวตรวจวัดแสง

### ภาษาอังกฤษ

Activation  
Forward Current  
Leakage Reverse Current  
Ion implantation  
Saturated current  
Leakage current  
Nucleation  
Accumulation of Carrier  
Silver paste  
Graphite  
X-ray irradiation  
Interstitial  
Penetration  
Forward bias  
Reverse bias  
Avalanche breakdown  
Substitutional diffusion  
Potential barrier  
Cathode  
Anode  
Depletion width  
Thermal velocity  
Resistivity  
Defect  
Energy gap  
Native oxide  
Soft x-ray  
P-N diode  
Photodetectors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XVII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

### ภาษาไทย

### ภาษาอังกฤษ

ไตรโคโลเอทธีลีน

Trichloroethylene

แถบนำไฟฟ้า

Conduction band

แถบวาเลนซ์

Valence band

เนื้อสารกึ่งตัวนำ

Bulk

น้ำยาขึ้นลวดลาย

Developer

น้ำยาไวแสง

Photoresist

เบ้าหลอมสาร

Crucible

โปรตรอน

Proton

พลังงานยึดเหนี่ยว

Binding energy

พาหะส่วนมาก

Majority carrier

พาหะส่วนน้อย

Minority carrier

ฟังก์ชันงาน

Work function

โฟโตมาร์ก

Photo mask

โฟโตลิโธกราฟี

Photolithography

ภาคตัดขวางการจับยึด

Capture cross section

ระดับพลังงานระดับลึก

Deep level energy

ระดับพลังงานดักจับ

Energy trap

เรคทีไฟร์

Rectifier

แรงดันพังทลาย

Breakdown voltage

รอยสัมผัสขั้วต่อตักกี

Schottky contact

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

Metal-semiconductor contact

รอยสัมผัสโอห์มิก

Ohmic contact

ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก

Deep acceptor level

ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก

Deep donor level

ระดับพลังงานเฟอร์มิ

Fermi energy

ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

Electron-beam evaporation

รังสีเอกซ์

X-ray

สิ่งปนเปื้อน

Contamination

สารกึ่งตัวนำชนิดพี

p-type semiconductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XVIII ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

### ภาษาไทย

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น  
สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง  
สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง  
สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก  
สารเจือระดับลึก  
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
สัมประสิทธิ์การแพร่  
ศูนย์กลางการดักจับ  
ศูนย์กลางการรวมตัว  
ศูนย์กลางการเกิดพาหะ  
อบแผ่นครั้งแรก  
อะซิโตน  
อายุการรวมตัวของพาหะ  
อายุการเกิดของพาหะ  
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  
อัลตราโซนิค  
อะตอมบกพร่อง  
ฮาร์ดเอกซ์เรย์

### ภาษาอังกฤษ

n-type semiconductor  
Direct band gap semiconductor  
Indirect band gap semiconductor  
Extrinsic semiconductor  
Deep impurity  
Light absorption coefficient  
Diffusion coefficient  
Trap center  
Recombination center  
Generation center  
Pre bake  
Acetone  
Recombination lifetime  
Generation lifetime  
Electron affinity  
Ultrasonic  
Defect atoms  
Hard x-ray

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในราวศตวรรษที่ 18 Antoine Laurent Lavoisier ได้ค้นพบเพชรเป็นรูปผลึกของคาร์บอน โดยมีนักทดลองที่ได้พยายามทำการสังเคราะห์เพชรขึ้น ซึ่งผู้ประสบผลสำเร็จเป็นคนแรก คือ William G. Eversole แห่ง Union Carbide [1] และปี 1952 ได้มีการสร้างผลึกเพชรจากคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนที่ความดันปานกลาง โดยในตอนแรกๆนั้น ได้มุ่งประเด็นไปที่กระบวนการสร้างที่มีความดันสูง ซึ่งในปี 1953 กลุ่มชาวสวีเดน ที่ Alimanna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) ได้ทำการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง แต่ไม่มีการบันทึกไว้ว่าพวกเขาค้นพบด้วยวิธีการอย่างไร ต่อมาในปี 1955 General Electric ได้ประกาศความสำเร็จต่อสาธารณะเป็นครั้งแรกว่า [2] สามารถสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงและอธิบายการทำงานโดยถูกตีพิมพ์ในเนเจอร์ [3] ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงต้องมีเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีราคาแพงและมีใช้เฉพาะในด้านอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มากๆ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นมีผลผลิตประมาณ 100 ตันต่อปี ในระหว่างที่เทคนิคการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงได้ถูกพัฒนา โดยนักวิจัยหลายคนนั้นมีความสนใจการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำซึ่งเหมือนกับการเปลี่ยนธาตุตะกั่วไปเป็นทองคำ โดยการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำนั้นมีการเปิดรายงานเป็นครั้งแรกจากการตีพิมพ์ในปี 1962 โดย Eversole ที่ Union Carbide Corporation [4] ในปี 1966 Lander และ Morrison ที่ Bell laboratories ได้ศึกษาบทบาทของไฮโดรเจนในผิวหน้าทางเคมีของเพชร และได้พูดถึง การเปลี่ยนชั้น Epitaxial ของเพชบบนเพชร ปรากฏว่ามีความเป็นไปได้ในช่วงอุณหภูมิ 900-1400 องศาเซลเซียส ถ้าไม่มีแกรไฟต์มาขัดขวางการนิวเคลียสชัน [5] และในปี 1968 Angus และคณะผู้วิจัย ที่ Case Western Reserve University, Cleveland [6] จากนั้นในปี 1971 พวกเขาได้นำเสนองานในการประชุมที่ Kiva ในสหภาพโซเวียต การสังเคราะห์เพชรโดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน และรวมถึงการใช้อะตอมของไฮโดรเจนในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการสร้าง [7] และในปี 1956 Bori Spitsyn และ Bori Deryagin ที่สถาบันเคมีฟิสิกส์ในมอสโก ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์โดย Thermal decomposition ของไอระเหยคาร์บอนเตตระไฮไดรด์ และคาร์บอนเตตระโบมายด์ ที่อุณหภูมิ 900-1,000 องศาเซลเซียส ที่ความดัน  $10^{-6}$  ทอร์ [8] ซึ่งเป็นแนวคิดของ Bori Spitsyn ในขณะที่เขาเรียนอยู่ที่มหาวิทยาลัย Tomsk แต่วิธีนี้ไม่ถูกตีพิมพ์จนกระทั่งในปี 1980 ระหว่างปี 1980 ถึง 1990 กลุ่มนักวิจัยชาวญี่ปุ่นภายใต้การนำของ Nobuo setaka ที่ National Institute for Research in Inorganic Material (NIRIM) ใน Tsukuba ได้เปิดเผยวิธีสำหรับการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ โดยมีทีมนักวิจัยคือ Yoichiro Sato, Seiichiro Matsumoto และ Mutsukazu Kamo ซึ่งเป็นการเริ่มสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ที่ทันสมัยของโครงการ NIRIM [9] และในปี 1981 นักวิจัยจาก NIRIM ได้เข้าร่วมการประชุม International Conference on Crystal Growth ในมอสโก [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใบเซปรีเยชันดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พวกเขาได้เห็นถึงผลงานวิจัยของ Spitsyn และคณะผู้วิจัย [11] จากสถาบันเคมียุโรปที่สเปนรวมไปถึง การวิเคราะห์ของผลึกเพชรใหม่บนซิลิกอนและทองแดงในการใช้อะตอมของไฮโดรเจน นักวิจัยของ NIRIM ได้ตอบกลับว่าการเข้าใจสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญซึ่งทำให้ประสบความสำเร็จใน การโตของเพชร เป็น ครั้งแรกที่ถูกตีพิมพ์โดยการอธิบายผลของการ Deposition ของเพชรโดยใช้สเปกตรัมของสเปกตรัมที่ อุณหภูมิประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส [12,13] หลังจากที่ประสบความสำเร็จกับการใช้สเปกตรัม ความร้อนในการช่วยทำให้เกิด Deposition กลุ่มนักวิจัย NIRIM ยังได้รายงานอีกว่าการโตของเพชร นั้นยังสามารถใช้วิธี Microwave discharge และ RF glow discharge ได้อีกด้วย หลังจากที่ญี่ปุ่นได้ พัฒนาก้าวหน้าไปมาก ทางอเมริกาและยุโรป ก็ได้เริ่มกลับมาสนใจอย่างจริงจังอีกครั้ง โดยในปัจจุบัน มีการศึกษาและวิจัยการสังเคราะห์เพชรทั่วโลก รวมถึงที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นอกจากนี้สามารถนำ เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นได้นั้นมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิจัย โดยการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพี โดยการเติม อะตอมสารเจือปนที่ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นโบรอนต่อคาร์บอนที่ 10,000 ถึง 40,000 ppm ตามลำดับ และการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็น โดยการเติมอะตอมสารเจือปนฟอสฟอรัสที่อัตราส่วน ความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนที่ 10,000 ถึง 40,000 ppm ตามลำดับ ด้วยวิธี HFCVD โดยใช้ ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของ ผลึกเพชรทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานของการศึกษาการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยการเติมอะตอมสารเจือปนโบรอน และ สังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยการเติมอะตอมสารเจือปนฟอสฟอรัส ที่อัตราส่วนความเข้มข้นที่ค่า ต่างๆ

ในสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิกหรือสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นั้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K โดยพลังงาน ความร้อนนั้นจะทำให้เกิดการไอออไนซ์อะตอมสารกึ่งตัวนำบางอะตอม ทำให้เกิดเป็นพาหะคู่ อิเล็กตรอน-โฮล โดยอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่แถบวาเลนซ์นั้นจะถูกกระตุ้นไปอยู่ที่แถบนำ ไฟฟ้า ทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะนำ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน และโฮล นั้นมีค่าเท่ากัน โดยในสภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิกึ่งที่ ความ หนาแน่นของพาหะนั้นก็จะมีค่าคงที่

ข้อด้วยดั่งที่กล่าวมานี้สามารถที่จะแก้ไขได้ โดยการทำให้สารกึ่งตัวนำมีความนำไฟฟ้าสูงขึ้น จึง ต้องทำการเติมอะตอมสารเจือปนในสารอินทรีนซิก สารกึ่งตัวนำที่ได้นั้นจะไม่บริสุทธิ์ หรือเรียกว่า สารเอ็กทรีนซิก เมื่อเติมอะตอมสารเจือปนให้ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และเมื่อเติมอะตอมสารเจือ ปนรับจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นนั้นโดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัสจากคุณสมบัติของการเติมอะตอมสารเจือด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยนั้น ซึ่งจะทำให้ความนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอีกแบบที่วัสดุตัวนำไม่สามารถทำได้ เช่น ทองแดง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในทองแดงนั้นมีสูงมากอยู่แล้ว การที่จะเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขึ้นไปอีกนั้นค่อนข้างยาก เนื่องจากการเติมอะตอมสารเจือเพียงเล็กน้อยนั้นจะไม่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นคุณสมบัติพิเศษของสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ในส่วนของสารกึ่งตัวนำประเภทเดียวกันนั้น อะตอมสารเจือคืออะตอมของธาตุที่อยู่ในหมู่ 3 และหมู่ 5 ในตารางพีริออดิกของธาตุ ใช้ในการเติมลงไปผลึกสารกึ่งตัวนำทำให้ได้ชนิดของพาหะ เช่น โฮล หรือ อิเล็กตรอน และสามารถคำนวณปริมาณของพาหะได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เรียกว่า การโด๊ป โดยในการที่จะเติมอะตอมสารเจือนั้นอะตอมที่นำมาจะต้องมีขนาด และคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำนั้นๆซึ่งจะไม่ทำให้โครงสร้างของผลึกของสารนั้นเกิดการเสียหายได้

โดยลักษณะของงานวิจัยนี้จึงเป็นการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน และสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ที่อัตราส่วนความเข้มข้นที่ค่าต่างๆ

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการศึกษาการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดดีด้วยวิธี HFCVD ด้วยการเติมอะตอมสารเจือที่ค่าความเข้มข้นที่ค่าต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติต่างๆของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 5 บท คือ

ในบทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิดและทฤษฎี ขอบเขตงานวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับใช้ในงานวิจัย ผลึกของคาร์บอน โครงสร้างเพชร และคุณสมบัติของผลึกเพชร เทคนิคต่างๆในการสังเคราะห์เพชร หลักการการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD กระบวนการและปฏิกิริยาต่างๆในการสังเคราะห์ สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคและเอ็กทรีนซิค

ในบทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่เติมอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆด้วยวิธี HFCVD และขั้นตอนการนำไปวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น

ในบทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งในส่วนแรกนั้นจะเป็นการยืนยันคุณสมบัติของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ วิเคราะห์ลักษณะและขนาดของผลึกเพชร วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรหลังจากการเติมอะตอมสารเจือ วิเคราะห์ชนิดพาหะส่วนมากในการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร และวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชร

ในบทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลของงานวิจัยที่ได้ศึกษาและวิจารณ์ผล ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้นั้นเป็นพื้นฐานหรือแนวทางในการนำไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

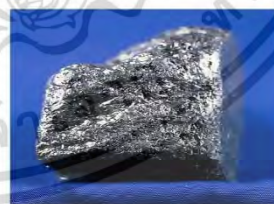
#### 2.1 ผลึกของคาร์บอน [14]

ลักษณะผลึกของเพชรนั้นเป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ของคาร์บอน โดยสี่อะตอมของคาร์บอนในเพชรนั้นจะเกาะเกี่ยวกันโดยใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือเรียกว่าเป็นพันธะแบบโควาเลนต์จับตัวกันแบบ tetrahedral ในทุกๆด้านหรือทั้งสามมิติ ดังรูปที่ 2.1 (ก) และ (ข) โดยมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ เป็นฉนวนที่ดี สามารถนำความร้อนได้สูงกว่าเงินและทองแดงถึง 5 เท่า มีความโดดเด่นในเรื่องของความแข็ง ความทนทาน และยังสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องประดับที่มีราคาสูง เป็นต้น

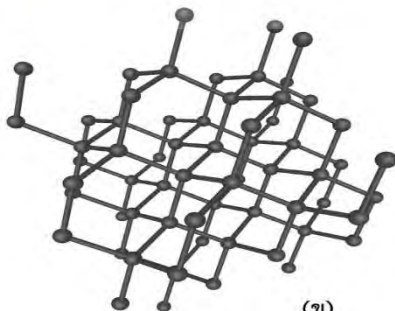
สำหรับแกรไฟต์นั้นเป็นผลึกคาร์บอนแต่ไม่สมบูรณ์เท่าเพชรแสดงดังรูปที่ 2.1 (ค) และ (ง) โดยอะตอมคาร์บอนของแกรไฟต์นั้นจะเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์เฉพาะในระนาบหนึ่งเท่านั้น โดยแต่ละระนาบของอะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันแบบวงวนเดอวาลล์ ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงเท่ากับพันธะโควาเลนต์ทำให้แต่ละชั้นของผลึกสามารถเลื่อนได้ง่าย เนื่องจากแนวของวาเลนซีและแนวการนำไฟฟ้าเกิดการเอียงกันเล็กน้อย ทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้มีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าขนานกับชั้นโครงสร้างอะตอม มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนขนานกับแนวชั้นโครงสร้างอะตอมเป็นลบ มีการหดตัวน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับส่วนในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างอะตอมของแกรไฟต์นั้น จะมีอะตอมคาร์บอนที่ไม่หนาแน่นเช่นเดียวกับเพชร ค่าความเค้น ความแข็ง โมดูลัส ความยืดหยุ่นน้อยกว่าเพชรมาก สามารถเกิดได้ในสภาวะปกติและที่อุณหภูมิห้อง มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เบ้าหลอมวัสดุ แท่งความร้อนไฟฟ้า



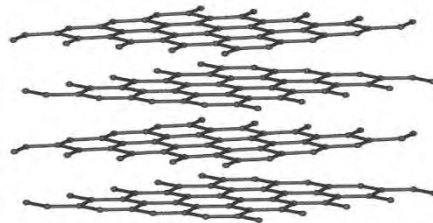
(ก)



(ค)



(ข)



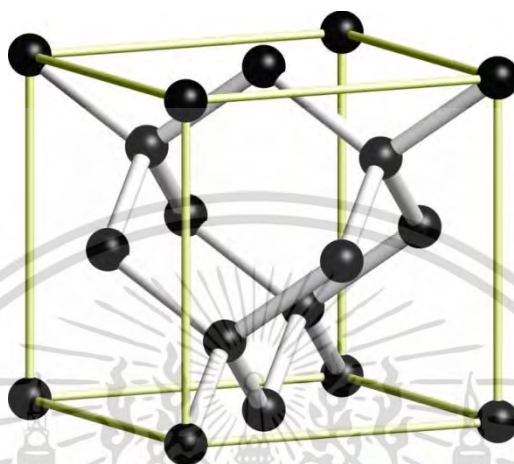
(ง)

รูปที่ 2.1 (ก) ผลึกเพชร (ข) โครงสร้างผลึกเพชร (ค) แกรไฟต์ (ง) โครงสร้างแกรไฟต์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 โครงสร้างผลึกเพชร [14]

โดยโครงสร้างเพชรนั้นจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุ โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างเรียกว่า “Diamond structure” แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกเพชร

ซึ่งเมื่อพิจารณาในหนึ่งเซลล์ (Unit Cell) นั้นจะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 8 อะตอม จัดเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) โดย  $1/8$  ของอะตอมจะอยู่ที่มุมทั้งแปด และ  $1/2$  อะตอมจะอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิทเซลล์ และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $1/4$  เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมของยูนิทเซลล์ โดยอะตอมคาร์บอนทั้ง 4 อะตอมที่อยู่รอบๆตัวมันเองจะจับตัวแบบ tetrahedral ด้วยพันธะโคเวเลนต์แบบ  $sp^3$  ซึ่งก็คือ Diamond structure อะตอมของคาร์บอนที่จับตัวกันจะมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม เมื่อพิจารณาระนาบของผลึกเพชรจะได้ว่า สามารถเรียงตัวได้หลายระนาบ เช่น ระนาบ (111) อะตอมของคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวกันเป็นสามเหลี่ยม ส่วนระนาบ (100) อะตอมของคาร์บอนในระนาบเดียวกันนั้นจะเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และระนาบ (110) อะตอมของคาร์บอนในระนาบเดียวกันนั้นจะเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยเป็นเพชรที่ระนาบ (111) และ (100) ซึ่งการเกิดขึ้นของระนาบของฟิล์มเพชรนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

## 2.3 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ที่อุณหภูมิ 293 K [16]

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิกอน	GaAs	SiC
Thermal conductivity (W/cm-k)	20	1.41	0.455	4
Specific heat (J/g-k)	0.52	0.7	0.35	0.65
Optical phonon energy (meV)	163	63	35	100
Longitudinal phonon velocity (cm/s)	$1.8 \times 10^6$	$9 \times 10^5$	$5.2 \times 10^5$	$1.3 \times 10^6$
Coefficient of thermal expansion	$0.8 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$5.9 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-6}$
Electron saturated velocity (cm/s)	$1.5 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1.2 \times 10^7$	$2 \times 10^7$
Hole saturated velocity (cm/s)	$1.05 \times 10^7$	$9 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /V-s)	2150±200	1420	8800	600
Hole mobility (cm <sup>2</sup> /V-s)	1700±280	470	400	650
Density of states effective mass Electron	0.57	1.1	0.068	0.45
Hole	1.2	0.8	0.5	1
Dielectric constant	5.7	11.9	12.5	10
Intrinsic resistivity	$>10^{15}$	$10^{15}$	$10^8$	$>10^{15}$
Conductivity effective mass Electron	0.48			
Hole	0.83			
Breakdown field (V/cm)	$1-20 \times 10^6$	$2 \times 10^5$	$3.5 \times 10^5$	$1-5 \times 10^6$
Bandgap (eV)	5.5	1.12	1.42	2.2
Effective density of states Conduction band (cm <sup>-3</sup> )	$1.1 \times 10^{19}$	$2.8 \times 10^{19}$	$4.7 \times 10^{17}$	$7 \times 10^{18}$
Valence band (cm <sup>-3</sup> )	$3 \times 10^{19}$	$1.04 \times 10^{19}$	$7 \times 10^{18}$	$2.5 \times 10^{19}$
Debye temperature-sensitive (K)	1860	645	344	1200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คุณสมบัติทางกลศาสตร์

นอกจากนั้นเพชรยังเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกพิจารณาเป็นอันดับต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ที่ดีกว่าวัสดุอื่น ในการสร้างอุปกรณ์จำพวก Sensor, Micromechanics และ Actuator เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเพชรกับวัสดุอื่นๆ [17]

Material	Yield Strength ( $10^{-10}$ dynes/cm <sup>2</sup> )	Knoop Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus ( $10^{12}$ dynes/cm <sup>2</sup> )	Density (gm/cm <sup>3</sup> )
Diamond*	53.0	7000	10.35	3.5
SiC*	21.0	2480	7.0	3.2
TiC*	20.0	2470	4.97	4.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.4	2100	5.3	4.0
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> *	14.0	3486	3.85	3.1
Iron	12.6	400	1.96	7.8
SiO <sub>2</sub>	8.4	820	0.73	2.5
Si*	7.0	850	1.9	2.3
Steel	4.2	1500	2.1	7.9
W	4.0	485	4.1	19.3
Stainless Steel	2.1	660	2.0	7.9
Mo	2.1	275	3.43	10.3
Al	0.17	130	0.70	2.7

\*Single Crystal

## 2.5 เทคนิคการสังเคราะห์เพชร

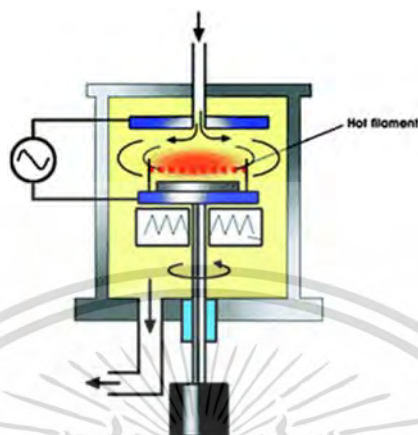
ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรนั้นสามารถสังเคราะห์ได้ที่ความดันต่ำและอุณหภูมิไม่สูงมาก ซึ่งวิธีในการสังเคราะห์นั้นจะใช้วิธี CVD (Chemical Vapour Deposition) โดยมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น แบบไส้หลอดความร้อน (Hot-filament CVD) แบบคอมบัสชัน (Combustion CVD) แบบพลาสมา (Plasma CVD) และแบบพลาสมาทอร์ช (Plasma Torch CVD) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละรูปแบบนั้นเงื่อนไขของการสังเคราะห์นั้นจะแตกต่างกันออกไป รวมไปถึงคุณสมบัติของเพชรจากการสังเคราะห์ขึ้นมานั้นก็แตกต่างกันออกไปซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3 อย่างไรก็ตามจากวิธีการสังเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ในการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะนั้นจะมีคล้ายกัน

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขและเทคนิคในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ในรูปแบบต่างๆ [18]

รูปแบบพลังงาน	ประเภท	เงื่อนไขการสังเคราะห์เพชรบนฐานรองที่เป็นซิลิกอนโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน				
		อุณหภูมิฐานรอง (°C)	ความดัน ( )	อัตราการไหลก๊าซไฮโดรเจน (l/min)	ปริมาณคาร์บอน: ไฮโดรเจน	ก๊าซเฉื่อย (l/min)
Hot filament	W, Rh, Pt, Ta	<1000	10-100	0.1-1	<1%	
Plasma	DC	<1000	10-50	0.1-1	<1%	
	RF	<1000	1-10	0.1-1		
	Microwave	<1000	100	0.1-1		
	ECR	400-600	<10	0.1-1		
Plasma Torch	DC arc jet					>10
	RF	≈1000	500-760	1-5	5-15 %	
	Microwave					
Combustion	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	≈1300	760	O <sub>2</sub> 5(l/min)	C/O 97%	1-2

## 2.6 หลักการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน [16]

การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD (Hot filament chemical deposition) นั้นจะอาศัยหลักการพื้นฐานหลักคือ การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม ในระบบการสังเคราะห์จะต้องมีอะตอมของไฮโดรเจน มีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุมูลของคาร์บอน โดยจำเป็นต้องควบคุมเงื่อนไขในการสังเคราะห์ให้เหมาะสม ซึ่งกลไกการเกิดเพชรจากวิธี HFCVD (Hot filament chemical deposition) นั้นประกอบไปด้วยกระบวนการต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อให้ให้อนุมูลของคาร์บอนอยู่ในสภาวะแอคทีฟ เกิดสถานะนิวคลีเอชันหรือการก่อตัวเริ่มต้นเกิดเป็นผลึกเพชร เพชรที่สังเคราะห์ได้มีอัตราการเกิดสูง และมีคุณภาพที่ดี หากขาดข้อใดข้อหนึ่งไปสิ่งที่สังเคราะห์ได้นั้นอาจจะไม่เพชร ซึ่งอาจจะเป็นแกรไฟต์ อัญมณีคาร์บอน หรือ Diamond-like carbon (DLC) การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD (Hot filament chemical deposition) นั้นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ความดัน และอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ เป็นวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ เนื่องจากวิธีการในการสังเคราะห์ง่าย ชับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.3



### รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD (Hot filament chemical deposition)

ในทางปฏิบัตินั้น การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อนประกอบด้วยหลักการที่สำคัญ 5 ประการ คือ

1) ก๊าซในระบบนั้นต้องประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน เช่น พวกไฮโดรคาร์บอน จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ยังพบว่าสามารถใช้แหล่งจ่ายที่เป็นไฮโดรคาร์บอนนอกเหนือจากที่ได้กล่าวมาจากการทดลองที่ประสบความสำเร็จ เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน รวมไปถึงไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยออกซิเจน เช่น เอทานอล และอะซิโตน และการเติมอะตอมสารเจือด้วย โบรอน ไตรออกไซด์ และ ฟอสฟอรัส เพนตะออกไซด์ เป็นต้น

2) ก๊าซเฟสนั้นจะถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง หรือกระตุ้นด้วยพลาสมาซึ่งบางครั้งอาจจะต้องใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน โดยในวิธี Hot filament พบว่าการแยกอะตอมไฮโดรเจนออกจากก๊าซไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย โดยการผ่านก๊าซไฮโดรเจนไปยังขดลวดความถี่สูง เช่น ทังสเตน ซึ่งจ่ายกระแสให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 1,800 ถึง 2,300 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจนขึ้นในบรรยากาศของไฮโดรคาร์บอน พบว่า สามารถเคลือบเพชรลงบนฐานรองได้ ในขณะเดียวกันยังส่งผลทำให้การก่อตัวของแกรไฟต์ลดลง

3) สำหรับในระบบที่สังเคราะห์นั้นจะต้องมีความเข้มข้นของอะตอมที่เป็นตัวป้องกันการเกิดแกรไฟต์มากพอ หรือ การลดความเข้มข้นของภาวะก๊าซที่มีผลทำให้เกิดแกรไฟต์ขึ้น โดยปกติจะใช้ไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมีอะตอมที่สามารถเป็นตัวป้องกันได้ เช่น  $O_2$ ,  $F_2$  หรือ  $OH$

4) วัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรองมีความสำคัญและยังส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติเพชรได้

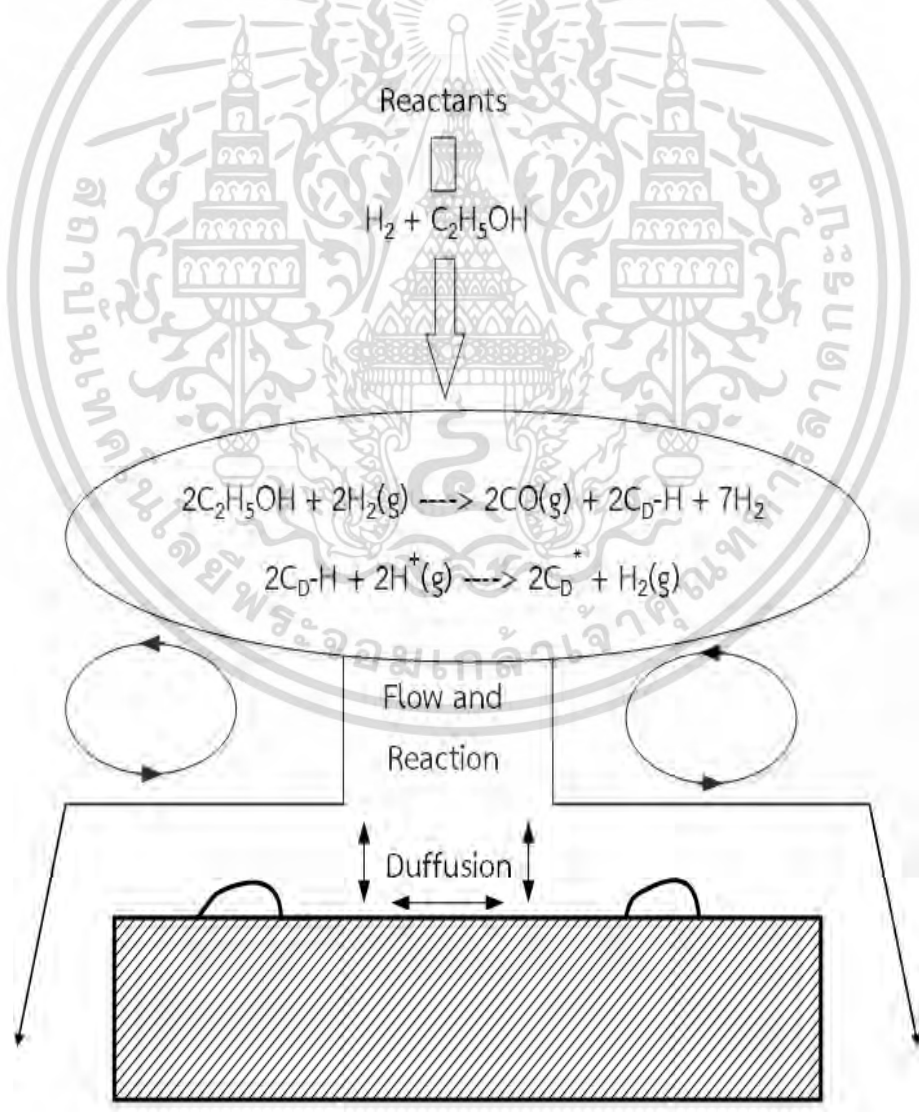
สังเคราะห์ จึงต้องทำการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง เพื่อรองรับการเกิดนิวคลีโอซัน และการปลูกผลึก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเพชรจากไอเฟส นอกจากนี้ พื้นผิวของฐานรองต้องรองรับการก่อตัวของเพชรเฉพาะบนพื้นผิว โดยมีข้อจำกัดของการแพร่ของอะตอมคาร์บอนลงบนเนื้อวัสดุของฐานรอง

5) สำหรับกระบวนการสร้างนั้นจะต้องมีแรงที่สามารถทำให้อะตอมคาร์บอนจากก๊าซเฟสไปยังบริเวณพื้นผิวของฐานรอง สำหรับกระบวนการสร้างด้วยวิธีการ CVD ส่วนใหญ่ แรงที่ใช้ขับเคลื่อนอะตอมคาร์บอนจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ เนื่องจากบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวของฐานรอง อย่างไรก็ตามอาจใช้วิธีง่ายๆโดยการเป่าก๊าซเฟสไปยังพื้นผิวของฐานรอง

### 2.7 กระบวนการของก๊าซเฟส [16]

ในกระบวนการสังเคราะห์เพชรนั้นมีหลักการพื้นฐานในการกระตุ้นก๊าซด้วยพลังงานสถานะสูงซึ่งวัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้ คือ การทำให้ก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวเป็นโมเลกุล เพื่อที่จะพร้อมสำหรับจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวบนพื้นผิวฐานรอง และการแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

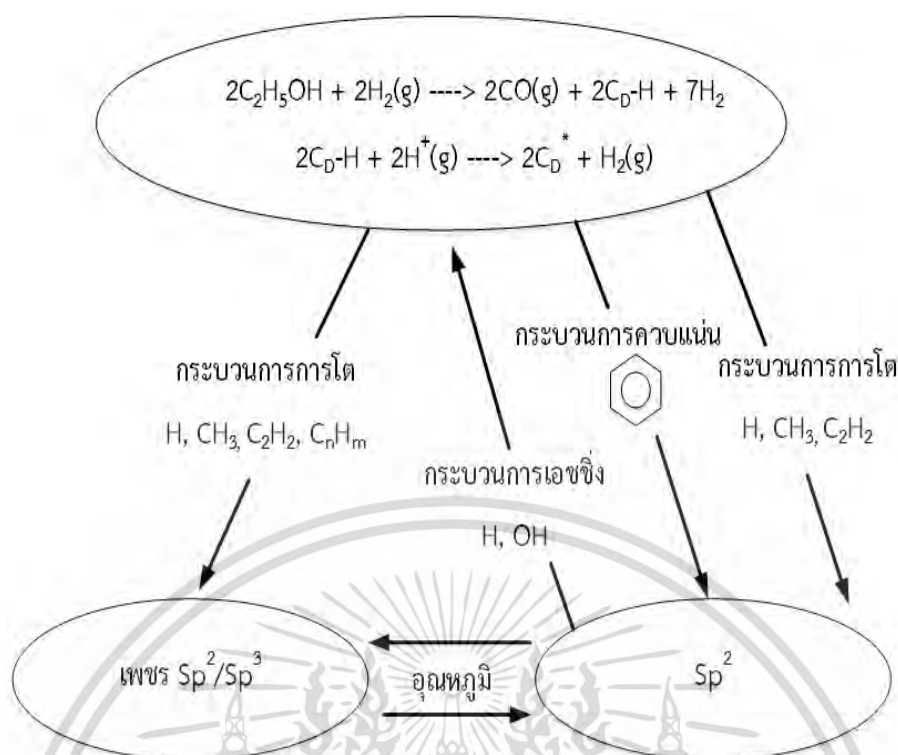


รูปที่ 2.4 กระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัตินั้นการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD แสดงดังรูปที่ 2.4 จากกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ HFCVD ใช้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เป็นรีแอกแทนท์ เมื่อทำการให้พลังงานและอุณหภูมิที่สูงกับไส้ขดลวดทั้งสแตน รีแอกแทนท์จะถูกกระตุ้น โดยสารจะถูกกระตุ้นและเกิดปฏิกิริยาเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือพลังงานสูง ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเวลาผ่านไป  $10^{-9}$  วินาที จากนั้นจะเกิดการชนกันของก๊าซภายในแชมเบอร์ใช้เวลา  $10^{-4}$  ถึง  $10$  วินาที และเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกส่งผ่านด้วยการไหล การแพร่ และถูกพาไปยังฐานรอง ที่บริเวณใกล้กับฐานรองจนเป็นความหนาซึ่งเรียกว่า ชั้นขอบเขต (Boundary Layers) จนเข้าสู่บริเวณที่มีการไหลหยุดนิ่งซึ่งเรียกว่า (Stagnation point) ซึ่งบริเวณฐานรองจะเกิดปฏิกิริยาหลายอย่างเกิดขึ้นเช่น การแพร่ที่บริเวณพื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสาร การคายความร้อน การดูดกลืนความร้อน ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นนั้นมีความสำคัญสำหรับการสังเคราะห์เพชร เป็นปัจจัยหลักในการเกิดนิเคลอซัน และการได้มาซึ่งความสมบูรณ์ของผลึกเพชร ซึ่งจะต้องควบคุมเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดเฟสของเพชรเกิดขึ้น

จากการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD นั้นคาร์บอนสามารถเกิดพันธะได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับที่เกิด Hybridization ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูง กล่าวคือในขณะที่ยังอะตอมพลังงานต่ำ (Ground state) การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนนั้นจะจัดเรียงกันเป็นแบบปกติ แต่เมื่อมีพลังงานสูงมากจะกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนในบางตัวในออร์บิทัลของ subshell ที่มีพลังงานต่ำกว่า เคลื่อนที่ไปอยู่ในออร์บิทัลของ subshell ที่มีพลังงานสูงกว่า ซึ่งต้องอยู่ในระดับพลังงานเดียวกัน จากนั้นจึงเกิดการรวมตัวกันซึ่งเรียกว่า hybridization เป็นออร์บิทัลชุดใหม่ซึ่งเรียกว่า hybride orbital โดยอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเท่ากันสังเกตได้จากจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลเดิมกับ hybride orbital จะมีจำนวนเท่ากัน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการเกิดเพชรและแกรไฟต์ ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD ที่การ Hybridization เป็นแบบ  $sp^1$   $sp^2$  และ  $sp^3$  แสดงดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงกระบวนการสังเคราะห์เพชรที่คาร์บอนสามารถเป็นได้ทั้งเพชร ( $sp^2$ ) และแกรไฟต์ ( $sp^3$ ) ซึ่งสามารถเปลี่ยนพันธะไปมาระหว่าง  $sp^2$  ไป  $sp^3$  หรือ  $sp^3$  ไป  $sp^2$  ในการกำหนดอัตราการก่อตัวคุณภาพของเพชร และการกำจัดคาร์บอนในรูปอื่นๆที่ไม่ใช่เพชร ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและปัจจัยในการสังเคราะห์เช่น อุณหภูมิ ความดัน วิธีการกระตุ้นก๊าซ และความเข้มข้นของก๊าซ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 กระบวนการการเกิดเพอร์และแกรไฟต์ในการสังเคราะห์

## 2.8 บทบาทของไฮโดรเจน

การเกิดเพอร์จากอนุกรมของคาร์บอนนั้นส่วนใหญ่มักจะพบแกรไฟต์ที่อยู่ในรูปของพันธะ  $\text{sp}^2$  อยู่เสมอ โดยอะตอมของไฮโดรเจนนั้นจะช่วยให้เกิดความเสถียรในสภาพของเพอร์มากกว่าสถานะที่เป็นแกรไฟต์ เนื่องจากสมดุลความหนาแน่นที่สูงของอะตอมไฮโดรเจนในบริเวณพื้นสัมผัสของเพอร์ มีคุณสมบัติในการกำจัด และเกิดแกรไฟต์ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพอร์นั้นจะมี Dangling bond จับตัวกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะสามารถป้องกันการเปลี่ยนพันธะจาก  $\text{sp}^3$  เป็น  $\text{sp}^2$  หรือ  $\text{sp}^1$  ถึงแม้ว่าพันธะ  $\text{sp}^3$  จะต้องใช้พลังงานสูงในการไฮบริไดเซชัน (Hybridization) เมื่อสร้างพันธะเสร็จจะคายพลังงานออกมามากกว่าที่ใช้ในการสร้างทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมอยู่ในแนวมุมของทรงสี่เหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) แต่ละไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid orbital) จะทำมุม  $109.5^\circ$  ซึ่งกันและกัน และรูปที่ 2.6 แสดงการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Promotion)



รูปที่ 2.6 การเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Promotion)

นอกจากนั้นอะตอมของไฮโดรเจนมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชรซึ่งจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวกับอะตอมคาร์บอนในพันธะ  $C_d-H$  ที่บริเวณผิวหน้าของเพชร เพื่อให้พร้อมที่จะสามารถรับอะตอมคาร์บอนตัวใหม่เพิ่มเข้ามา โดยอะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง  $C_d-H$  เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนไป จะอยู่ในรูปของพันธะ  $C_d^*$  แสดงดังสมการ



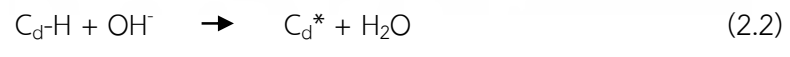
โดยที่  $C_d$  คือ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร

โดยที่  $C_d^*$  คือ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวของเพชรเมื่อถูกกระตุ้น

### 2.9 บทบาทของออกซิเจน

สำหรับบทบาทของออกซิเจนนั้นการเติมออกซิเจนเข้าไปในก๊าซที่ผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน ได้รับการรับรองจากผู้ศึกษาการสังเคราะห์เพชรหลายกลุ่ม เช่น Kawato et al. [20] ว่าทำให้เพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ และยังช่วยให้มีอัตราการเกิดดีขึ้น

ออกซิเจนมีบทบาทหลักๆ คือการช่วยให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีคุณภาพดี โดยเป็นที่เชื่อกันว่าเมื่อผ่านอนุมูลของแก๊สออกซิเจน เช่น  $O_2$ ,  $O_2^{2-}$  หรือ  $OH^-$  เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชรจะทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนโครงสร้างอื่นๆ และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น ซึ่งอนุมูล  $OH^-$  สามารถกระตุ้นอะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าแสดงดังสมการ



อย่างไรก็ตาม จากปฏิกิริยาดังสมการที่ (2) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (1) ส่วนหน้าที่อื่นๆของออกซิเจนมีผู้ที่ได้ศึกษาไว้คือ Kawato และคณะ โดยได้นำเสนอว่าออกซิเจนนั้นมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซทิลีน จากการสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกรไฟต์และอสังฐานคาร์บอน

## 2.10 ปฏิกริยาที่ไร้ผล

การแตกตัวของไฮโดรเจนบนไส้หลอดทั้งสแตนท์ที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพ โดย Langmuri เป็นคนแรกที่ค้นพบ ต่อมาจึงได้มีการนำมาใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร โดยทำเป็นเครื่องปฏิกรณ์ ชนิด Hot filament ขึ้น Jansen และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาการแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจนที่บริเวณไส้หลอด โดยอาศัยความแตกต่างของกำลังงานที่ใช้ไปโดยไส้หลอดในสถานะสุญญากาศ และในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน จากการวัดค่าของอัตราการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนพบว่า อัตราการแตกตัวขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไส้หลอดและจากการวิเคราะห์อัตราของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆอีก ตัวอย่างเช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าคงที่อัตราการแตกตัว เป็นต้น

## 2.11 ผลของอุณหภูมิฐานรอง

กระบวนการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD โดยอุณหภูมิของฐานรองมีส่วนสำคัญต่อการเกิดเพชรหลายประการ ซึ่ง Spitsyn และคณะ ได้เสนอผลการทดลองว่ามีเพชรจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฐานรองมีค่าตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียส ถึง 1,200 องศาเซลเซียส แล้วแต่วิธีการในการสังเคราะห์ หากอุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ในแก๊สผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน ผลที่ได้จะเป็น DLC เกิดขึ้นแทน และอุณหภูมิฐานรองมีค่าเกินกว่า 1,200 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะเป็นแกรไฟต์ จากนั้น Inspektor และคณะ ได้รายงานถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชรขึ้นได้ อยู่ที่ประมาณ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของ C-H-O นอกจากนี้อุณหภูมิฐานรองยังส่งผลต่ออัตราการเกิดเพชรอีกด้วย ซึ่งอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าลดลงเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส

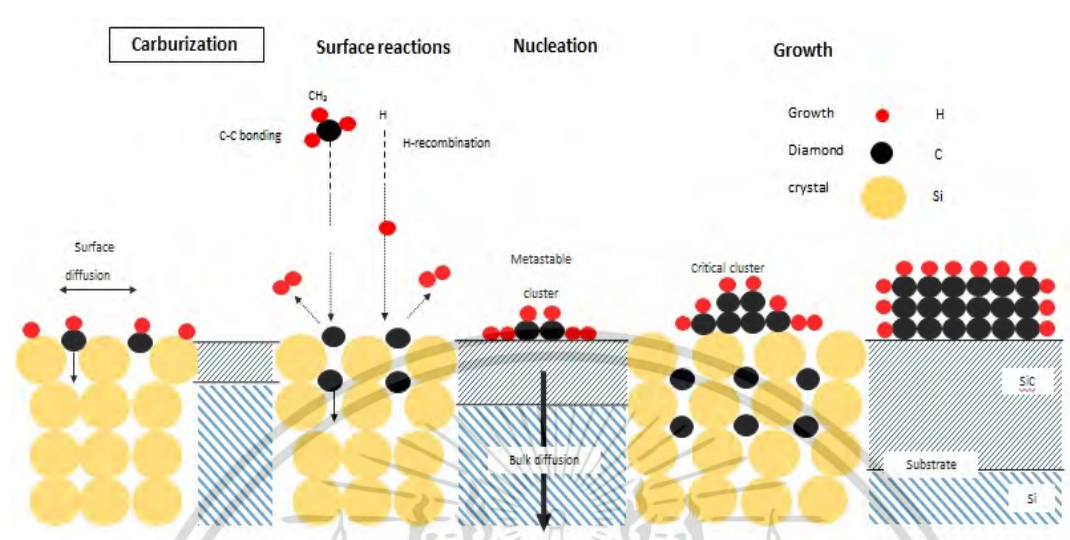
นอกจากนี้ Zhu และคณะ ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดรูปทรงต่างๆของผลึกและฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิฐานรอง อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของมีเทน มีผลอย่างยิ่งต่อการเกิดระนาบของผลึกพบว่าผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะมีการเปลี่ยนระนาบไปเมื่อเงื่อนไขเปลี่ยนไป

## 2.12 ปรากฏการณ์นิวเคลียชัน [22]

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการก๊าซเฟส เป็นกระบวนการเริ่มต้นการก่อตัวของผลึกเพชรที่บริเวณผิวหน้าฐานรอง และตามด้วยการเกิดไฮโมอิตีแพกเซียล ซึ่งการเกาะตัวของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเป็นการเพิ่มขนาดของก้อนเนื้อสาร เป็นปรากฏการณ์การสร้างนิวเคลียสเริ่มต้นโดยขนาดของนิวเคลียสต้องมีขนาดมากกว่าขนาดวิกฤต และสามารถคงอยู่และมีความเสถียรได้นานพอที่จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกขึ้น โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของอนุภาคที่ประกอบกันขึ้นจนมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบเป็นลบซึ่งทำให้สามารถเกิดกระบวนการขึ้นได้ ดังนั้นระบบนี้จะหมายถึงฐานรองของอนุภาคที่เกิดขึ้นและก๊าซเฟส ซึ่งเริ่มจากอนุภาคอิสระของก๊าซเฟสที่แพร่ไปบนพื้นผิวของฐานรองจะก่อตัวด้วยพันธะ  $sp^2$  เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวงแหวน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ; PAHs) โดยอะตอมของคาร์บอนจะแพร่ไปสู่ฐานรองจนถึงค่าๆหนึ่ง จนทำให้การแพร่ของอะตอมคาร์บอนจะไม่สามารถเกิดขึ้นอีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปนี้จะเกิดปฏิกริยากับอะตอมของฐานรองทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆ ซึ่งเรียกว่า “Intermediate Layer” เมื่ออะตอมของคาร์บอนเกาะตัวกันมากพอจะทำให้เกิดขั้นตอนการเปลี่ยนพันธะจาก  $sp^2$  ไปเป็น

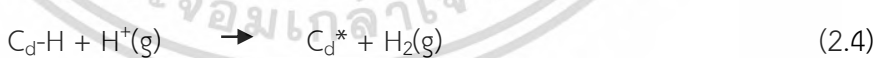
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะ  $sp^3$  ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วยในการเกิดเพชร โดยกลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง [23]

ในระหว่างการนิวคลีเอชันของเพชรที่เป็นผลมาจากการรวมตัวกันของนิวเคลียสของแกรไฟต์ ความเสถียรของนิวคลีโอไทด์ของเพชรเป็นการกำจัดคาร์บอนพันธะ  $sp^2$  ออก จะต้องมิโมเลกุลไฮโดรเจนจำนวนมากซึ่งมีความอึดตัวอย่างยิ่งยวดและมีความอึดตัวอย่างยิ่งยวดของไฮโดรเจนอะตอมจากการกระตุ้นของก๊าซเฟสด้วยขดลวดความร้อน โมเลกุลของไฮโดรเจนจะไปช่วยลดความดันย่อยของก๊าซเฟสที่จะเกิดการนิวคลีเอชันแกรไฟต์และอะตอมไฮโดรเจนอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนที่ล้อมรอบโมเลกุลของก๊าซและพื้นผิวของแข็ง เพื่อจัดตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรเจน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



หลังจากที่เกิดผลึกเพชรแล้วพื้นผิวฐานรองจะถูกปกคลุมด้วยผลึกและพอร์มตัวเป็นฟิล์มในรูปแบบต่างๆ ขนาดของผลึกและรูปร่างของผลึกถูกจำกัดด้วยผลึกซึ่งกันและกันเอง ฟิล์มในรูปแบบต่างๆ ที่ต่อเนื่องจะมีขนาดผลึกที่เล็กแต่มีความหนาแน่นสูง ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ การนิวคลีเอชันจะหยุดลงขณะที่เกิดผลึกโดยการแพร่คาร์บอนบนฐานรองหรือบนพื้นผิวของผลึกและมีการเพิ่ม Active Sites บนผลึกที่เกิดขึ้นแล้ว ผลึกบนฐานรองจากความหนาแน่นการนิวคลีเอชันที่ต่ำจะอยู่โดดเดี่ยวและมีแนวโน้มใหญ่กว่าด้วยการกระจายขนาดที่กว้างกว่า

จากดังที่กล่าวมาข้างต้นชนิดฐานรองและการเตรียมฐานรองเบื้องต้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อการนิวคลีเอชันและการก่อตัวของผลึกในขั้นแรก ทั้งฐานรองที่เป็นเพชรธรรมชาติและวัสดุที่ไม่ใช่เพชร การนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรส่วนใหญ่จะใช้การเหนี่ยวนำโดยการสร้างรอยขีดข่วนด้วยผงเอกสกรีนเป็นเอกสกรีนที่สังวันไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตไหนไปไซประโยชน์ดานการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

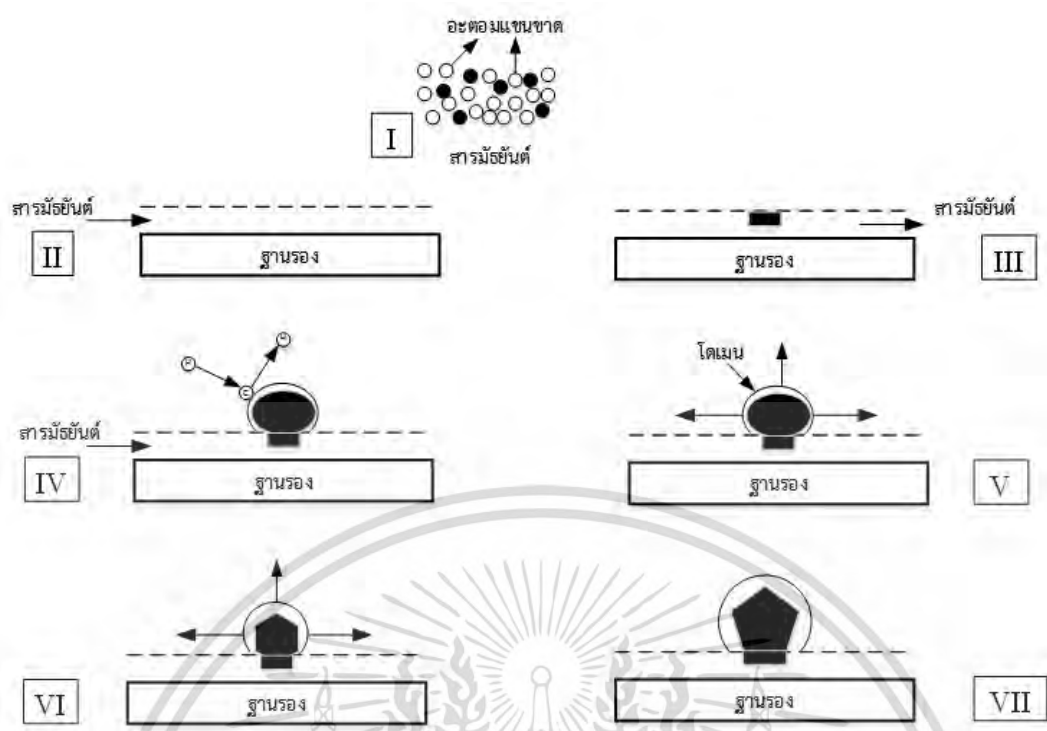
เพชร (หรือ SiC, Cubic Boron Nitride [c-BN] แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า) และบนฐานรองที่มีการฟอรมตัวของคาร์ไบด์ทำให้เกิดความหนาแน่นของการนิวคลีโอเชียนสูงสุดและอัตราการก่อตัวมากที่สุด และใช้เวลาอันน้อยขณะที่อัตราการนิวคลีโอเชียนบนฐานรองผลึกเดี่ยวต่ำกว่าฐานรองหลายรูปของ Cu, Ag, Au, Cu/Ni alloys จะเท่ากับบนออกไซด์  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยในการเกิดนิวคลีโอเชียนบนพื้นผิวฐานรองทั้งแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันและรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน จะเกิดการฟอรมตัวที่พื้นผิวฐานรองได้หลายรูปแบบ ตามตารางที่ 2.4 ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของฐานรองออกเป็น 3 ประเภทคือประเภทแรกที่เกิดปฏิกิริยากับฐานรองน้อย ประเภทที่สองอะตอมคาร์บอนสามารถแทรกเข้าไปยังเนื้อฐานรองได้ และประเภทสุดท้ายเกิดการฟอรมตัวระหว่างอะตอมคาร์บอนและฐานรอง

ตารางที่ 2.4 ชนิดของฐานรองเมื่อแบ่งตามการฟอรมตัวของชั้นอินเทอร์มีเดียท [22]

Intermediate layer	Substrate
Little or no solubility or reaction	Diamond, graphite, carbons, Cu, Ag, Au, Sn, Pb, etc.
C-diffusion only, C dissolves in MeC mixed crystal	Pt, Pd, Rh, etc.
Carbide formation - Metallic - Covalent - Ionic	Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Ni (metastable) B, Si, etc. Al, Y, rare earth metals, etc.

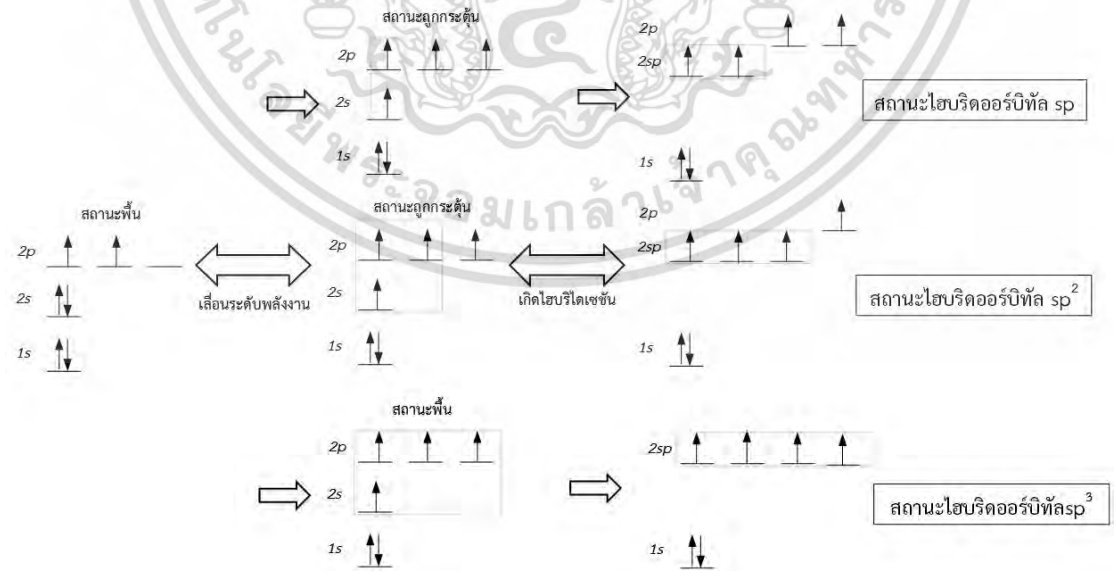
จากการศึกษาด้วยเทคนิค HR-TEM (High-Resolution Transmission Electron Microscope) พบว่า Diamond nanocrystallines ถูกเปลี่ยนโดยตรง a-C ไปเป็นเพชร ดังรูปที่ 2.8 พบว่าการนิวคลีโอเชียนเริ่มจากชั้นตอนดังนี้

1. Carbon clusters เกิดขึ้นที่บริเวณฐานรองและเปลี่ยนโครงสร้างพันธะจาก  $sp^1$  ไปเป็น  $sp^2$



รูปที่ 2.8 การเกิดนิวคลีเอชันบนชั้นอินเตอร์มีเดียท

2. อะตอมของคาร์บอนจะจับกับพันธะกันเป็นโครงข่ายที่เสถียรของคาร์บอน พันธะ  $sp^3$  คือ Molecular rain ของไฮโดรคาร์บอนอย่างต่อเนื่องถูกกระตุ้นบนพื้นฐานรองเพื่อทำให้มีพลังงานที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนจาก  $sp^1 \rightarrow sp^2 \rightarrow sp^3$  เกิดการโปรโมชันของพลังงาน และการไฮบริดเซชัน เกิดเป็นรูปร่างดังรูปที่ 2.9 ในขณะที่เดียวกันเฟสที่ไม่เสถียร ( $sp^1$  และ  $sp^2$ ) ถูกกัดได้เร็วกว่าเฟสที่เสถียร ( $sp^3$ ) ถึง 10 เท่า



รูปที่ 2.9 ระดับพลังงานออร์บิทัลและการจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Transition ของสภาวะการยึดเหนี่ยวในโครงข่ายคาร์บอนเริ่มจาก Disordered domain ที่คาร์บอนเป็นพันธะ  $sp^3$  กลายเป็นคาร์บอนที่มีพันธะ(เพชร)  $sp^3$  เช่นเดียวกัน การเกิดผลึกในชั้น อสัณฐานเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดเช่น การจับตัวของไฮโดรเจน การลดการดูดซับไฮโดรเจนเป็น สารเชิงซ้อน การรวมตัวของอะตอมไฮโดรเจนและอื่นๆระหว่างการเกิดผลึกอะตอมคาร์บอนจะจัดตัว ใหม่เพื่อให้อยู่ในระนาบ (111) เพื่อให้มีพลังงานพื้นผิวน้อยที่สุด โดยบริเวณที่ผลึกจะกระทำตัวเป็นนิ วคลีโอไทด์เพื่อเกิดเป็นเพชร

4. เกิดการก่อตัวของเพชรเกิดขึ้น อะตอมคาร์บอนถูกเพิ่มเข้าสู่พื้นผิวโดยกระบวนการแพร่ รุปร่างของเพชรจะเริ่มต้นเป็นครึ่งวงกลม

5. Microcrystal ของเพชรที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดถึงขนาดวิกฤต

6. เกิดรูปร่างหน้าผลึกเกิดขึ้น

7. เกิดการนิวคลีโอเซชันลำดับที่สองเป็นเหตุให้เกิดความแกว่งของความเข้มข้นบนพื้นผิวของผลึก เพชร เมื่อความหนาของโดเมนเปลี่ยนจนเกิน 15 นาโนเมตรซึ่งเป็นพลังงานความร้อนหรือเวลาที่ เพียงพอสำหรับอะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าสู่ผลึกเพชร ซึ่งทำให้เกิดการนิวคลีโอเซชันลำดับที่สองบน พื้นผิว

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์นิวคลีโอเซชันโดยคำนึงถึงอิทธิพลของฐานรองจะประกอบด้วย 2 ชั้นตอน ซึ่งชั้นตอนแรกเมื่ออะตอมคาร์บอนจากแก๊สเฟสตกกระทบบนฐานรองและเกิดการแพร่เข้าไป ในเนื้อของฐานรอง อัตราการแพร่ของคาร์บอนลงไปเนื้อสารจะค่อยๆลดลง เมื่อมีการฟอร์มตัวของ ชั้นคาร์ไบด์ขึ้นจนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และมีความเข้มข้นของคาร์บอน มากพอบริเวณผิวของฐานรอง ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นตอนที่สองขึ้น โดยที่ภาวะนี้นิวเคลียสเริ่ม ที่จะมีความเสถียร การนิวคลีโอเซชันในชั้นตอนนี้สามารถเกิดได้หลายทิศทางขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวที่ เตรียมและเม็ดเพชร ฐานรองที่ไม่มีรอยขีดข่วนการนิวคลีโอเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีการอ้อมตัวของคาร์บอน ที่พื้นผิว แต่ฐานรองที่ขีดข่วนด้วยเพชรคาร์บอนจะแพร่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของบริเวณนิวคลีโอเซชัน

## 2.13 กระบวนการโต [24]

หลังจากการนิวคลีโอเซชันบนฐานรองในการสังเคราะห์เพชรแล้วนั้น จะเกิดปรากฏการณ์ตามมาคือ การโต (Growth) ซึ่งการเกิดและการโตขึ้นของผลึกเพชรที่เกิดอย่างต่อเนื่องจนทำให้ได้ชั้นไฮโมอิกพีแทก เซียลเกิดขึ้น โดยมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางไดนามิกส์ของพื้นผิวเพชรที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมของ การโตนั้นเป็นกุญแจสำคัญในการสร้างความเข้าใจ สำหรับกระบวนการ CVD ซึ่งในการสังเคราะห์ เพชรส่วนใหญ่จะมีตัวทำปฏิกิริยาเพียงคาร์บอนและไฮโดรเจน (บางครั้งมีก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน) แรงดันการทำงานอยู่ในช่วงความดันบรรยากาศสำหรับเทคนิค Plasma jet และ Combustion torches จนถึง  $10^{-2}$  ทอร์ สำหรับ ECR และระดับความดันปานกลางขนาด 1-100 ทอร์ สำหรับเทคนิค RF, DC plasma หรือใส่หลอดร้อนและการศึกษาพื้นผิวเพชรส่วนใหญ่จะเป็น การศึกษาพื้นผิวระนาบ (100) และ (111) ที่มีปลายพันธะเป็นไฮโดรเจน ที่มีการไฮบริดเซชันคาร์บอน แบบ  $sp^3$  ซึ่งพบว่าพื้นผิว (111) จะเกิดอุณหภูมิสูงกว่า 950 องศาเซลเซียส และ (100) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์สิ่งแวดล้อมในกระบวนการก่อตัวของเพชรในกระบวนการ CVD เพื่อสร้างความเข้าใจกลไกพื้นฐานในการนำเข้ามาซึ่งการเลือกเงื่อนไขเฉพาะที่เหมาะสม

สามารถแบ่งเทคนิคการวิเคราะห์เป็น 2 แบบ คือ In situ และ Ex situ  
 เทคนิค In situ เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติโดยตรง เช่น สารที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ หรือ  
 อุณหภูมิ ส่วนเทคนิค Ex situ เป็นการจำลองแบบจำลองในการวิเคราะห์ที่ขึ้นมาเพื่อย้อนกลับไปสู่  
 เงื่อนไขการเกิดที่แน่นอน

จากการวิเคราะห์เทคนิค In situ พบว่าสิ่งแวดล้อมในการเกิดเพชรนั้นประกอบด้วย  $H_2$ ,  $CH_4$   
 และก๊าซหายาก ใช้เทคนิค Optical Emission Spectroscopy (OES) วัดการปลดปล่อยจากสภาวะ  
 กระตุ้นทางอิเล็กทรอนิกส์ของ C,  $C_2$ , H, CH,  $CH_2$ , และสำหรับ  $H_2$  ใช้เทคนิค Absorption  
 spectroscopy ของเลเซอร์ไดโอดชนิดอินฟราเรดในการวิเคราะห์ก๊าซที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมระหว่างการ  
 สังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD และใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy  
 ในไมโครพลาสมา และในส่วนของเทคนิค Ex situ ใช้ Mass spectroscopy กับวิธี HFCVD ซึ่งเป็  
 นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปมาของ  $CH_4$  หรือ  $C_2H_2$  ไปสู่  $CH_4$  และ  $C_2H_2$  สิ่งที่สำคัญคืออัตราส่วนของ  
 $CH_4$  ต่อ  $C_2H_2$  ในก๊าซที่ปล่อยทิ้งออกมาจากระบบ ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิไส้หลอด ความเข้มข้น  
 ของไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบที่พื้นผิวไส้หลอด โดยสารหลักๆที่วัดได้ในบรรยากาศในกระบวน  
 การโตของเพชรคือ ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนเช่น  $H_2$ , H,  $CH_4$ ,  $CH_3$ ,  $C_2H_2$ , และ  $C_2H_4$  สำหรับ  
 ระบบที่มีออกซิเจนหรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนผสมอยู่ในระบบจะพบ CO,  $H_2O$ , และ OH  
 จากการทดลองยังพบว่าอนุภาคอิสระของ  $CH_3$  เป็นสารหลักในกระบวนการผลิต

โดยมีการทำแบบจำลอง 3 แบบ ในการคำนวณที่นำไปประยุกต์ใช้กับบรรยากาศของก๊าซในการ  
 สังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD รวมถึงการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ภาวะสมดุลซึ่งปรับปรุงขึ้นเพื่อ  
 ใช้ประโยชน์ในการหาปริมาณของก๊าซที่ซับซ้อน และแบบจำลองทางจลพลศาสตร์ใน 1 มิติ ที่สามารถ  
 ใช้ยืนยันว่าสารคาร์บอนหลักในการก่อตัวของเพชรคือ  $CH_4$ ,  $CH_3$ ,  $C_2H_2$ , และ  $C_2H_4$  โดยแบบจำลอง  
 เชิงจำนวนซึ่งถูกประยุกต์ใช้รวมกับการส่งผ่านของไหลและจลพลศาสตร์ของก๊าซใช้เพื่อทำนายในเชิง  
 ปริมาณสำหรับการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง และเสนอว่าการแพร่เป็นกลไกสำคัญสำหรับ  
 สารที่มีน้ำหนักเบา เช่น อะตอมไฮโดรเจน

แบบจำลองการโตของเพชร[3] จะใช้สมดุลไดนามิกส์เป็นแบบจำลองแรกที่ใช้ในการอธิบายการ  
 เกิดเพชร โดยสมมติให้แกรไฟต์หรือคาร์บอนรูปอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับการก่อตัวจากสารละลายของก๊าซที่อิม  
 ไปด้วยคาร์บอนและอะตอมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิการเกิดของรูานรอง โดยการก่อตัวและการกัดของ  
 คาร์บอนสำหรับแต่ละรูปแบบของคาร์บอนที่เป็นของแข็งจะอยู่ในสมดุลไดนามิกส์

การอิมตัวของคาร์บอนนั้นจะเป็นแรงขับที่ทำให้เกิดการควบแน่นของคาร์บอนในหลายรูปแบบ  
 รวมทั้งเพชรด้วย ขณะที่อะตอมไฮโดรเจนในบรรยากาศจะช่วยเปลี่ยนคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชรโดยการกัด  
 และเปลี่ยนรูปพื้นผิวจากพันธะ  $sp^2$  ไปสู่  $sp^3$  ซึ่งอัตราการก่อตัว ความเข้มข้นของส่วนที่ไม่ใช่เพชร  
 และจุดบกพร่องของผลึกจะสูงเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น แบบจำลองนี้ได้นำเสนอว่า  
 OH หรือ ฮาโลเจนที่เติมเข้าไปจะทำให้เพชรมีคุณภาพสูงขึ้น

นอกจากนี้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ยังช่วยอธิบายเกี่ยวกับสมดุลสำหรับพื้นที่ผิว  
 คาร์บอนของแข็ง และสปีชีส์ที่เป็นไอ ทำให้ทราบวถึงเกิดการกระตุ้นอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนที่  
 บริเวณใกล้กับขดลวดความร้อนของ HFCVD และสำหรับพื้นผิวเพชรที่มีปลายพันธะเป็นไฮโดรเจนจะ  
 มีพลังงานต่ำกว่าพื้นผิวที่เป็นแกรไฟต์ ดังนั้นการเกิดเพชรจึงประกอบด้วยเทอร์โมไดนามิกส์ที่ไม่สมดุล  
 เมื่อใช้การคำนวณทางควอนตัมเคมีแบบ Semi-empirical ต่อการเกิดพื้นที่ผิวระนาบ (111) พบว่า  
 อะเซทิลีนเป็นสปีชีส์หลักสำหรับกลไกการเกิดและยังเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนหลังจากปฏิกิริยาดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

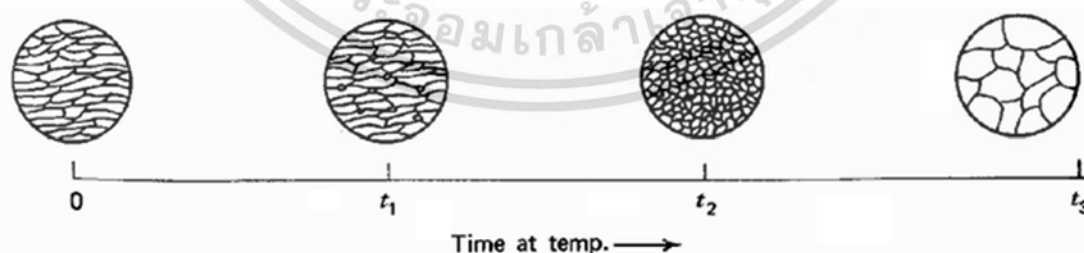
ความร้อนในการจับกับไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) ในช่วงแรก สำหรับการเกิดเพชรระนาบ (100) อนุภาคของเมทิลที่เป็นกลางนั้นเป็นสปีชีส์หลักสำหรับการเกิด แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถรู้เรื่องเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวการเกิด จึงมีข้อตกลงในการสังเกตซึ่งรวมไปถึงความเข้มข้นของสปีชีส์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมการเกิด เช่น อุณหภูมิฐานรองและ อัตราการเกิด ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และคุณภาพของวัสดุ อธิบายดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ บริเวณพื้นผิวการเกิดเพชรซึ่งจะจับกับอะตอมไฮโดรเจนจะต่ำด้วย
2. เกิดการเกิดด้วยอนุมูลทั้ง  $\text{CH}_3$  และ  $\text{C}_2\text{H}_2$  โดย  $\text{C}_2\text{H}_2$  เป็นสปีชีส์หลักต่อการเกิดพื้นผิว (111) อย่างไรก็ตามบทบาทที่สำคัญของ  $\text{C}_2\text{H}_2$  ที่พื้นผิว
3. การควบแน่นเบนซินบนพื้นผิวการเกิดที่อุณหภูมิฐานรองต่ำเป็นผลให้เกิดการก่อตัวของสัณฐานคาร์บอน
4. โมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนมีรูปแบบเป็น Polycyclic aromatics ในแก๊สเฟส
5. สปีชีส์ของคาร์บอน  $\text{sp}^2$  เป็นแก๊สที่มีความไวต่ออนุมูล OH มากกว่าอะตอมไฮโดรเจน

## 2.14 การแอนนیل (Annealing) [25]

การแอนนیلเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้ Lattice ที่บิดเบี้ยวไปหลังจากการทำงานในภาวะเย็นหรือร้อนกลับคืนสู่สภาพเดิมมาอยู่ในภาวะปลอดความเครียดเหลือค่างจนหมดที่อุณหภูมิหนึ่ง การแอนนิลสามารถแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ Recovery, Recrystallization และ Grain growth อธิบายรายละเอียดดังนี้

Recovery อาจจะแปลความหมายที่เข้าใจง่าย ๆ ว่าเป็นการอบคลายตัว ซึ่งเป็นวิธีทางความร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเกิดขึ้นโดยไม่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค เป็นภาวะที่วัสดุสารมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลเล็กน้อย (ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) โดยเป็นภาวะที่ลดความเข้มข้นของข้อบกพร่องแบบจุดภายในเกรน สภาวะที่ยอมให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ไปยังจุดที่พลังงานต่ำกว่า และยังสามารถชดเชยการลดลงของสิ่งเหล่านี้ด้วยการฟอร์มตัวของ Subgrains ซึ่งเป็นเกรนที่มีขอบเขตมุมที่มีค่าน้อยๆ (ประมาณ 2-3 องศา ของมุมที่มีการจัดเรียงตัวผิดไป) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สภาวะ Recovery และการจัดเรียงตัวของเกรนเริ่มต้นระหว่าง Recovery

เมื่อกระบวนการ Recovery สิ้นสุดลง กระบวนการต่อไปคือ Recrystallization stage ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของนิวคลีโอไซด์ของเกรนใหม่เริ่มต้นขึ้นที่ขอบเกรนเดิม เป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงการเริ่มต้นของสภาวะการเกิดผลึกใหม่ โดยขนาดเกรนของผลึกที่จัดเรียงตัวใหม่นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกรนที่ผิดเพี้ยนไป เช่น เวลาในการแอนนีส อุนทุมิกการแอนนีส และส่วนประกอบภายในเนื้อสารเอง โดยปกติแล้วนั้นอุนทุมิกที่ทำให้เกิดความคล่องตัวของอะตอมเพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลได้จะมีค่าประมาณหนึ่งในสามถึงครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวสัมบูรณ์ (Absolute melting point) โดยโครงสร้างในระดับจุลภาคของสภาวะนี้ ในช่วงแรกเกรนที่ไม่มีความเค้นจะเกิดขึ้นที่ขอบเขตของเกรนเดิม และจะโตขึ้นจนระบบเสถียร ความเข้มข้นของเกรนใหม่จะเพิ่มขึ้น

Grain growth เริ่มขึ้นเมื่อการจัดเรียงผลึกเริ่มต้นสมบูรณ์ พลังงานที่ร่อยต่อระหว่างเกรนจะน้อยที่สุด ทำให้เป็นสภาวะที่ระบบมีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งสภาวะนี้ดูคล้ายกับว่าเป็นสภาวะที่พยายามลดพื้นที่ผิวของเกรนรวมลงอีกด้วย

## 2.15 สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค

### 2.15.1 อะตอมสารเจือ [14]

คุณสมบัติของการเติมอะตอมสารเจือด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยนั้น ซึ่งจะทำให้ความนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอีกแบบที่วัสดุตัวนำไม่สามารถทำได้ เช่น ทองแดง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในทองแดงนั้นมีสูงมากอยู่แล้ว การที่จะเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขึ้นไปอีกนั้นค่อนข้างยาก เนื่องจากการเติมอะตอมสารเจือเพียงเล็กน้อยนั้น จะไม่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นคุณสมบัติพิเศษของสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ในส่วนของสารกึ่งตัวนำประเภทเดียวกันนั้น อะตอมสารเจือคืออะตอมของธาตุที่อยู่ในหมู่ 3 และหมู่ 5 ในตารางพีริออดิกของธาตุ ใช้ในการเติมลงไปผลึกสารกึ่งตัวนำทำให้ได้ชนิดของพาหะ เช่น โฮลหรืออิเล็กตรอน และสามารถคำนวณปริมาณของพาหะได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เรียกว่า การโด๊ป โดยในการที่จะเติมอะตอมสารเจือนั้นอะตอมที่นำมาจะต้องมีขนาด และคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำนั้นๆซึ่งจะไม่ทำให้โครงสร้างของผลึกของสารนั้นเกิดการเสียหายได้ โดยสามารถแบ่งอะตอมสารเจือเป็น 2 ชนิดได้คือ

### 2.15.2 อะตอมสารเจือชนิดเอ็น [14]

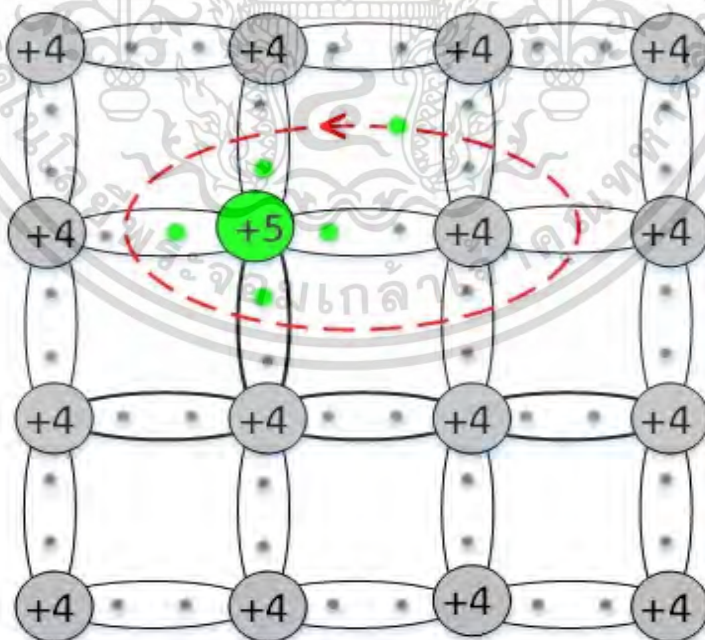
คืออะตอมสารเจือที่อยู่ในหมู่ 5 ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส สารหนู พลวง และบิสมัท โดยอะตอมของธาตุในหมู่ 5 นี้จะมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์อยู่ 5 อิเล็กตรอน เมื่อเติมลงในผลึกสารกึ่งตัวนำที่มี 4 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ ทำให้การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมสารเจือ และอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นจะเกาะเกี่ยวกันแค่ 4 พันธะ ซึ่งจะมีอิเล็กตรอนของอะตอมสารกึ่งตัวนำตัวที่ 5 เหลืออยู่ และมีสภาพเกือบอิสระ มีแรงยึดเหนี่ยวจากอะตอมเพียงเล็กน้อย ที่อุนทุมิกห้องเมื่อได้รับพลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ อิเล็กตรอนนี้ก็จะหลุดออกจากอะตอมสารเจือไปเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและอยู่ในแถบนำไฟฟ้าเรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า การไอออไนซ์ของอะตอมสารเจือ ซึ่งทำให้อะตอมสารเจือที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปนั้นจึงกลายเป็นไอออนบวก อะตอมสารเจือจึงกลายเป็นอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้า เรียกว่า อะตอมผู้ให้ แต่ละอะตอมผู้ให้ นั้นจะให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าหนึ่งอิเล็กตรอนซึ่งไม่มีโฮลเกิดขึ้นทำให้สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้ นั้นมีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากและเป็นตัวหลักในการนำไฟฟ้า

### 2.15.3 อะตอมสารเจือชนิดพี [14]

คืออะตอมของธาตุที่อยู่ในหมู่ 3 ของตารางพีรีออดิกของธาตุ เช่น โบรอน อะลูมิเนียม อินเดียม และแกลเลียม ซึ่งอะตอมของธาตุในหมู่ที่ 3 นี้จะมี 3 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ และเมื่อทำการเติมลงในสารกึ่งตัวนำที่แต่ละอะตอมมี 4 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ กล่าวคือจะมีพันธะที่สมบูรณ์เกิดขึ้นเพียง 3 พันธะ ทำให้มีพันธะทำให้มีพันธะที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากขาดอีก 1 อิเล็กตรอนเกิดขึ้นเป็นพันธะที่ว่างหรือมีที่ว่าง ซึ่งสามารถที่จะรับอิเล็กตรอนเข้ามาได้อีกหนึ่งอิเล็กตรอนทำให้อะตอมนี้จึงมีหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากพันธะโควาเลนซ์ข้างเคียงเพื่อที่จะทำให้พันธะสมบูรณ์ ซึ่งพันธะโควาเลนซ์ที่อิเล็กตรอนออกไปนั้นจะทำให้โฮลเกิดขึ้น จึงเรียกอะตอมสารเจือนี้ว่าอะตอมผู้รับ การรับอิเล็กตรอนนี้ก็คือการเกิดไอออนลบของอะตอมผู้รับปลดปล่อยโฮล เมื่อไอออนลบแล้วอะตอมสารเจือนั้นจะเป็นไอออนลบ ดังนั้นแต่ละอะตอมของสารเจือชนิดนี้จะให้โฮล 1 โฮลไม่มีอิเล็กตรอนนำพา จึงทำให้มีโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โดยสารกึ่งตัวนำชนิดนี้จะมีโฮลเป็นตัวนำไฟฟ้า

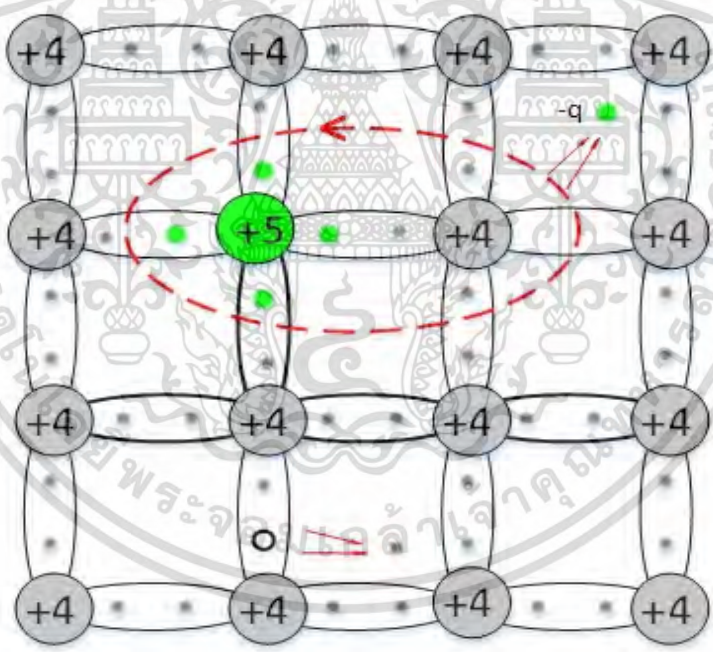
### 2.15.4 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ฟอสฟอรัส อะตอมสารเจือชนิดเอ็นหรืออะตอมผู้ให้ นั้นจะมี 5 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ เมื่อเติมลงไปผลึกสารกึ่งตัวนำที่แต่ละอะตอมมี 4 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ซึ่งจะเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ 4 พันธะกับอะตอมสารกึ่งตัวนำข้างเคียง 4 อะตอมโดยอิเล็กตรอนตัวที่ 5 จะโคจรอยู่ห่างๆรอบนิวเคลียสของอะตอมผู้ให้แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งไม่มีพันธะโควาเลนซ์มีคุณสมบัติกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ไม่มีพลังงานจากความร้อนมากกระตุ้นก็จะยังโคจรรอบๆอะตอมผู้ให้



รูปที่ 2.11 แผนภาพการก่อเกี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนและอะตอมฟอสฟอรัส

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้นที่ 0 เคลวิน พลังงานความร้อนจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งอิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของอะตอมสารเจือผู้รับจะโคจรรอบๆ ยังไม่สามารถหลุดเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ แต่เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 0 เคลวิน ทำให้มีพลังงานความร้อนมากระตุ้นอิเล็กตรอนตัวที่ 5 หลุดออกจาก การโคจรรอบๆอะตอมผู้ให้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่มีสถานะนำไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.12 และที่ อุณหภูมิที่ไม่สูงมากเช่นที่ 100 เคลวิน พลังงานความร้อนจะทำให้อะตอมผู้ให้แค่บางส่วนเกิดไอออนซ์ กลายเป็นไอออนบวกหรือเรียกว่า ไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกโดย ไม่มีโฮลเกิดขึ้นเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า แต่เมื่อที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง 300 เคลวิน ทำให้ มีพลังงานความร้อนกระตุ้นที่มากพอส่งผลให้อะตอมผู้รับเกือบทุกอะตอมเกิดการไอออนซ์อย่าง สมบูรณ์ และที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 0 เคลวิน นั้นนอกจากจะมีการไอออนซ์ของอะตอมสารเจือผู้ให้และ ยังมีการไอออนซ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำในบางส่วนอีกด้วย ซึ่งทำให้ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮล (E.H.P) มี การไอออนซ์จำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับการไอออนซ์ของอะตอมสารเจือผู้ให้เพราะต้องใช้พลังงาน มากในการกระตุ้นสูงไม่น้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน โดยที่อุณหภูมิห้องความหนาแน่นของ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจะมีมากกว่าความหนาแน่นโฮล เนื่องจากการไอออนซ์อะตอมสารเจือผู้ให้ทำให้ เกิดอิเล็กตรอนอิสระเท่ากันโดยไม่มีโฮลเกิดขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจึงเป็นพาหะ ส่วนมากและเป็นหลักในการนำไฟฟ้า



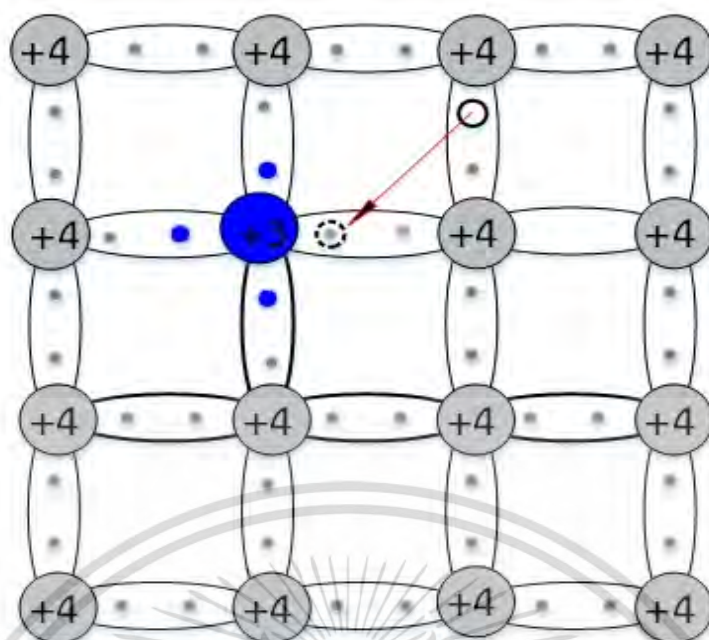
รูปที่ 2.12 แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน

2.15.5 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี โดอนอะตอมโบรอนเป็นอะตอมที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยอะตอมสารเจือผู้รับนี้แต่ละอะตอมจะมี 3 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ ซึ่งเมื่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำแล้วนั้นจะเกิดการเกาะเกี่ยวกับอะตอมสารกึ่งตัวนำข้างเคียงเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ที่สมบูรณ์ 3 พันธะ อีกหนึ่งพันธะนั้นจะไม่สมบูรณ์เพราะขาดอิเล็กตรอนอีก 1 อิเล็กตรอน โดยรูปที่ 2.13 แสดงแบบจำลองของผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โดยอะตอมสารเจือผู้รับจะทำให้เกิดระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.14 แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรและวิธีการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) โดยผลึกเพชรชนิดพีนั้นได้ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน ด้วยสารประกอบโบรอนไตรออกไซด์ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนที่ค่าความเข้มข้น 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ในส่วนของผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นทำการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ด้วยสารประกอบฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนที่ค่าความเข้มข้น 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ

การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นนั้นได้เลือกใช้ฐานรองซิลิคอนที่ทำการเตรียมผิวหน้าสองชนิดด้วยกันคือ ชนิดแรกใช้ในการสังเคราะห์ผลึกเพชรโดยทำการเตรียมผิวหน้าด้วยการกรีดให้เป็นร่องในลักษณะของตาราง และชนิดที่สองเป็นชนิดขัดมันใช้ในการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดของผลึก ทำการทดลองสังเคราะห์ให้เกิดเป็นผลึกเพชรโดยใช้ฐานรองชนิดแรก สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมง พร้อมกับทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึกด้วยวิธีการแอนนیل ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที ทุกๆ 12 ชั่วโมง ระหว่างการสังเคราะห์ เมื่อสังเคราะห์ครบตามเวลาที่กำหนดแล้วนำผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นไปวิเคราะห์เพื่อยืนยันคุณสมบัติความเป็นเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

จากนั้นจึงทำการคัดเลือกผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่มีลักษณะผลึกขนาดใหญ่ที่สุดในแต่ละเงื่อนไขนำไปสังเคราะห์ต่อโดยใช้ฐานรองชนิดขัดมันซึ่งเหมาะสำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรในขั้นตอนการเพิ่มขนาดของผลึก ทำการสังเคราะห์ต่ออีก 180 ชั่วโมง พร้อมกับทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึกด้วยวิธีการแอนนیل ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที ทุกๆ 12 ชั่วโมงระหว่างการสังเคราะห์

เมื่อทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดของผลึกชนิดพีและชนิดเอ็นรวมเป็นระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง จึงนำไปวิเคราะห์เพื่อยืนยันคุณสมบัติความเป็นเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy และนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) อีกครั้ง และทำการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray (EDX) วิเคราะห์ชนิดของพาหะส่วนมากด้วยวิธี Hot-point probe และวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานของผลึกเพชร

### 3.1 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD

#### 3.1.1 การเตรียมฐานรองในการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้ฐานรองซิลิกอน (Si) เป็นวัสดุฐานรองในการสังเคราะห์ผลึกเพชร ซึ่งเริ่มจากการทำความสะอาดฐานรองตามกระบวนการดังนี้

1. เริ่มจากทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนฐานรองด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)
2. นำกรดไฮโดรฟลูออริกกัดผิวหน้า (HF 5%) เพื่อกำจัดออกไซด์ที่เกิดบนบริเวณผิวหน้าฐานรองเป็นเวลา 2 นาที
3. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI)
4. กำจัดเศษโลหะบริเวณผิวหน้าฐานรองออกด้วยการต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI)
6. นำไปต้มด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI) เป็นเวลา 5 นาที และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI) จากนั้นเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )
7. ทำการกำจัดคราบไขมันบริเวณผิวหน้าฐานรองด้วยการต้มไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
8. ล้างออกด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) เป็นเวลา 3 นาที
9. ล้างออกด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI) และเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )
10. จุ่มลงบนสารละลายกรด HF (5%) เพื่อลอกออกไซด์ออกและล้างออกด้วยน้ำ DI จากนั้นเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

หลังจากทำความสะอาดฐานรองเสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการตัดเตรียมฐานรองขนาด 1 ตารางเซนติเมตร สำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรบนฐานรองซิลิกอนนั้นมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำการเตรียมฐานรองเพื่อให้ง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร ในการทดลองนี้ใช้ฐานรองสองชนิดด้วยกันคือ ชนิดแรกทำการกรีดร่องให้เป็นลักษณะของตารางซึ่งเป็นฐานรองแบบซิลิกอนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ผลึกเพชรแสดงดังรูปที่ 3.1 และชนิดที่สองแบบขดมันซึ่งเป็นฐานรองซิลิกอนไดออกไซด์แบบธรรมชาติใช้ในการสังเคราะห์เพื่อขยายขนาดของผลึกเพชรแสดงดังรูปที่ 3.2 จากนั้นนำไปทำความสะอาดตามขั้นตอนดังนี้

1. นำไปต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดคราบไขมันบริเวณผิวหน้าของฐานรอง
2. ทำการล้างเศษซิลิกอนที่ติดตามร่องที่เกิดจากการกรีดด้วยเพชรตัดกระจกด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) เป็นเวลา 5 นาที
3. ล้างออกด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water : DI) และเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแผ่นซีลิกอนชนิดกริดเป็นร่องเป็นลักษณะตารางขนาด 1 ตารางเซนติเมตร

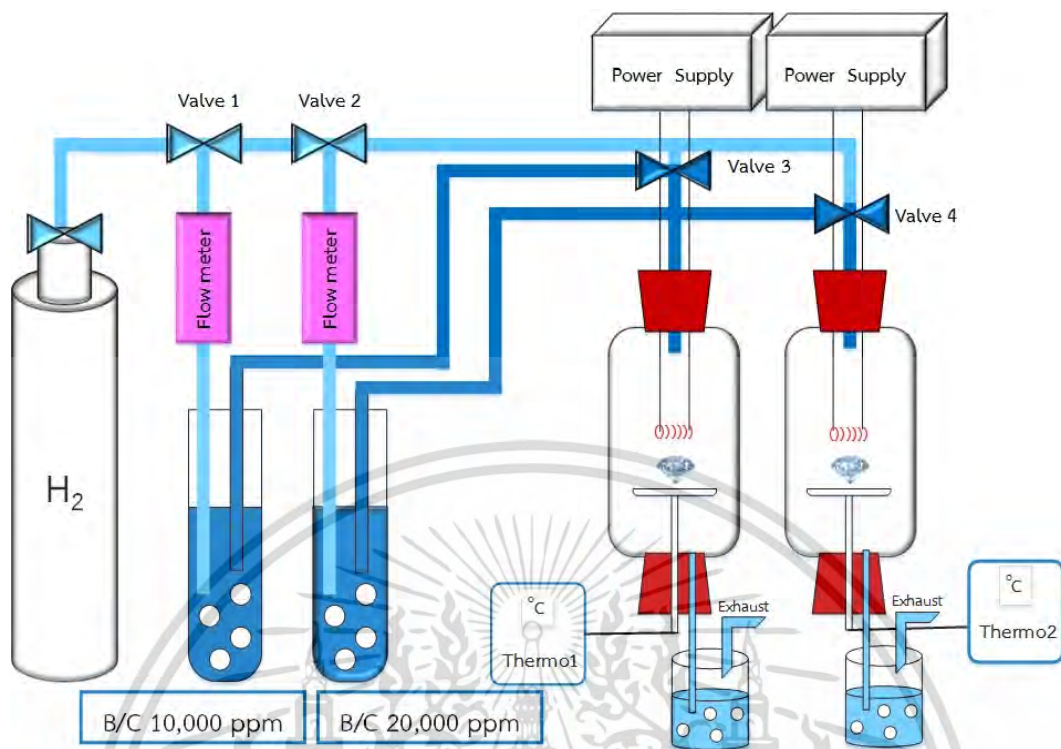


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแผ่นซีลิกอนชนิดขัดมันขนาด 1 ตารางเซนติเมตร

### 3.1.2 การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยวิธี HFCVD

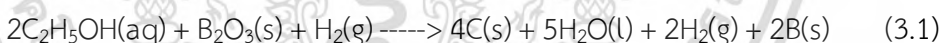
การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพี นั้นได้เลือกใช้ฐานรองสองชนิดด้วยกันคือ ชนิดที่กริดร่องเป็นลักษณะตารางเพื่อต้องการที่จะได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์ตรงบริเวณรอยตัดของร่องจากการกริดเป็นลักษณะตาราง โดยนำสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมอะตอมสารเจือโบรอน ในอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ด้วยสารประกอบโบรอนไตรออกไซด์แสดงดังตารางที่ 3.1 ในการสังเคราะห์นั้นใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาอะตอมคาร์บอนและโบรอนที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ 14 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรชนิดพีด้วยวิธีการแอนนิลที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นเวลา 12 นาที ทุกๆ 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการคัดเลือกผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในแต่ละเงื่อนไขทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดบนฐานรองชนิดขัดมันเป็นระยะเวลา 180 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง สำหรับแผนภาพการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยวิธี HFCVD แสดงดังรูปที่ 3.3 และชุดการสังเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยวัสดุ และอุปกรณ์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากท่านใดไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแผนภาพการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดที่ด้วยวิธี HFCVD ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนในอัตราส่วน 10,000 ppm และ 20,000 ppm ตามลำดับ

การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดที่ด้วยวิธี HFCVD นั้นสามารถเขียนสมการปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมีที่อุณหภูมิการกระตุ้น 2000 °C ดังสมการที่ (3.1)



ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์

อัตราส่วนอะตอมสารเจือ B/C (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (ml)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)
10,000	50	1.00
20,000	50	2.00
30,000	50	3.00
40,000	50	4.00

อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดด้วยวิธี HFCVD ดังนี้

1. ก๊าซไฮโดรเจน
2. วาล์วหยาบ
3. Regulator ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยผู้จัดทำไว้เพื่อใช้ในการศึกษาด้านการวิจัย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Flow meter ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์ที่เติมอะตอมสารเจือ 2 ชุด
6. แหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์ 2 ชุด
7. Chamber ที่ออกแบบให้ลดการสะท้อนของอุณหภูมิความร้อนที่จากท่อควอทซ์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร จำนวน 2 ชุด
8. จุกยางขนาด Extra และขนาด No.8 ยางธรรมชาติทนความร้อนสูง ยี่ห้อ As one
9. Power supply 2 ชุด
10. ท่อเทปลอน (ทั้งระบบ) ป้องกันการกักความร้อนของเอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อการใช้งานที่ยาวนาน
11. นาฬิกาจับเวลา
12. พัดลมระบายความร้อน
13. DC-Ammeter
14. สวิตช์ Power
15. ขดลวดทั้งสแตนเลสเพื่อใช้ทำ Filament 2 ชุด
16. ขวดลูกขมพู่ เพื่อตรวจการไหลออกของก๊าซไฮโดรเจน 2 ชุด
17. Thermocouple วัดอุณหภูมิ 2 ชุด

สำหรับการเตรียมอุปกรณ์และขั้นตอนการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD แสดงขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่างๆก่อนการทดลอง
2. ทำการเตรียมไส้หลอดโดยสร้างชุดพันไส้หลอด มีแกนกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร
3. เตรียมไส้หลอดโดยใช้ลวดทั้งสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร พันให้ได้จำนวนรอบทั้งหมด 40 รอบ จำนวน 2 เส้น
4. จากนั้นยึดออกให้ไส้หลอดนั้นมีความยาว 1.8 เซนติเมตร
5. นำลวดทั้งสแตนเลส 2 เส้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร และยาว 25 เซนติเมตร ดัดงอตรงส่วนของปลายเพียงหนึ่งด้าน ให้มีลักษณะเป็นรูปตัว L โดยส่วนที่โค้งงอยาว 5 มิลลิเมตร
6. ตัดแผ่นทองแดงหนา 2 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 2 ตารางเซนติเมตรและเจาะรูระบายความร้อนทั่วทั้งแผ่น
7. ตัดเตรียมแผ่นโมลิบดีนัมขนาด 2 ตารางเซนติเมตร เพื่อที่จะเป็นฐานรองชั้นที่สอง เพื่อรองซิลิคอน และสร้างตัวยึดฐานรองซิลิคอนกับแผ่นระบายความร้อนทองแดงจากแผ่นโมลิบดีนัม
8. ทำการประกอบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยระยะห่างไส้หลอดกับฐานรองซิลิคอนอยู่ที่ 2 มิลลิเมตร
9. ตรวจสอบรอยรั่วในข้อต่อหรือจุดที่เชื่อมต่อกันของระบบด้วยน้ำสบู่ ทดสอบการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และทำการทดสอบแหล่งจ่ายกระแสและมิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เปิดวาล์วหยาบที่ถึงก๊าซไฮโดรเจนจากนั้นปรับ Regulator เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ 200 ml/min เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดลงมาเหลือ 100 ml/min
11. ปรับวาล์วตัวที่ 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านไปยัง Flow meter
12. ปรับ Flow meter เพื่อปรับอัตราการไหลของเอทิลแอลกอฮอล์ที่เจือสารที่ 14 ml/min เป็นเวลา 30 นาที
13. เปิดสวิตช์ Power
14. เปิดสวิตช์พัดลมระบายความร้อน
15. ทำการจ่ายกระแสให้กับไส้หลอด โดยค่อยๆปรับอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 50 °C/ 1 นาที จนได้อุณหภูมิที่ต้องการ
16. ทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรตามระยะเวลาที่กำหนดไว้
17. เมื่อครบระยะเวลาในการสังเคราะห์ผลึกเพชรแล้ว ค่อยๆทำการปรับลดกระแสเพื่อให้อุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ
18. ปิดวาล์วหยาบที่ถึงก๊าซไฮโดรเจนและปิดสวิตช์ Power
19. เปิดพัดลมระบายความร้อนจนกว่าหลอดทดลองจะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ โดยสังเกตอุณหภูมิที่ลดต่ำลงจาก Thermocouple
20. รวบรวมก๊าซในระบบหมด สังเกตจากฟองอากาศในขวดรูปชมพู่ จากนั้นปิดวาล์วตัวที่ 1 รวบรวมระบบเย็น ปิดสวิตช์พัดลมระบายความร้อน เสร็จสิ้นกระบวนการสังเคราะห์

### 3.1.2.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณโบรอนไตรออกไซด์ที่อัตราส่วน B/C

ความเข้มข้น 10,000 ppm

การคำนวณหาค่าโบรอนต่อคาร์บอนนั้น จำเป็นต้องอาศัยความรู้จากเรื่องปริมาณสารสัมพันธ์ ซึ่งเราต้องทราบน้ำหนักอะตอมของธาตุแต่ละชนิด โดยในการทดลองนี้เราใช้สารประกอบโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) และสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ โบรอน คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน แสดงมวลอะตอมของธาตุแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงมวลอะตอมของโบรอนและมวลของธาตุต่างๆ

อะตอม	มวลอะตอม (กรัม)
ออกซิเจน	15.9994
คาร์บอน	12.0108
โบรอน	10.811
ไฮโดรเจน	1.0081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากมวลอะตอมเราสามารถคำนวณหาค่ามวลโมเลกุลได้จาก

มวลโมเลกุลของสารใดๆ = ผลบวกของมวลอะตอมของธาตุๆต่างใน 1 โมเลกุลของสารนั้น  
คำนวณหาค่ามวลโมเลกุลของโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) ประกอบด้วยโบรอนจำนวน 2 อะตอม และออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม ดังนั้นมวลโมเลกุลจะมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{มวลอะตอมของโบรอน} \times 2) + (\text{มวลอะตอมของออกซิเจน} \times 3) \\ &= (10.811 \times 2) + (15.9994 \times 3) \\ &= 69.6202 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่ามวลโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 2 อะตอม ไฮโดรเจนจำนวน 6 อะตอม และออกซิเจนจำนวน 1 อะตอม ดังนั้นมวลโมเลกุลจะมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{มวลอะตอมของคาร์บอน} \times 2) + (\text{มวลอะตอมของไฮโดรเจน} \times 6) + (\text{มวลอะตอมของออกซิเจน} \times 1) \\ &= (12.0108 \times 2) + (1.00797 \times 6) + (15.9994 \times 1) \\ &= 46.0696 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโบรอนและคาร์บอน

จากมวลอะตอมของโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) มีค่าเท่ากับ 69.6202 g/mol เป็นมวลอะตอมของโบรอนเท่ากับ 21.622 g

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของโบรอน} &= \frac{21.622 \times 100}{69.6202} \text{ g} \\ &= 31.0571 \text{ g} \end{aligned}$$

จากมวลอะตอมของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) มีค่าเท่ากับ 46.0696 g/mol เป็นมวลอะตอมของโบรอนเท่ากับ 24.0216 g

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของโบรอน} &= \frac{24.0216 \times 100}{46.0696} \text{ g} \\ &= 52.1419 \text{ g} \end{aligned}$$

เนื่องจาก สสารทุกชนิด 1 โมล จะมีจำนวน  $6.023 \times 10^{23}$  อะตอม  $6.023 \times 10^{23}$  คือเลขอาโวกาโด

ดังนั้น ถ้ามีโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) 1 โมล จะมีจำนวนโบรอน  $(6.023 \times 10^{23}) \times (31.0571)$  อะตอม

และ ถ้ามีโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) X โมล จะมีจำนวนโบรอน  $(6.023 \times 10^{23}) \times (31.0571) \times (X)$  อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) Y โมล จะมีจำนวนคาร์บอน ( $6.023 \times 10^{23}$ )  $\times$  ( $52.1419$ )  $\times$  (Y) อะตอม

$$\text{โดยที่ } X = \left[ \frac{\text{น้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ } (B_2O_3) \text{ (g)}}{69.6202 \text{ (g/mol)}} \right]$$

$$Y = \left[ \frac{\text{น้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ } (C_2H_5OH) \text{ (g)}}{46.0696 \text{ (g/mol)}} \right]$$

ดังนั้น อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) มีค่าเป็น

$$B/C = \left[ \frac{(6.023 \times 10^{23}) \times (31.0571 \text{ g/mol}) \times (X)}{(6.023 \times 10^{23}) \times (52.1419 \text{ g/mol}) \times (Y)} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

$$B/C = \left[ \frac{31.0571(\text{g}) \times (X)}{52.1419(\text{g}) \times (Y)} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

การคำนวณหาปริมาณโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) โดยมีค่าโบรอนต่อคาร์บอนที่ 10,000 ppm ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) 50 มิลลิลิตร

เนื่องจาก ความหนาแน่นของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 1 มิลลิลิตร มีค่าเท่ากับ 0.789 กรัม

ดังนั้น เอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 50 มิลลิลิตร

$$= \left[ \frac{50 \text{ (ml)} \times 0.789 \text{ (g)}}{1 \text{ (ml)}} \right]$$

มีค่าเท่ากับ = 39.45 กรัม

$$\text{จาก } Y = \left[ \frac{\text{น้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ } (C_2H_5OH) \text{ (g)}}{46.0696 \text{ (g/mol)}} \right]$$

ดังนั้นจะสามารถหาจำนวนโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 50 มิลลิลิตร มีค่า

$$Y = \left[ \frac{39.45 \text{ (g)}}{46.0696 \text{ (g/mol)}} \right]$$

= 0.8563 โมล

$$\text{จาก } B/C = \left[ \frac{31.0571(\text{g}) \times (X)}{52.1419(\text{g}) \times (Y)} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

แทนค่าจำนวนโมลของ เอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ได้

$$B/C = \left[ \frac{31.0571(\text{g}) \times (X)}{52.1419(\text{g}) \times 0.8563 \text{ (mol)}} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

$$B/C = \left[ \frac{52.1419(\text{g}) \times 0.8563 \text{ (mol)} \times 10,000 \text{ (ppm)}}{31.0571(\text{g}) \times 10^6 \text{ (ppm)}} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.01438 \text{ โมล}$$

จาก 
$$X = \left[ \frac{\text{น้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ (B}_2\text{O}_3) \text{ (g)}}{69.6202 \text{ (g/mol)}} \right]$$

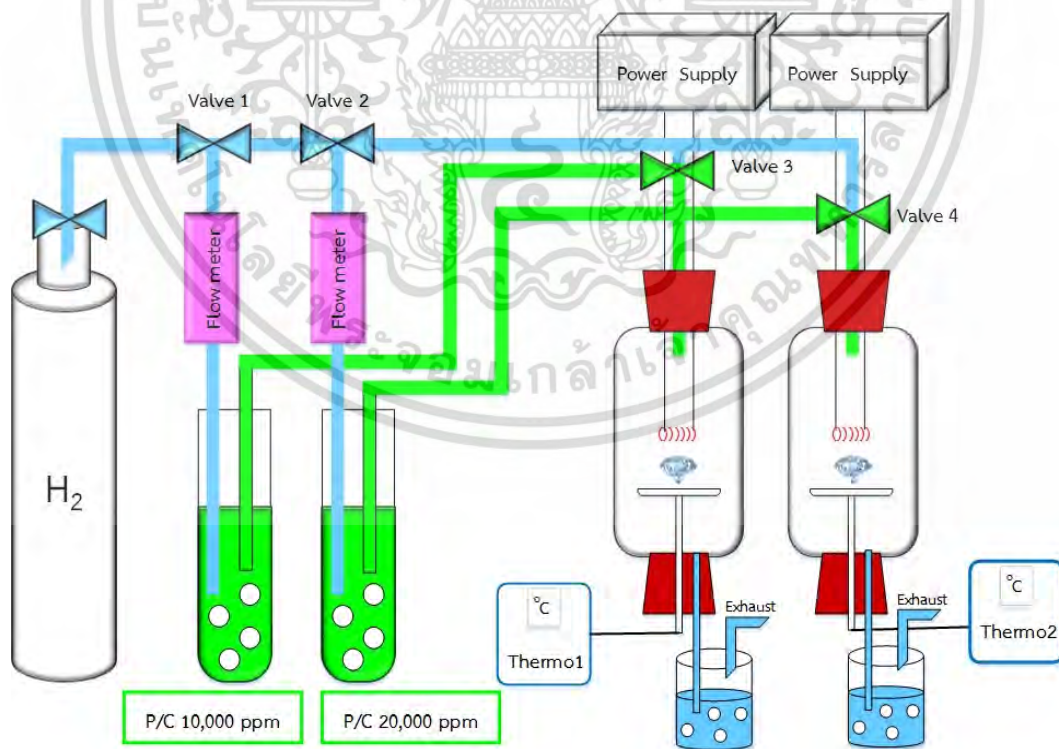
ดังนั้น น้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่ใช้ในการเตรียมกับสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) ที่ 50 มิลลิลิตร

$$X = 69.6202 \text{ g/mol} \times 0.01438 \text{ mol}$$

$$= 1.001 \text{ กรัม}$$

### 3.1.3 การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD

การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นใช้อุปกรณ์และขั้นตอนการสังเคราะห์เช่นเดียวกับการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพี ซึ่งจะแตกต่างกันคือการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ด้วยสารประกอบฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน (P/C) 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3 โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ที่ทำการเจือฟอสฟอรัสที่ 14 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับแผนภาพการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD แสดงดังรูปที่ 3.4

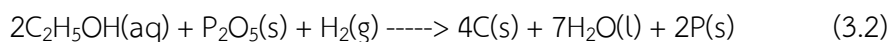


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแผนภาพการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD ที่อัตราส่วนฟอสฟอรัส

ต่อคาร์บอนในอัตราส่วน 10,000 ppm และ 20,000 ppm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD นั้นสามารถเขียนสมการปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมีที่อุณหภูมิการกระตุ้น 2000 °C ดังสมการที่ 3.2



ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์

อัตราส่วนอะตอมสารเจือ P/C (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (ml)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)
10,000	50	1.45
20,000	50	2.90
30,000	50	4.35
40,000	50	8.80

### 3.1.3.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ที่อัตราส่วน

P/C ความเข้มข้น 10,000 ppm

สำหรับการคำนวณหาค่าฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนนั้น จำเป็นต้องอาศัยความรู้พื้นฐานในเรื่องปริมาณสารสัมพันธ์ โดยเราต้องทราบน้ำหนักอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในการทดลองนี้เราได้เลือกใช้สารประกอบฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) และสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ ฟอสฟอรัส คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน แสดงมวลอะตอมของธาตุแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงมวลอะตอมของฟอสฟอรัสและมวลของธาตุต่างๆ

อะตอม	มวลอะตอม (กรัม)
ออกซิเจน	15.9994
คาร์บอน	12.0108
ฟอสฟอรัส	30.9737
ไฮโดรเจน	1.0081

จากมวลอะตอมเราสามารถคำนวณหาค่ามวลโมเลกุลได้จาก

มวลโมเลกุลของสารใดๆ = ผลบวกของมวลอะตอมของธาตุๆต่างใน 1 โมเลกุลของสารนั้น

คำนวณหาค่ามวลโมเลกุลของฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ประกอบด้วยฟอสฟอรัส จำนวน 2 อะตอม และออกซิเจนจำนวน 5 อะตอม ดังนั้นมวลโมเลกุลจะมีค่า

$$= (\text{มวลอะตอมของฟอสฟอรัส} \times 2) + (\text{มวลอะตอมของออกซิเจน} \times 5)$$

$$= (30.9737 \times 2) + (15.9994 \times 5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 141.9444 \text{ g/mol}$$

คำนวณหาค่ามวลโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 2 อะตอม ไฮโดรเจนจำนวน 6 อะตอม และออกซิเจนจำนวน 1 อะตอม ดังนั้นมวลโมเลกุลจะมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{มวลอะตอมของคาร์บอน} \times 2) + (\text{มวลอะตอมของไฮโดรเจน} \times 6) + (\text{มวลอะตอมของออกซิเจน} \times 1) \\ &= (12.0108 \times 2) + (1.00797 \times 6) + (15.9994 \times 1) \\ &= 46.0696 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโบรอนและคาร์บอน

จากมวลอะตอมของฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) มีค่าเท่ากับ 141.9444 g/mol เป็นมวลอะตอมของฟอสฟอรัสเท่ากับ 61.9474 g

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของโบรอน} &= \frac{61.9474 \times 100}{141.9444} \text{ g} \\ &= 43.6420 \text{ g} \end{aligned}$$

จากมวลอะตอมของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) มีค่าเท่ากับ 46.0696 g/mol เป็นมวลอะตอมของโบรอนเท่ากับ 24.0216 g

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของโบรอน} &= \frac{24.0216 \times 100}{46.0696} \text{ g} \\ &= 52.1419 \text{ g} \end{aligned}$$

เนื่องจาก สสารทุกชนิด 1 โมล จะมีจำนวน  $6.023 \times 10^{23}$  อะตอม  $6.023 \times 10^{23}$  คือเลขอาโวกาโด

ดังนั้น ถ้ามีฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) 1 โมล จะมีจำนวนฟอสฟอรัส ( $6.023 \times 10^{23}$ )  $\times$  (43.6420) อะตอม

และ ถ้ามีฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) X โมล จะมีจำนวนโบรอน ( $6.023 \times 10^{23}$ )  $\times$  (43.6420)  $\times$  (X) อะตอม

ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) Y โมล จะมีจำนวนคาร์บอน ( $6.023 \times 10^{23}$ )  $\times$  (52.1419)  $\times$  (Y) อะตอม

$$\text{โดยที่ } X = \left[ \frac{\text{น้ำหนักฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ } (P_2O_5) \text{ (g)}}{141.9444 \text{ (g/mol)}} \right]$$

$$Y = \left[ \frac{\text{น้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ } (C_2H_5OH) \text{ (g)}}{46.0696 \text{ (g/mol)}} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น อัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน (P/C) มีค่าเป็น

$$B/C = \left[ \frac{(6.023 \times 10^{23}) \times (43.6420 \text{ g/mol}) \times (X)}{(6.023 \times 10^{23}) \times (52.1419 \text{ g/mol}) \times (Y)} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

$$B/C = \left[ \frac{43.6420(\text{g}) \times (X)}{52.1419(\text{g}) \times (Y)} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

การคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) โดยมีค่าฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนที่ 10,000 ppm ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) 50 มิลลิลิตร

เนื่องจาก ความหนาแน่นของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 1 มิลลิลิตร มีค่าเท่ากับ 0.789 กรัม

ดังนั้น เอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 50 มิลลิลิตร

$$= \left[ \frac{50 \text{ (ml)} \times 0.789 \text{ (g)}}{1 \text{ (ml)}} \right]$$

มีค่าเท่ากับ = 39.45 กรัม

$$\text{จาก } Y = \left[ \frac{\text{น้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ } (C_2H_5OH) \text{ (g)}}{46.0696 \text{ (g/mol)}} \right]$$

ดังนั้นจะสามารถหาจำนวนโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 50 มิลลิลิตร มีค่า

$$Y = \left[ \frac{39.45 \text{ (g)}}{46.0696 \text{ (g/mol)}} \right]$$

= 0.8563 โมล

จาก

$$P/C = \left[ \frac{43.6420(\text{g}) \times (X)}{52.1419(\text{g}) \times (Y)} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

แทนค่าจำนวนโมลของ เอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ได้

$$P/C = \left[ \frac{43.6420(\text{g}) \times (X)}{52.1419(\text{g}) \times 0.8563 \text{ (mol)}} \right] \times 10^6 \text{ ppm}$$

$$P/C = \left[ \frac{52.1419(\text{g}) \times 0.8563 \text{ (mol)} \times 10,000 \text{ (ppm)}}{43.6420(\text{g}) \times 10^6(\text{ppm})} \right]$$

= 0.01023 โมล

จาก

$$X = \left[ \frac{\text{ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ } (P_2O_5) \text{ (g)}}{141.9444 \text{ (g/mol)}} \right]$$

ดังนั้น ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) ที่ใช้ในการเตรียมกับสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) ที่ 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิใช่มีผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 1.4520 กรัม

เมื่อได้ทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นรวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนค่าความเข้มข้นต่างๆ แล้วนั้น จึงนำไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรทั้งสองชนิด ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 3.1.4 การวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็น ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

นำผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ซึ่งจะสามารถยืนยันความเป็นเพชรได้จากตำแหน่งของ Raman Spectrum ที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ด้วยเครื่อง Raman spectroscope แสดงดังรูปที่ 3.5 และเมื่อทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดผลึกเพชรทั้งสองชนิดรวมเป็นระยะเวลา 240 ชั่วโมง จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยเทคนิค Raman spectroscopy อีกครั้ง เพื่อที่จะยืนยันความเป็นเพชรหลังจากที่ทำการเพิ่มขนาดผลึกโดยสามารถนำตำแหน่งจุดยอดของ Raman Spectrum มาแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ซึ่งจะทำให้ทราบและสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีและเอ็นที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีคุณสมบัติเป็นผลึกเพชรหรือไม่



รูปที่ 3.5 เครื่อง Raman spectroscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman spectroscopy [18]

Peak position (cm <sup>-1</sup> )	Type of carbon	Description
~1140	Small size (<0.1 μm) cubic diamond	Occasionally observed in diamond films with very small grain size (<0.1 μm).
1315-1326	Hexagonal diamond	Broad band, observed in shock wave produced diamond.
1332	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 19 cm <sup>-1</sup> for natural diamond.
1345	Amorphous carbon	Broad band, it becomes a shoulder of the 1550 cm <sup>-1</sup> band when the material is hydrogenated.
1355	Microcrystalline graphite	Observed in material with small grain size.
1550	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band.
1580	Graphite	First order peak
2458	Cubic diamond	Second order peak
2710	Microcrystalline graphite	Second order peak
3240	Graphite	Second order peak.

### 3.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

เมื่อทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง จึงนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลึกและวัดขนาดของผลึกของเพชรทั้งสองชนิดด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) แสดงดังรูปที่ 3.6 และหลังจากที่ทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดผลึกทั้งสองชนิดรวมเป็นระยะเวลา 240 ชั่วโมง แล้วนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) อีกครั้ง เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลึกและวัดขนาดของผลึกของเพชรทั้งสองชนิด



รูปที่ 3.6 เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)

### 3.1.6 การวิเคราะห์ธาตุของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นด้วย EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

หลังจากที่สังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นรวมระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง จึงนำไปทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) แบบ Pure Element แสดงดังรูปที่ 3.7 ของผลึกเพชรทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นซึ่งจะสามารถทำให้ทราบได้ว่าตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีธาตุแต่ละชนิดอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วน B/C และ P/C ที่ค่าความเข้มข้น 10,000 ppm, 20,000ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 เครื่อง EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

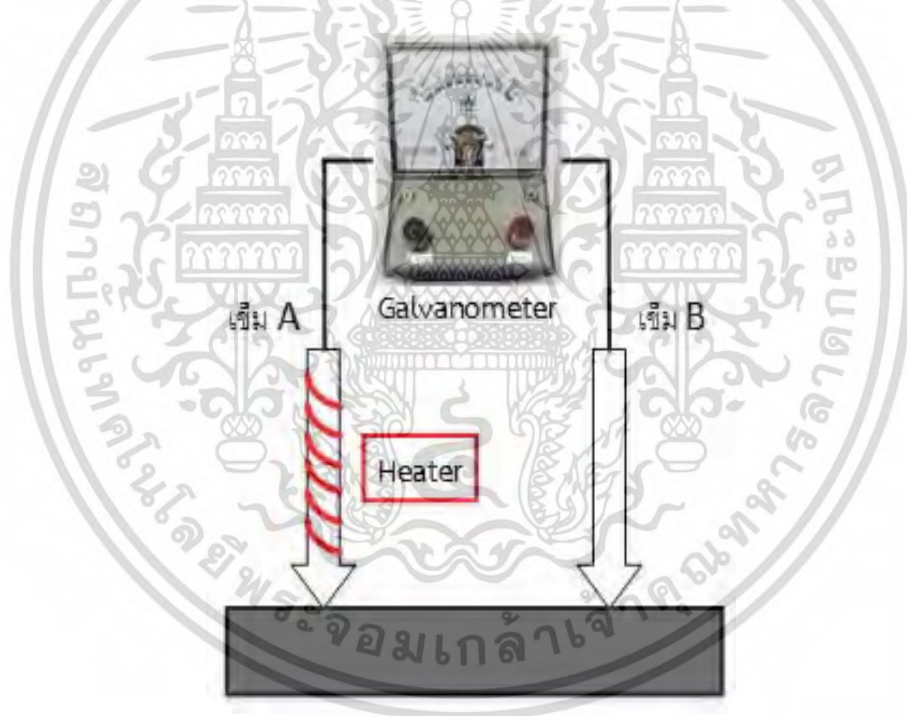
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.7 การวิเคราะห์ชนิดของพายุส่วนใหญ่ของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยวิธี

#### Hot-Point Probe

จากการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นรวมระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง แล้วนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยวิธี Hot-Point Probe โดยตัวกำหนดของชนิดสารกึ่งตัวนำนั้นปกติกแล้วจะเป็นพายุส่วนใหญ่ เช่น ถ้าพายุส่วนใหญ่คือ โฮล สารกึ่งตัวนำนั้นก็คือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี และถ้าพายุส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน สารกึ่งตัวนำชนิดนั้นคือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังนั้นหลักการวัดชนิดของสารกึ่งตัวนำคือ การวัดการวิเคราะห์ชนิดของพายุส่วนใหญ่ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำ

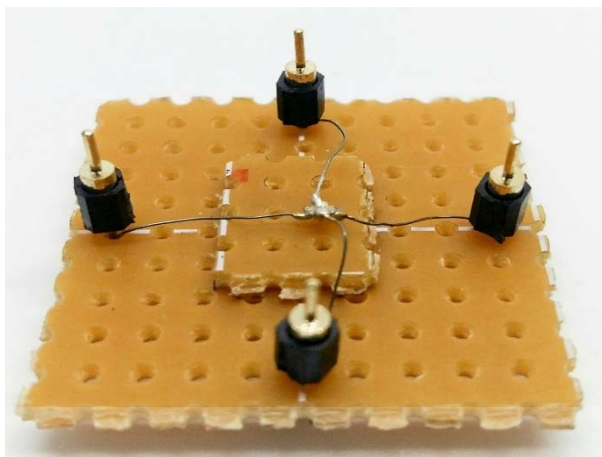
จากหลักการซีเบค การวิเคราะห์ชนิดของพายุส่วนใหญ่ของผลึกเพชร ว่ามีพายุหลักในการนำกระแสชนิดใด การวิเคราะห์หาคุณสมบัติดังกล่าวใช้ชุดอุปกรณ์การวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.8 จากรูปจะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ประกอบไปด้วยเข็ม 2 จัดบนผลึกเพชร โดยเข็ม A เป็นเข็มที่ถูกให้ความร้อน ในส่วนเข็ม B จะเป็นเข็มที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง เริ่มให้ความร้อนกับเข็ม A แล้วสังเกตเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ไปในทางบวก หรือลบ



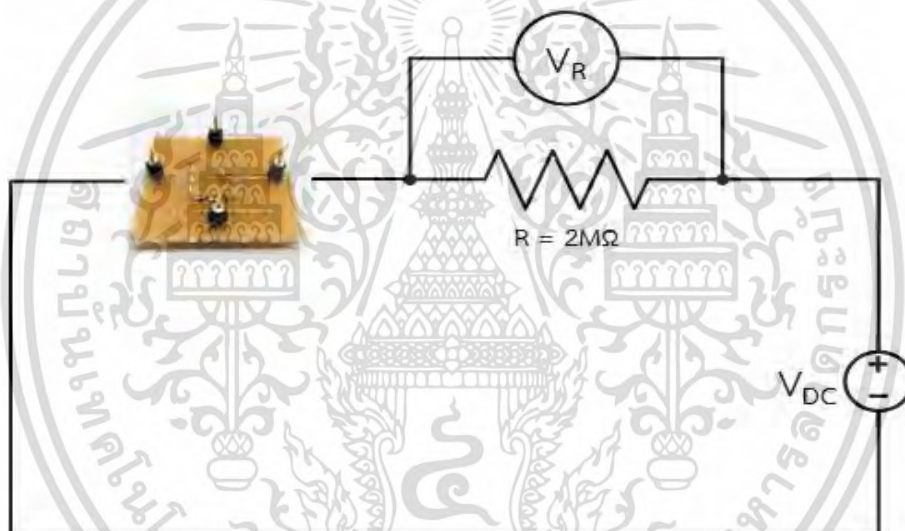
รูปที่ 3.8 การวิเคราะห์ชนิดของพายุส่วนใหญ่ของผลึกเพชร

### 3.1.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น

เมื่อทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง จึงนำผลึกเพชรทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นมาต่อขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะกาวเงินจำนวน 4 ขั้ว ดังรูปที่ 3.9 เพื่อจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรทั้งสองชนิด แสดงวงจรดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน



รูปที่ 3.10 วงจรวัดค่ากระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น

ในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าจาก  $-24$  ถึง  $24$  V และทำการบันทึกค่าจากลักษณะคุณสมบัติของวงจรถูกนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานในแต่ละตัวในวงจรเมื่อนำมารวมกันจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร ทำให้สามารถหา  $V_{(\text{Diamond})}$  ดังสมการที่ 3.3 และ  $I_{(\text{Diamond})}$  ดังสมการ 3.4

$$V_{(\text{Diamond})} = V_{\text{DC}} - V_R \quad (3.3)$$

$$I_{(\text{Diamond})} = \frac{V_R}{R} \quad (3.4)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างกระแสและแรงดันทั้งผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งจากสมการเส้นตรงนั้นเราสามารถหาค่าความต้านทานได้จากส่วนกลับของความชัน ดังนั้นจึงทำให้เราทราบถึงค่าความต้านทานทั้งผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นตามลำดับขั้นตอน และเงื่อนไขต่างๆที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 3 โดยในบทที่ 4 นี้จึงเสนอถึงผลการทดลองพร้อมทั้งผลวิเคราะห์การทดลองดังต่อไปนี้

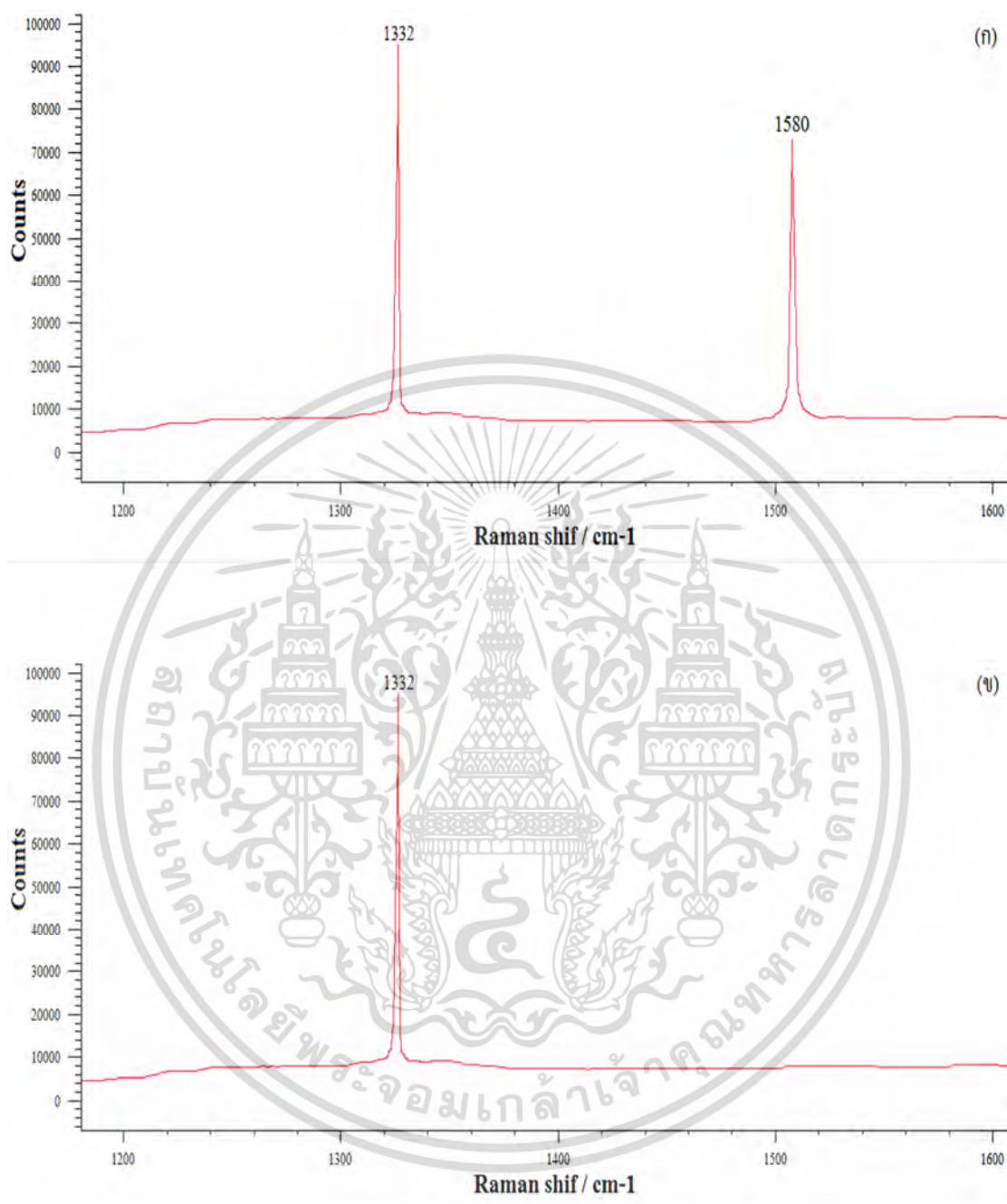
#### 4.1 ผลการทดลองสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยวิธี HFCVD

การทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง โดยใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดกริดเป็นร่องเป็นลักษณะตาราง และทำการแอนนัลทุกๆ 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 12 นาที ตลอดระยะเวลาในการสังเคราะห์

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

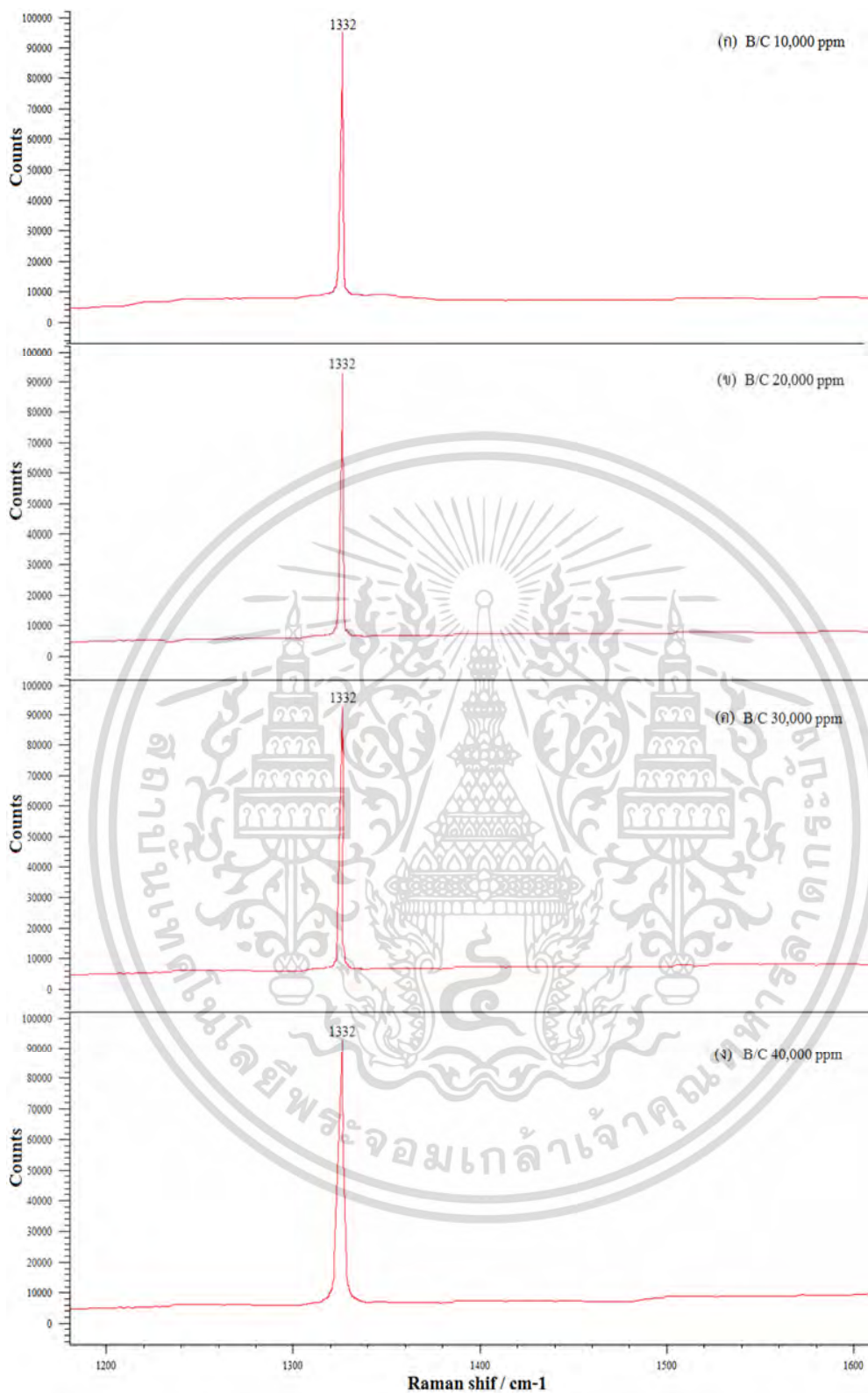
สำหรับผลึกเพชรชนิดพีที่เติมอะตอมสารเจือโบรอนที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.1 (ก) แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm ก่อนการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่  $1332$  และ  $1580\text{ cm}^{-1}$  เมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรและแกรไฟต์ และ 4.1 (ข) แสดงถึงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพี หลังการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  เพียงตำแหน่งเดียวเมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรเพียงอย่างเดียว โดยการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยวิธีการแอนนัลจะทำการแอนนัลทุกๆ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที และรูปที่ 4.2 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 จึงสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีที่ได้เติมอะตอมสารเจือที่อัตราส่วน B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ จากการสังเคราะห์ระยะเวลา 60 ชั่วโมง นั้นมีคุณสมบัติเป็นเพชรทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีส (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

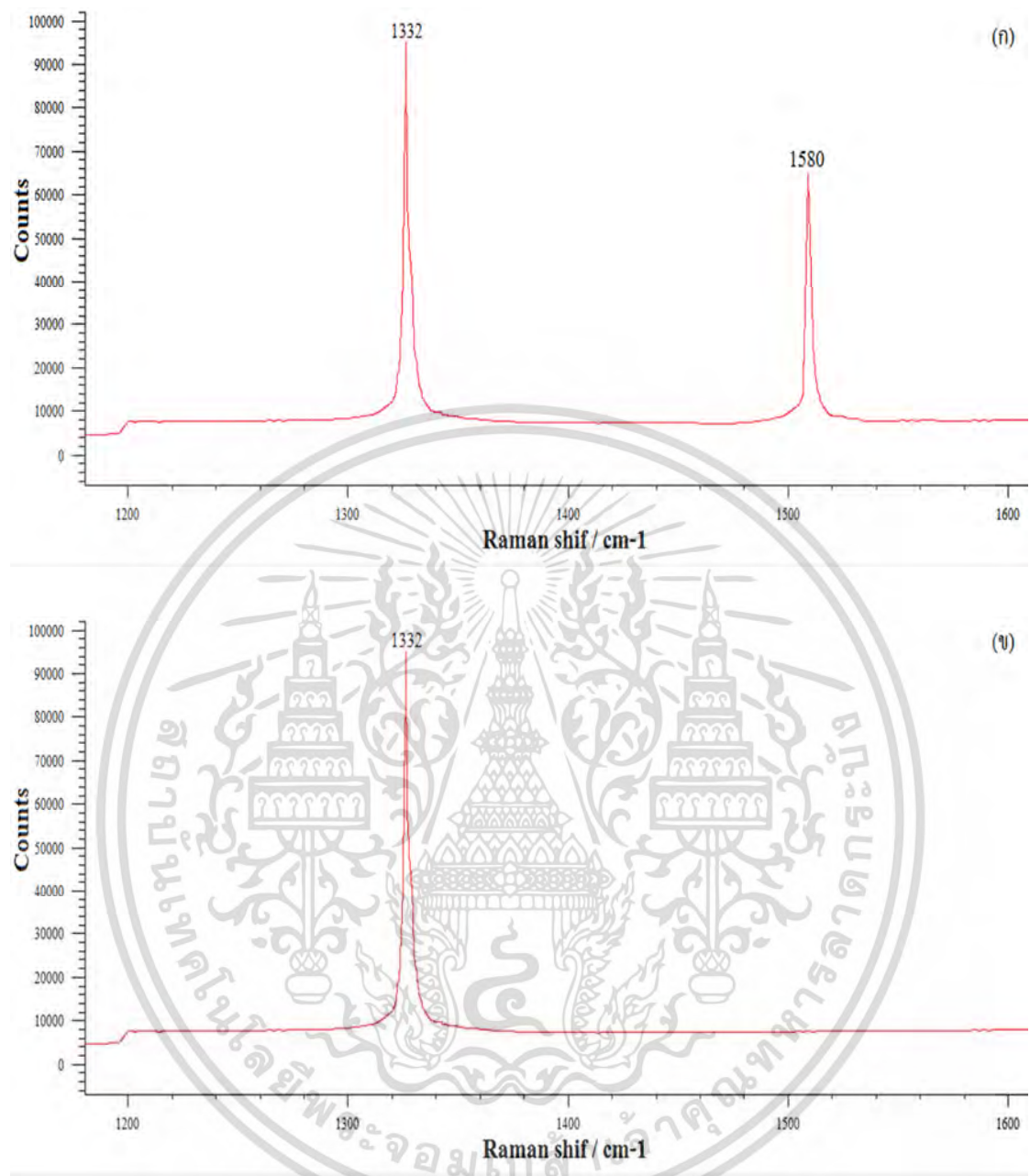


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) B/C 10,000 ppm (ข) B/C 20,000 ppm (ค) B/C 30,000 ppm (ง) B/C 40,000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

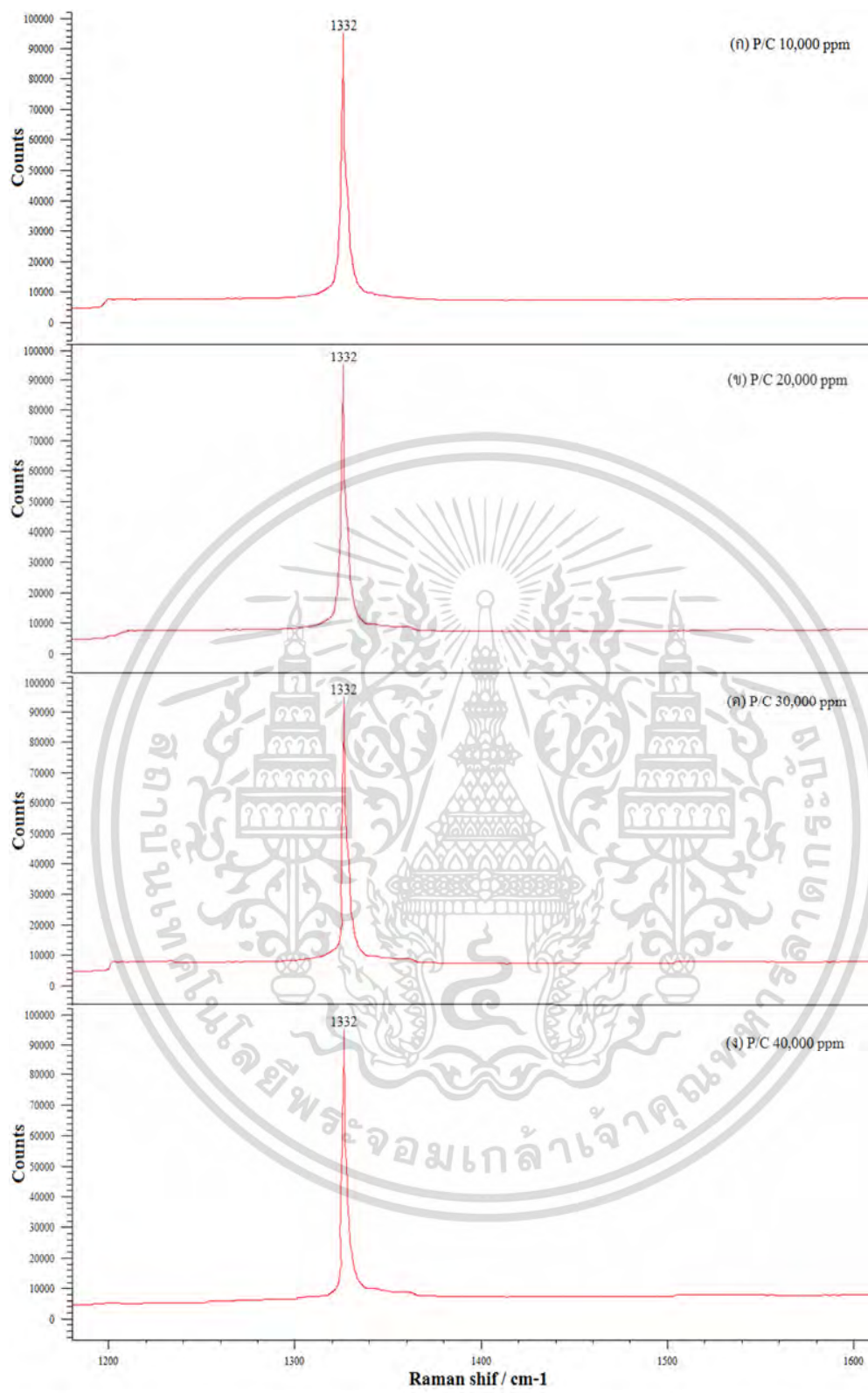
#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมงด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

การวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.3 (ก) แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm ก่อนการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลซึ่งจะเห็นได้ว่าพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332 และ 1580  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรและแกรไฟต์ และ 4.3 (ข) แสดงถึงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพี หลังการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332  $\text{cm}^{-1}$  เพียงตำแหน่งเดียวเมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรเพียงอย่างเดียว โดยการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยวิธีการแอนนัลจะทำการแอนนัลทุกๆ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที และจากรูปที่ 4.4 (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy พบว่า Raman Spectrum อยู่ที่ตำแหน่ง 1332  $\text{cm}^{-1}$  จากนั้นทำการแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วยการเติมอะตอมสารเจือที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ มีคุณสมบัติเป็นเพชรทั้งหมด



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนัล (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมงด้วยการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) P/C 10,000 ppm (ข) P/C 20,000 ppm (ค) P/C 30,000 ppm (ง) P/C 40,000 ppm

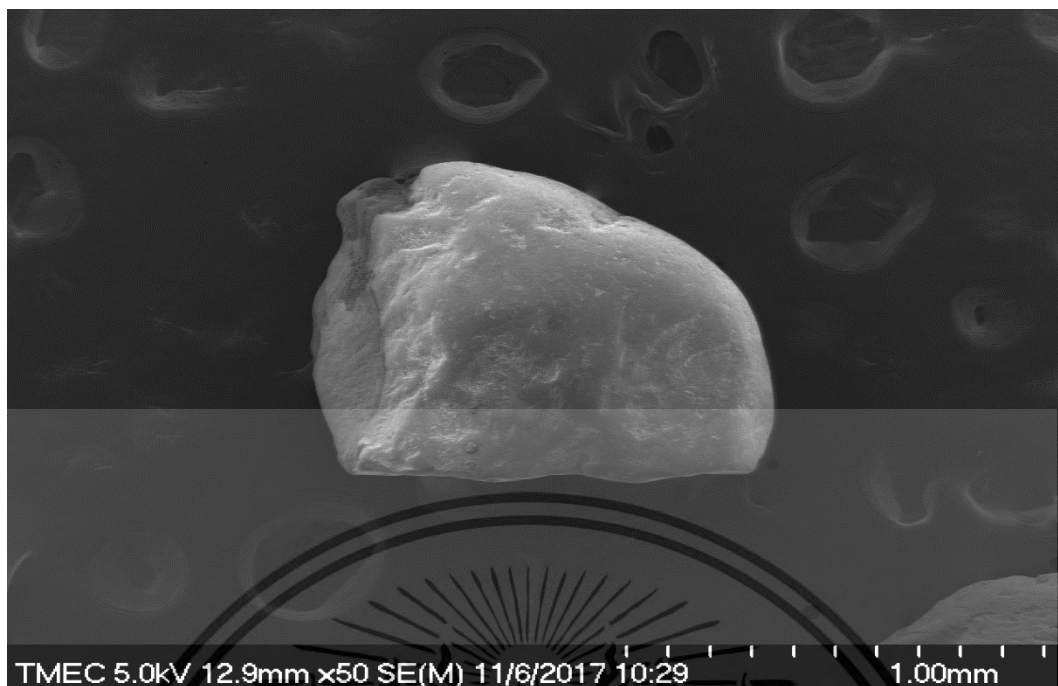
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

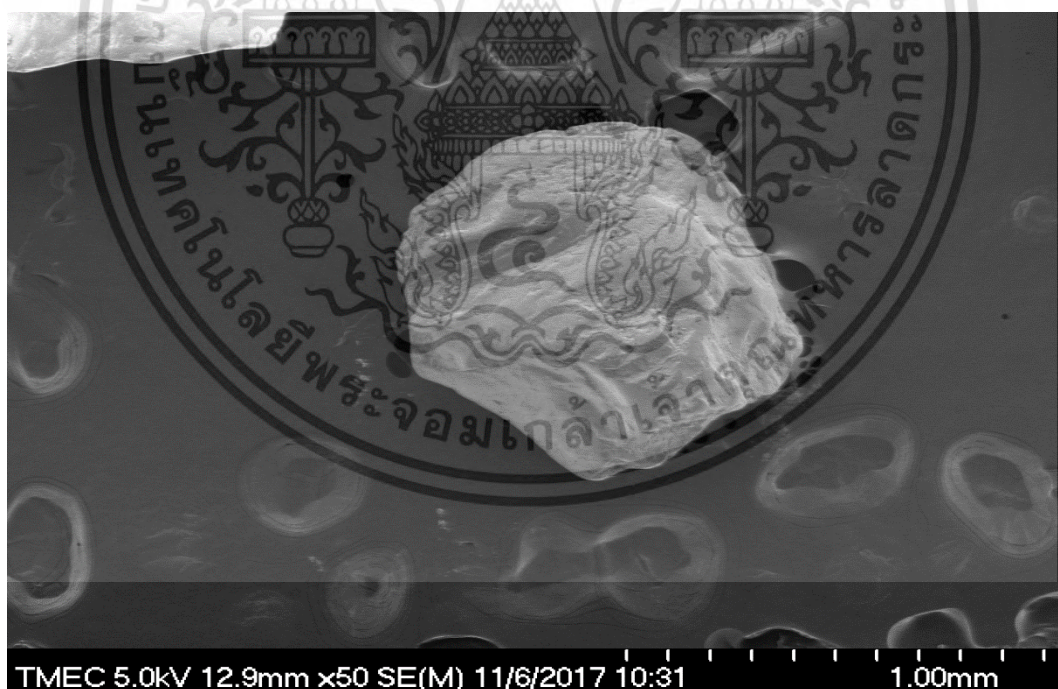
เมื่อสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีมีคุณสมบัติเป็นเพชรจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำผลึกเพชรทั้งสองชนิดไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพร้อมกับทำการวัดขนาด ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) สำหรับผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ระยะเวลา 60 ชั่วโมงนั้นมีลักษณะและขนาดเท่ากับ 0.592, 0.637, 0.604 และ 0.628 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

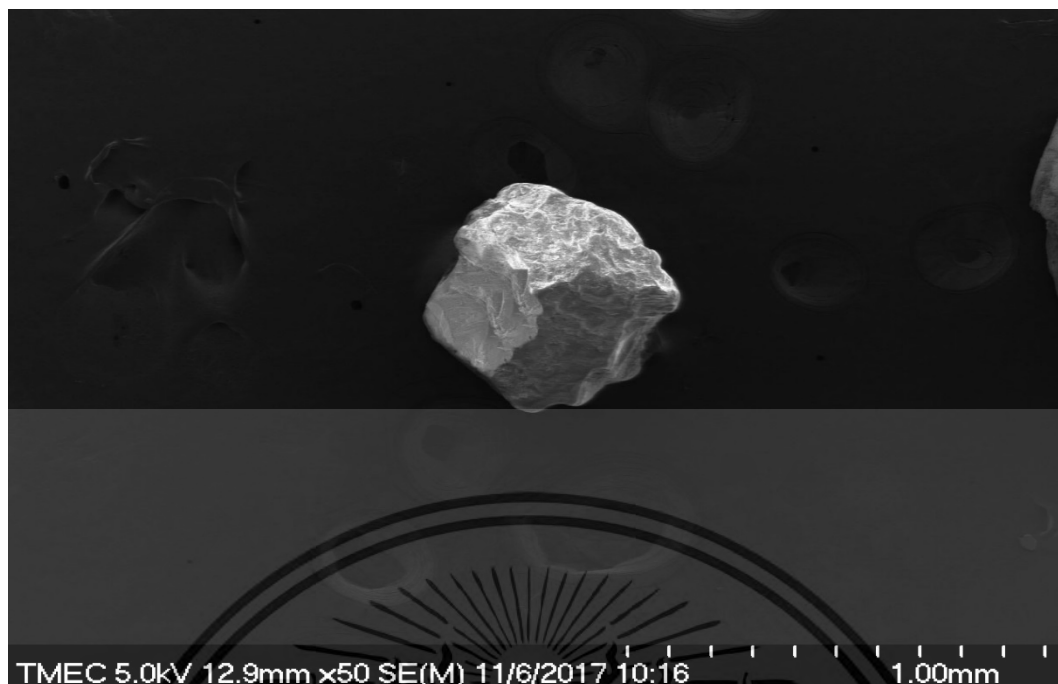


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

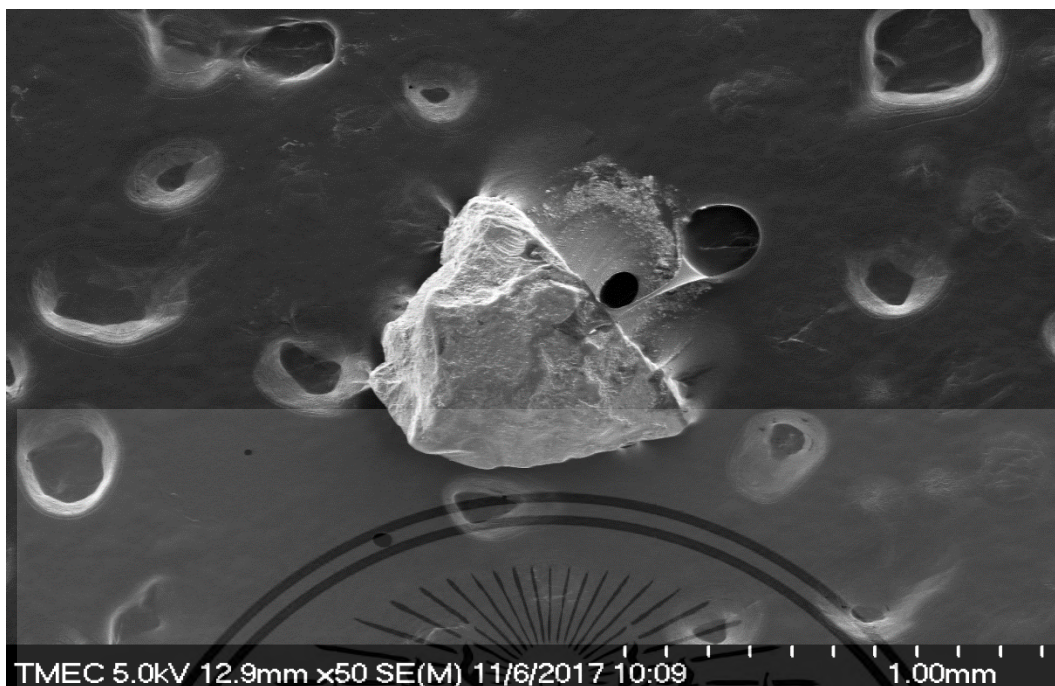
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



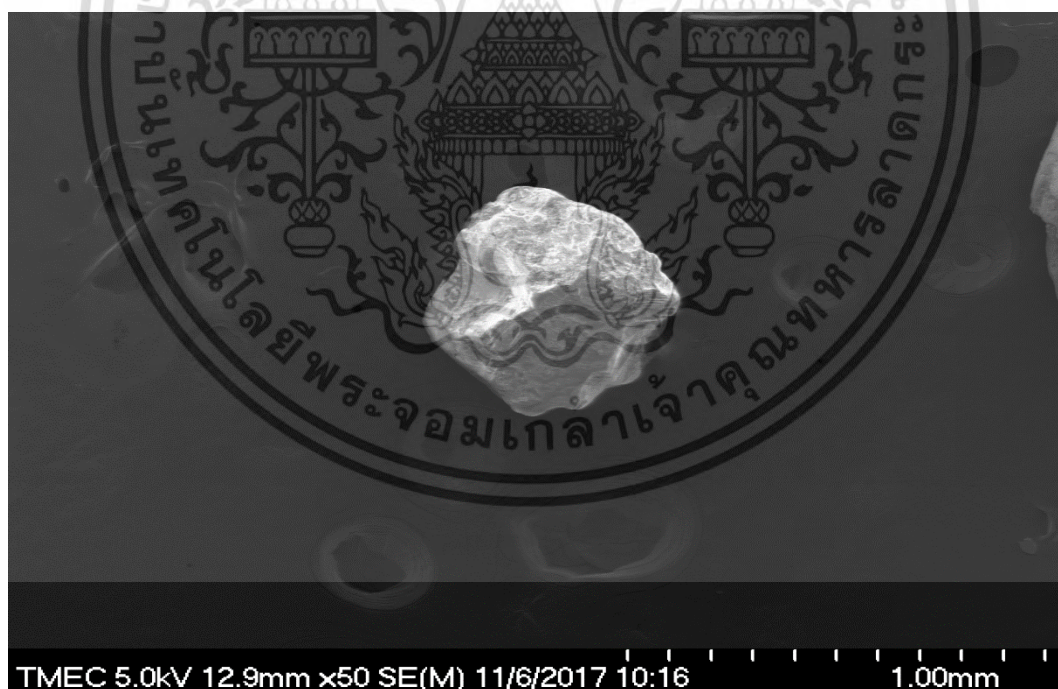
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

ในส่วนของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่เติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ ที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นมีลักษณะและขนาดของผลึกเท่ากับ 0.624, 0.597, 0.610 และ 0.625 มิลลิเมตร ตามลำดับ

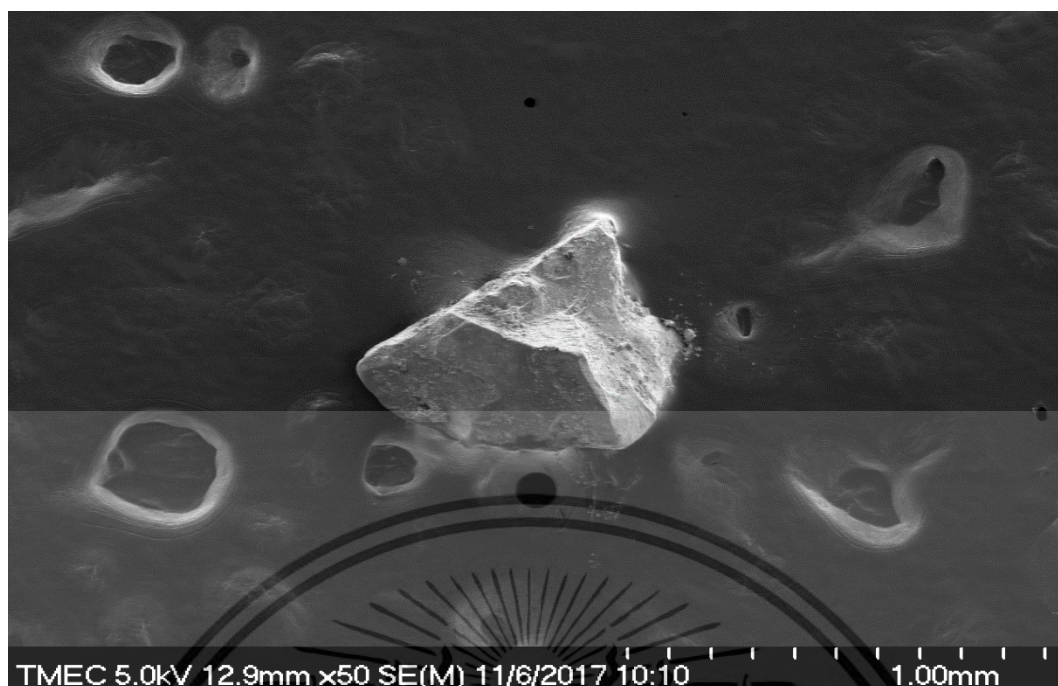


รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมงที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

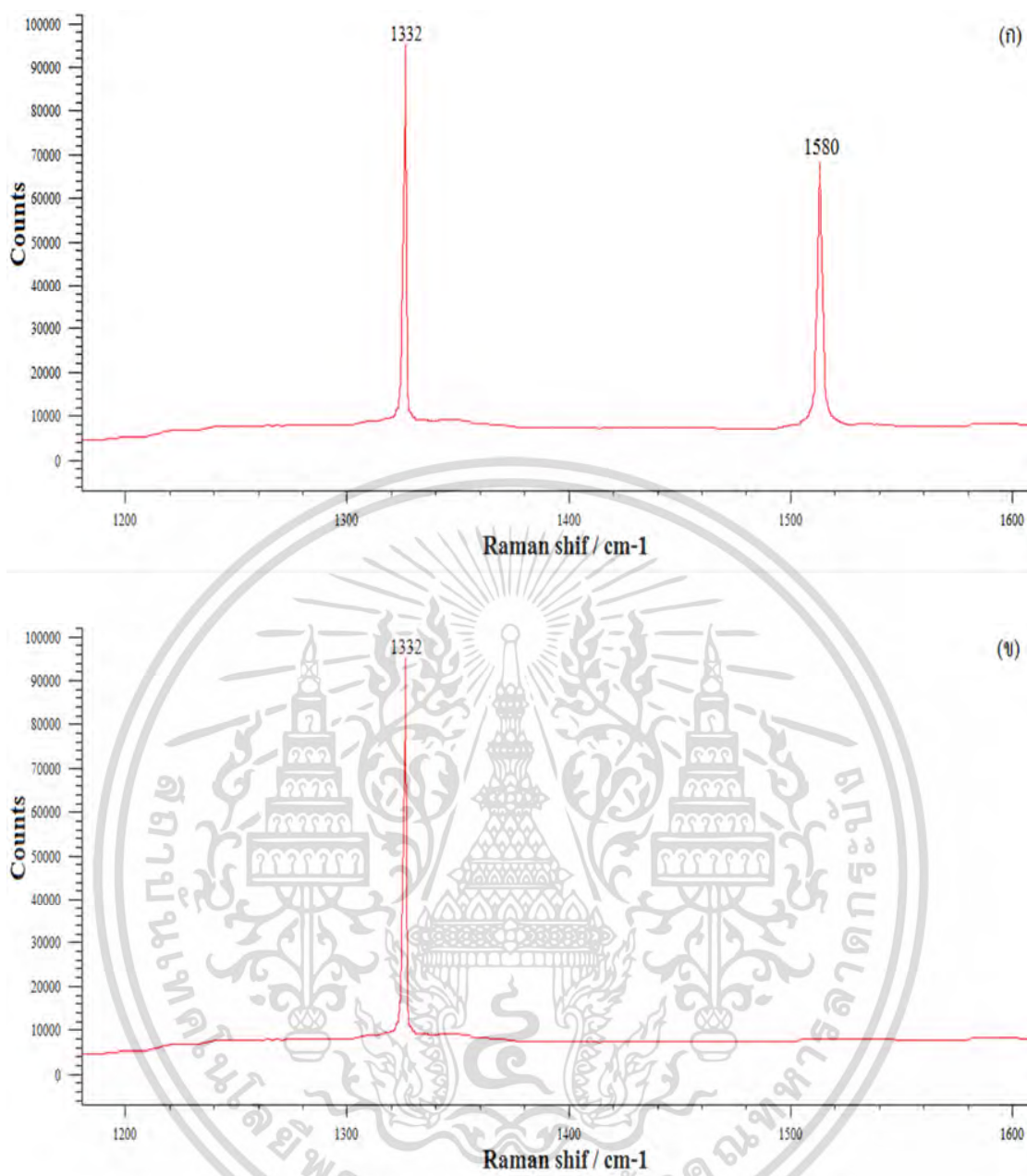
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการวิเคราะห์การสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรชนิดพีและผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยวิธี HFCVD

สำหรับกระบวนการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยวิธี HFCVD ระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง โดยใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดชั้นมัน และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ทุกๆ 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 12 นาที

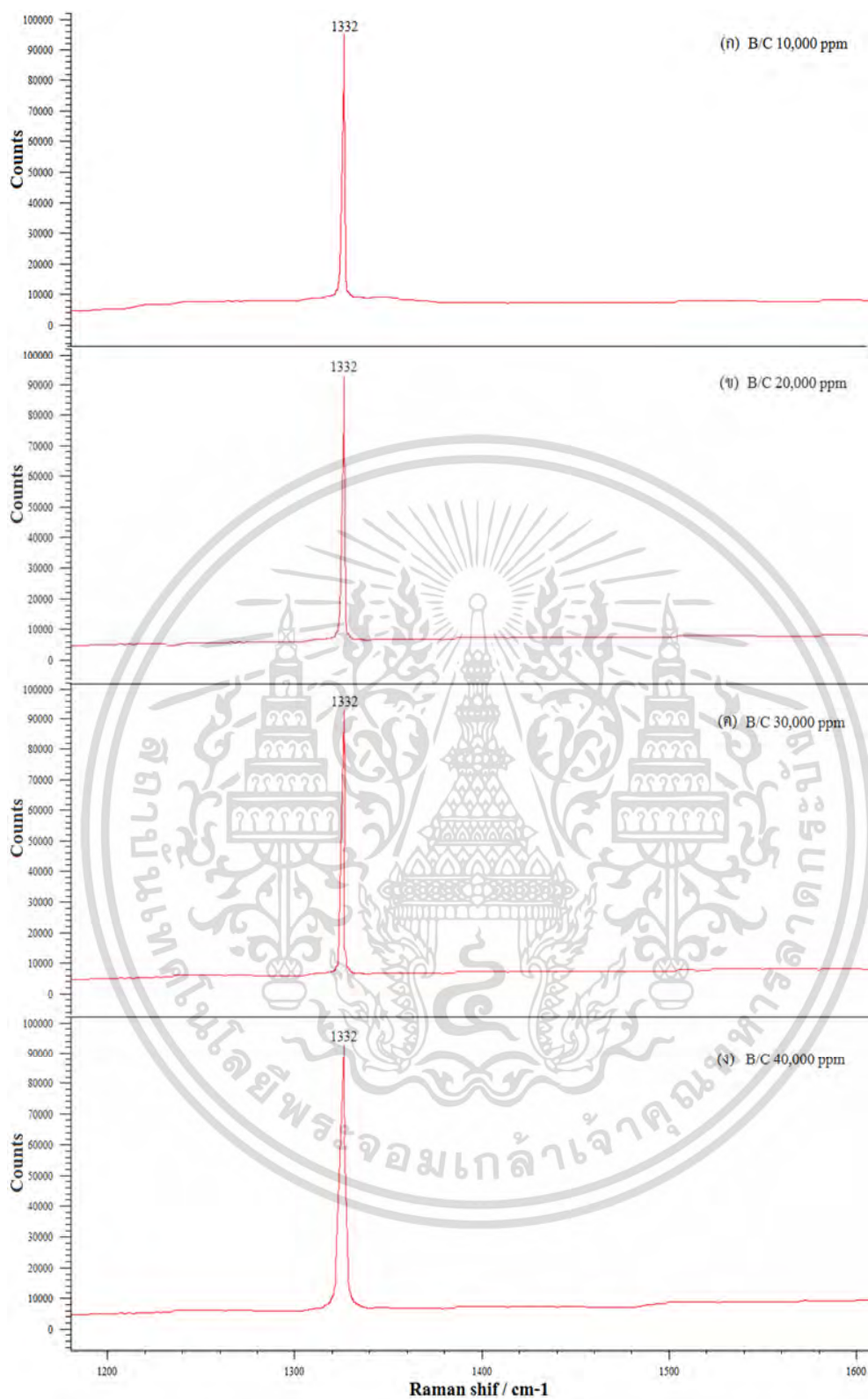
### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

สำหรับผลึกเพชรชนิดพีที่เติมอะตอมสารเจือโบรอนที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 240 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm ก่อนการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลซึ่งจะเห็นได้ว่าพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332 และ 1580  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรและแกรไฟต์ และ 4.13 (ข) แสดงถึงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพี หลังการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332  $\text{cm}^{-1}$  เพียงตำแหน่งเดียวเมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรเพียงอย่างเดียว โดยการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยวิธีการแอนนัลจะทำการแอนนัลทุกๆ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้นที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 จึงสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีที่ได้เติมอะตอมสารเจือที่อัตราส่วน B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ ที่สังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง นั้นมีคุณสมบัติเป็นเพชรทั้งหมด



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมงด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีส (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

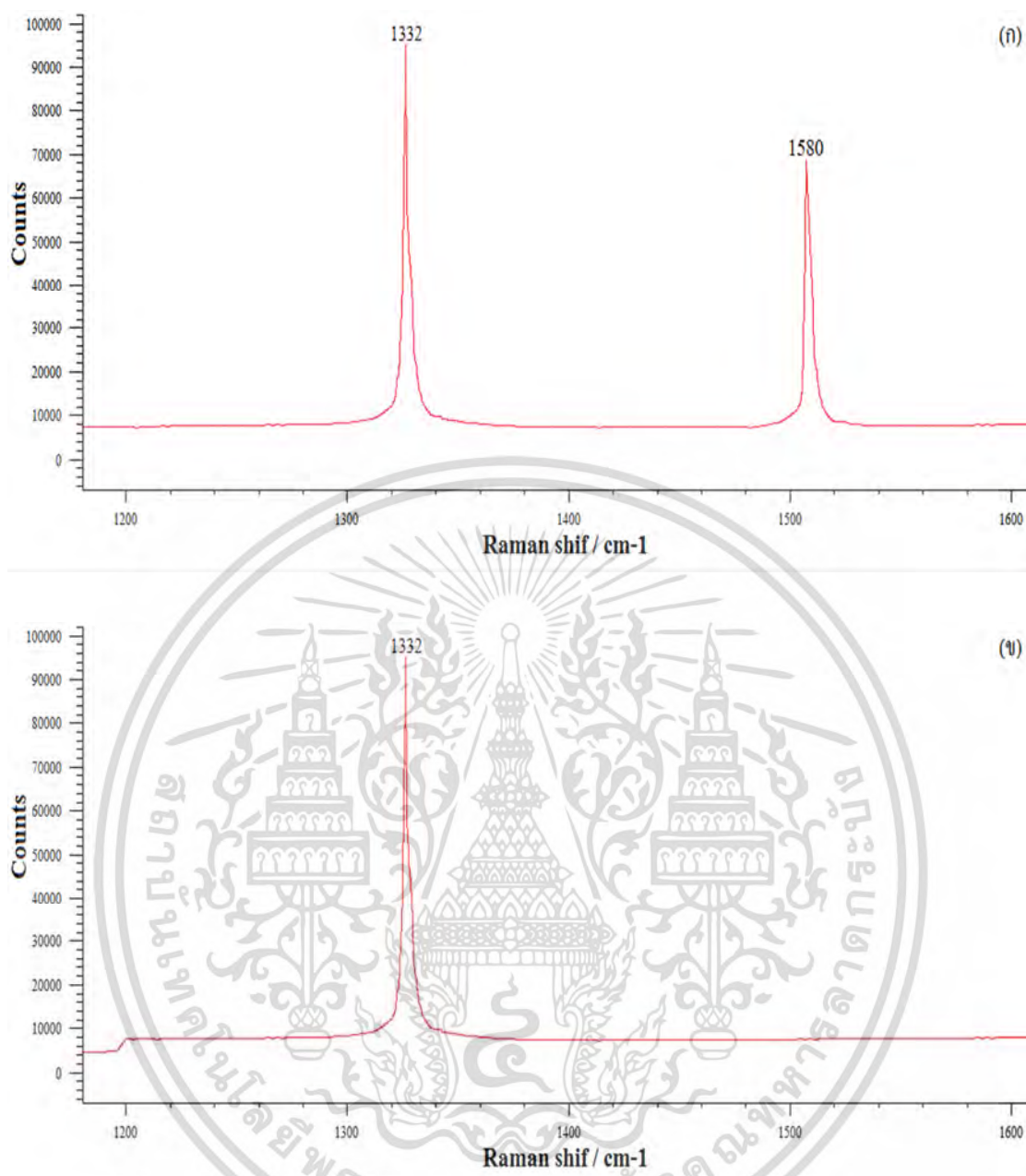


รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมงด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) B/C 10,000 ppm (ข) B/C 20,000 ppm (ค) B/C 30,000 ppm (ง) B/C 40,000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

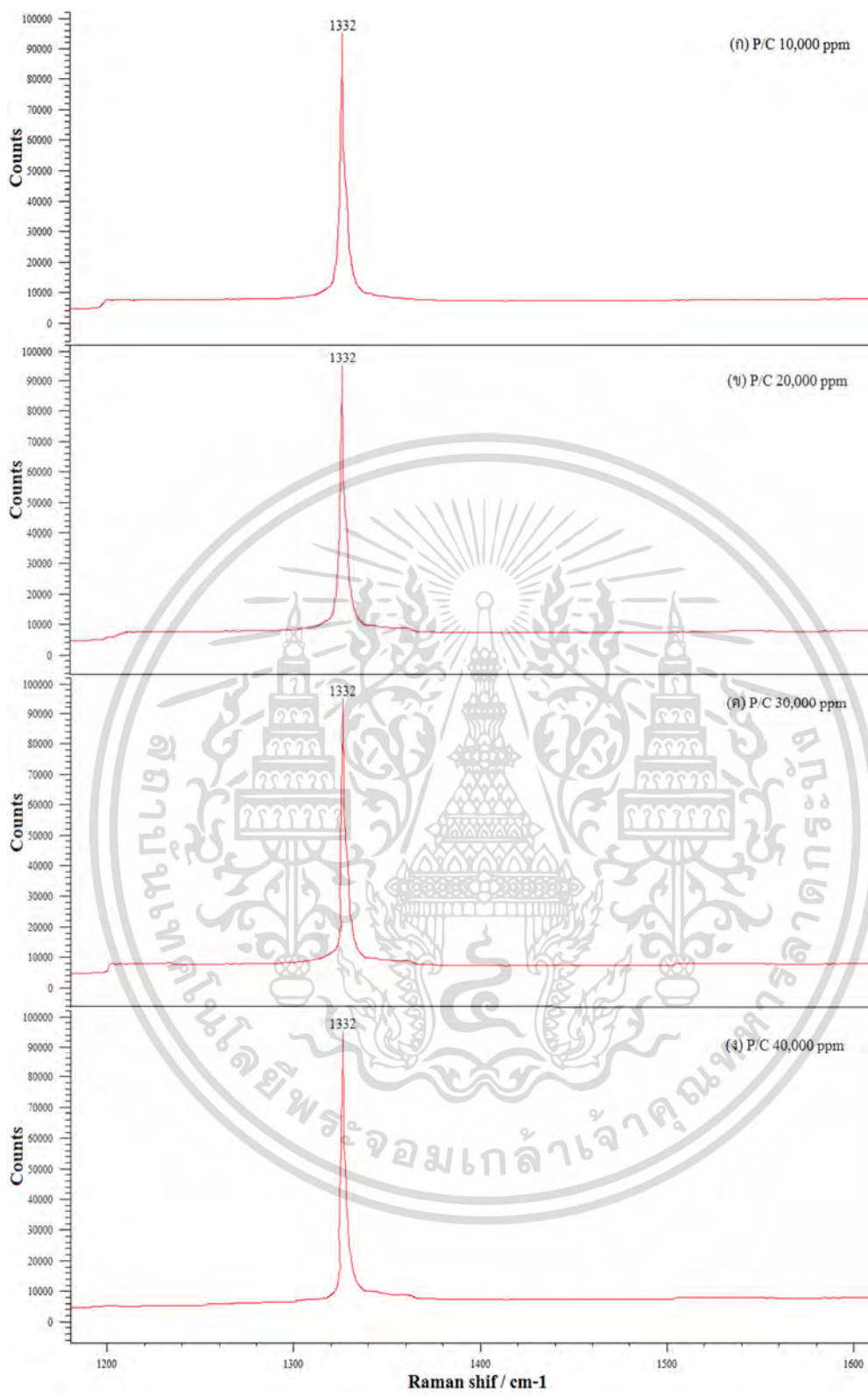
#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ระยะเวลา 240 ชั่วโมงด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

การวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่ระยะเวลารวมทั้งหมดในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.15 (ก) แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm ก่อนการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลซึ่งจะเห็นได้ว่าพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332 และ 1580  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรและแกรไฟต์ และ 4.15 (ข) แสดงถึงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพี หลังการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยการแอนนัลพบตำแหน่งของ Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ 1332  $\text{cm}^{-1}$  เพียงตำแหน่งเดียว เมื่อแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่าเป็นชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชรเพียงอย่างเดียว โดยการปรับปรุงคุณภาพผลึกด้วยวิธีการแอนนัลจะทำการแอนนัลทุกๆ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy พบว่า Raman Spectrum มีค่าอยู่ที่ตำแหน่ง 1332  $\text{cm}^{-1}$  จากนั้นทำการแปรผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 3.5 ในบทที่ 3 ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลารวมทั้งหมดในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง ด้วยการเติมอะตอมสารเจือที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm, 40,000 ppm ตามลำดับ นั้นมีคุณสมบัติเป็นเพชรทั้งหมด



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมงด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm (ก) Raman Spectrum ก่อนการแอนนีส (ข) Raman Spectrum หลังการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมงด้วยการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วย Raman Spectroscopy ที่อัตราส่วนความเข้มข้น (ก) P/C 10,000 ppm (ข) P/C 20,000 ppm (ค) P/C 30,000 ppm (ง) P/C 40,000 ppm

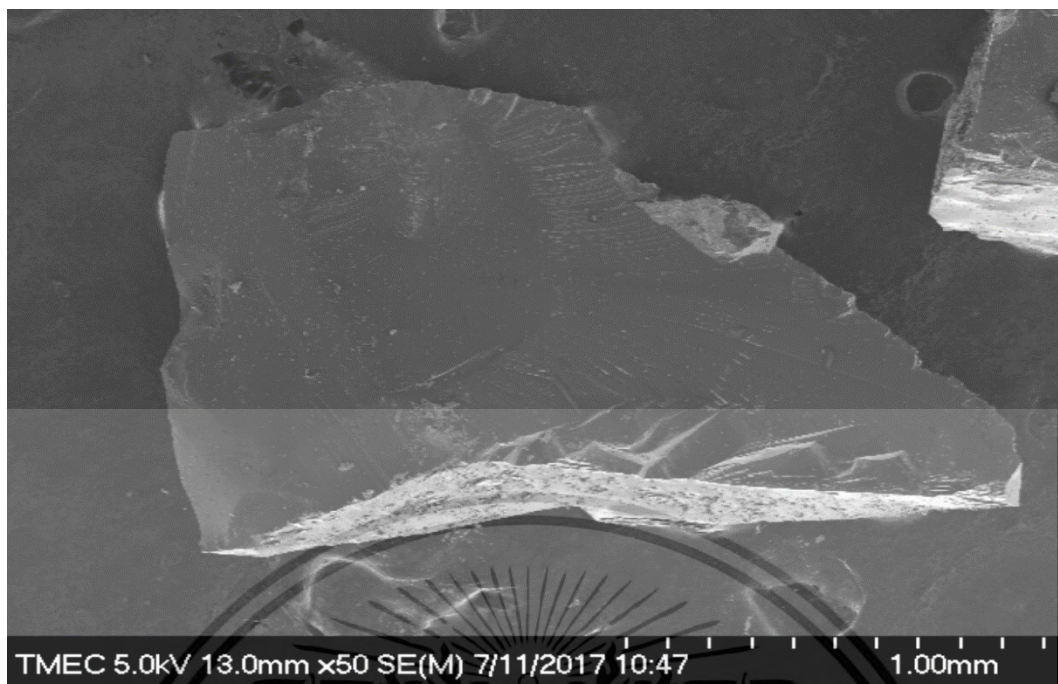
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

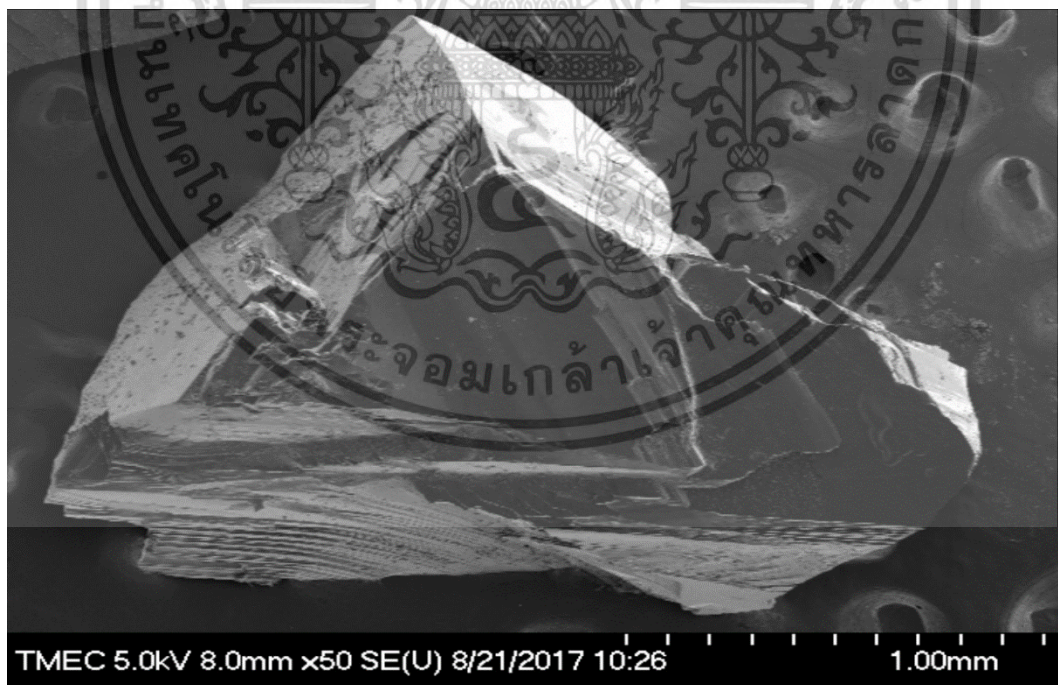
เมื่อสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพี นั้นมีคุณสมบัติเป็นเพชรจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำผลึกเพชรทั้งสองชนิดไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพร้อมกับการวัดขนาด ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) สำหรับผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.17, 4.18, 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ระยะเวลา 240 ชั่วโมงนั้นมีลักษณะและขนาดเท่ากับ 1.901, 2.152, 2.299 และ 2.214 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

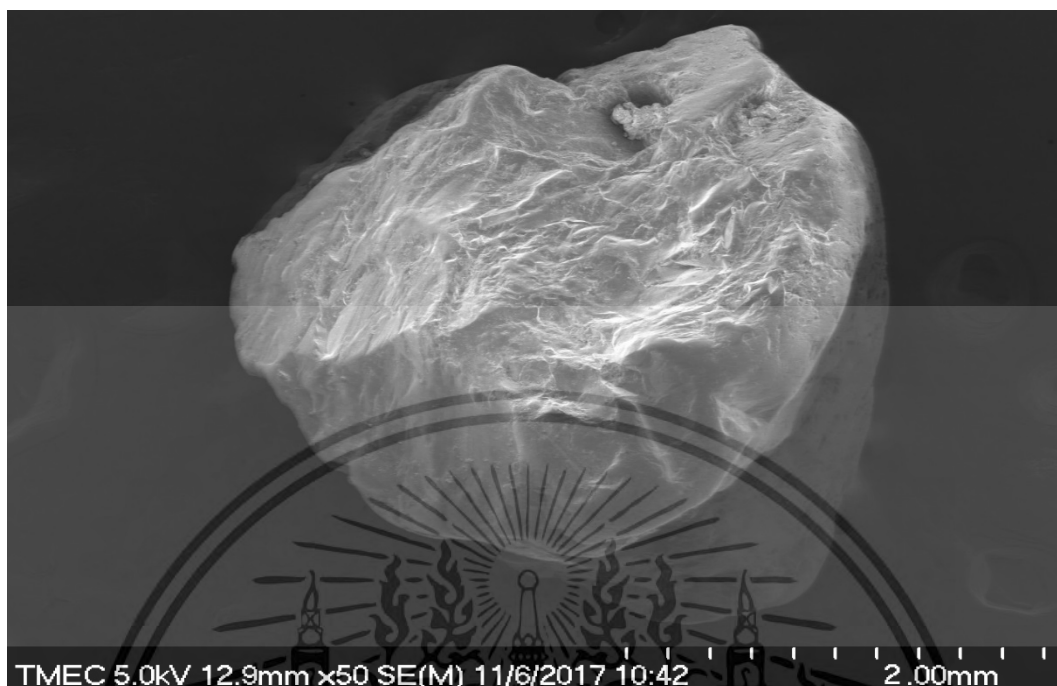


รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

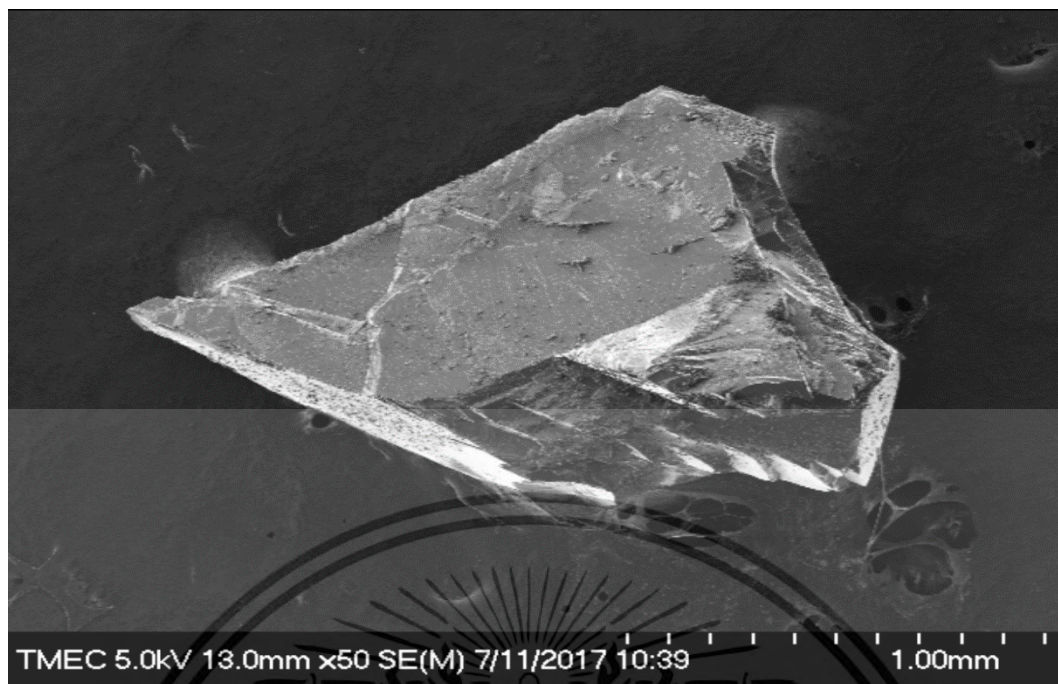
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



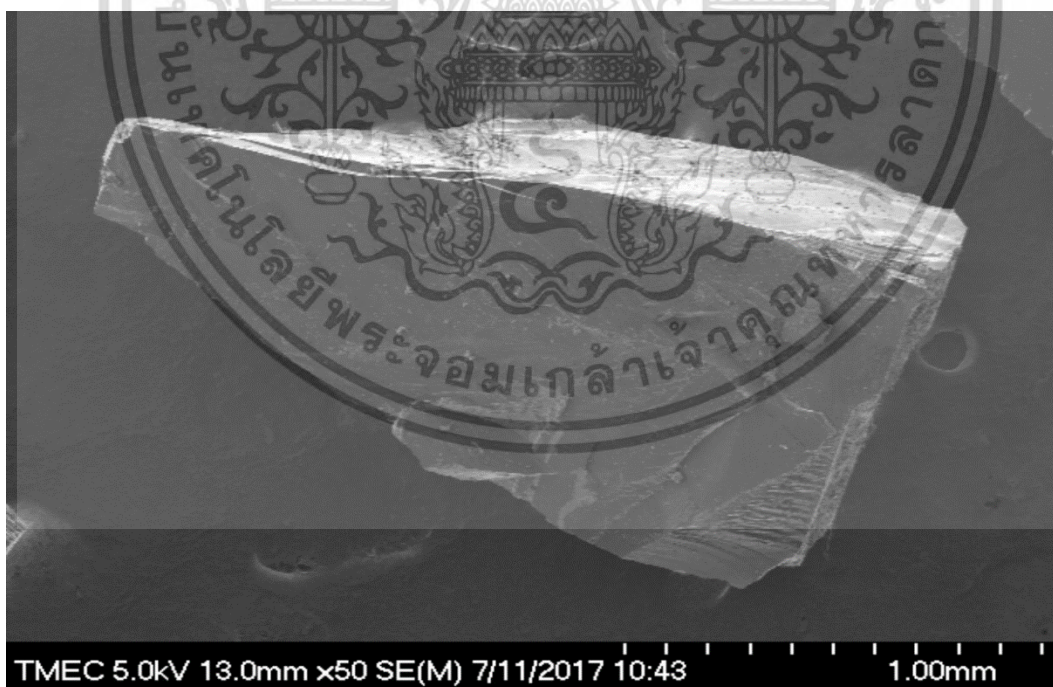
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและวัดขนาดของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy)

เมื่อสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดเอ็นมีคุณสมบัติเป็นเพชรจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำผลึกเพชรชนิดเอ็นไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพร้อมกับทำการวัดขนาด ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) ของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่เติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ที่สังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 และ 4.24 พบว่าผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นมีลักษณะและขนาดของผลึกเท่ากับ 1.863 2.090 2.254 และ 2.216 มิลลิเมตร ตามลำดับ

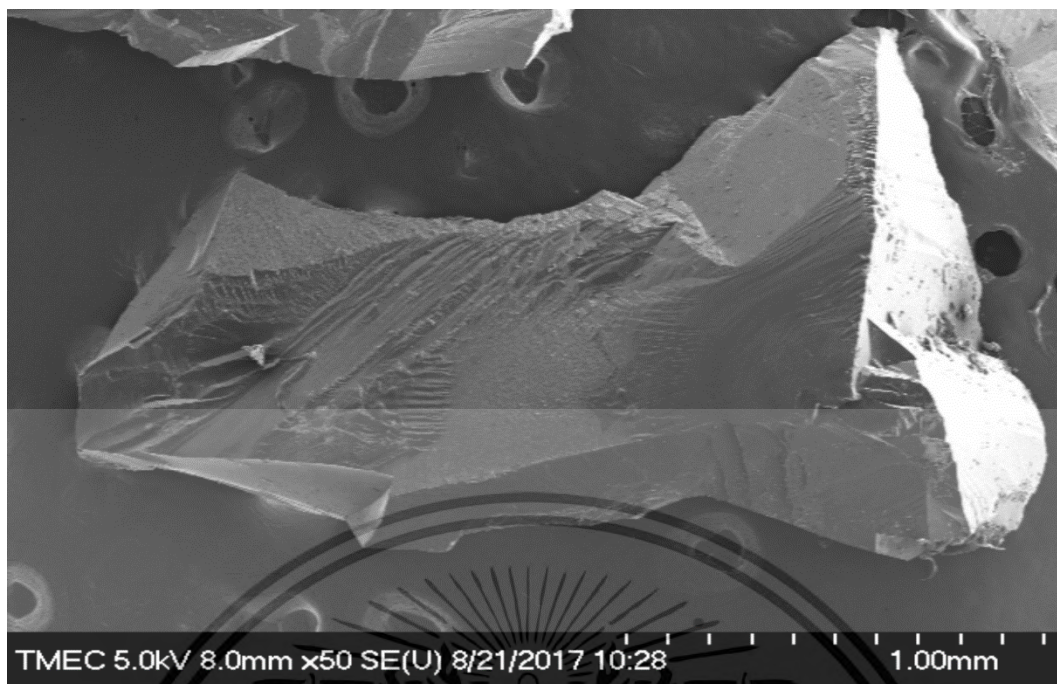


รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

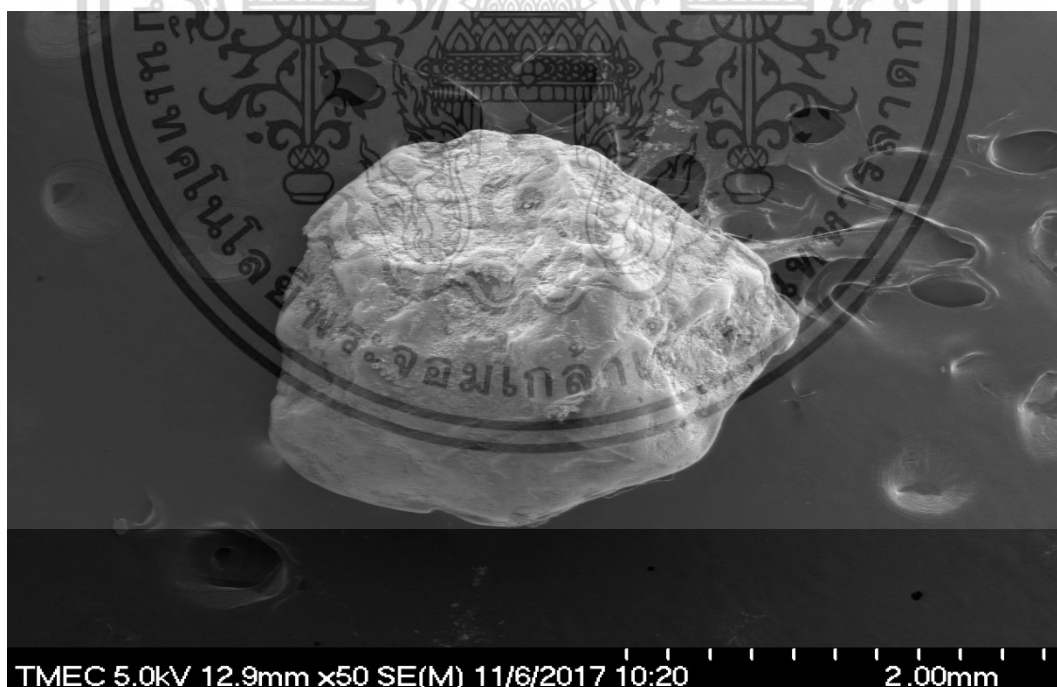


รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

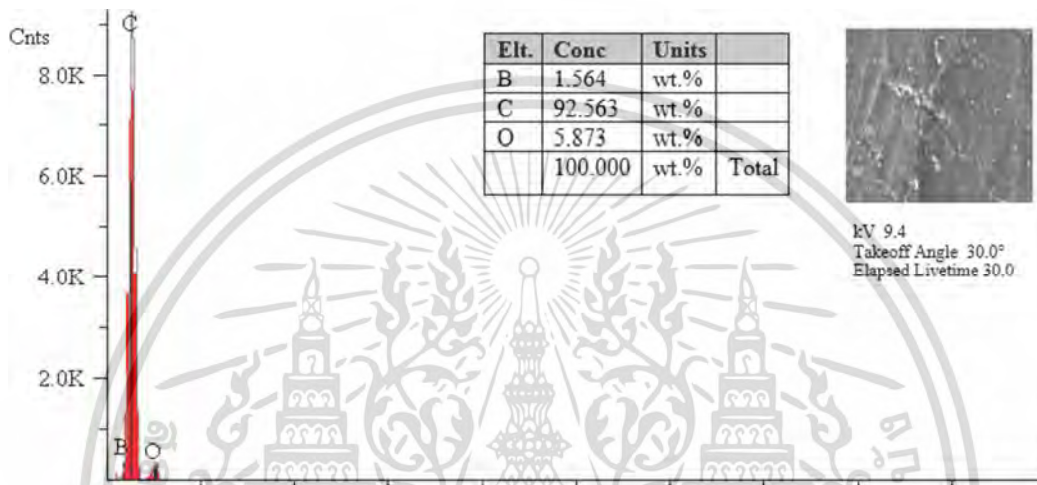


รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

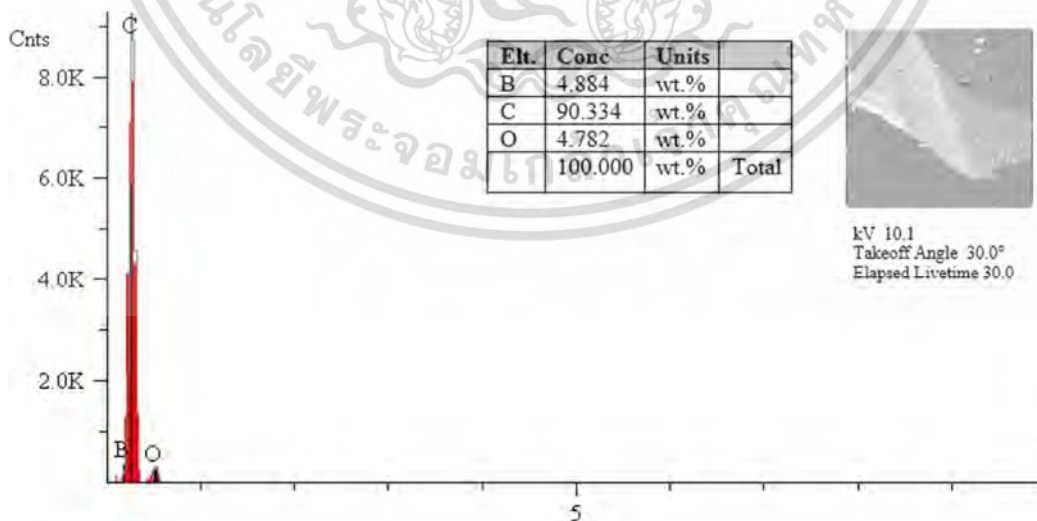
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.2.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วย EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)**

จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) แบบ Pure Element ของผลึกเพชรชนิดพีที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 240 ชั่วโมง โดยผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.25, 4.26, 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ

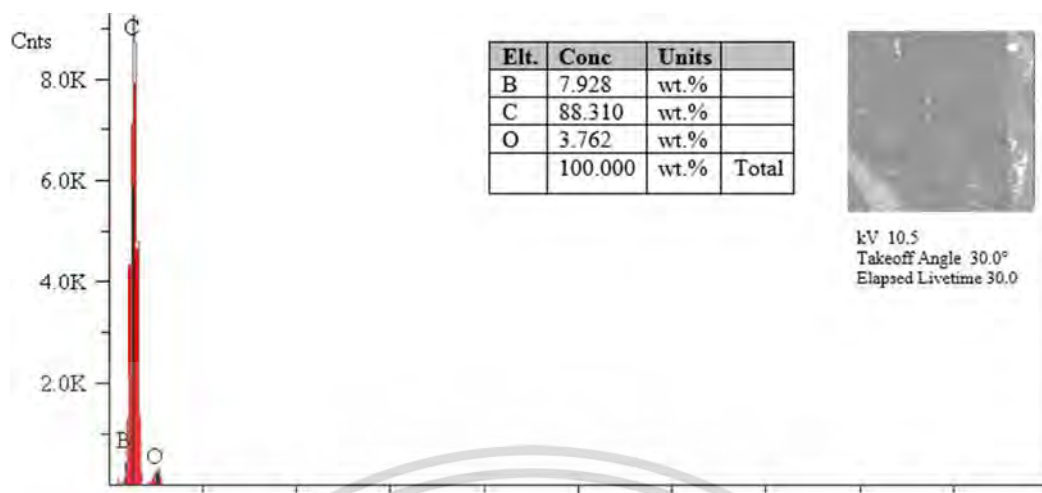


รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

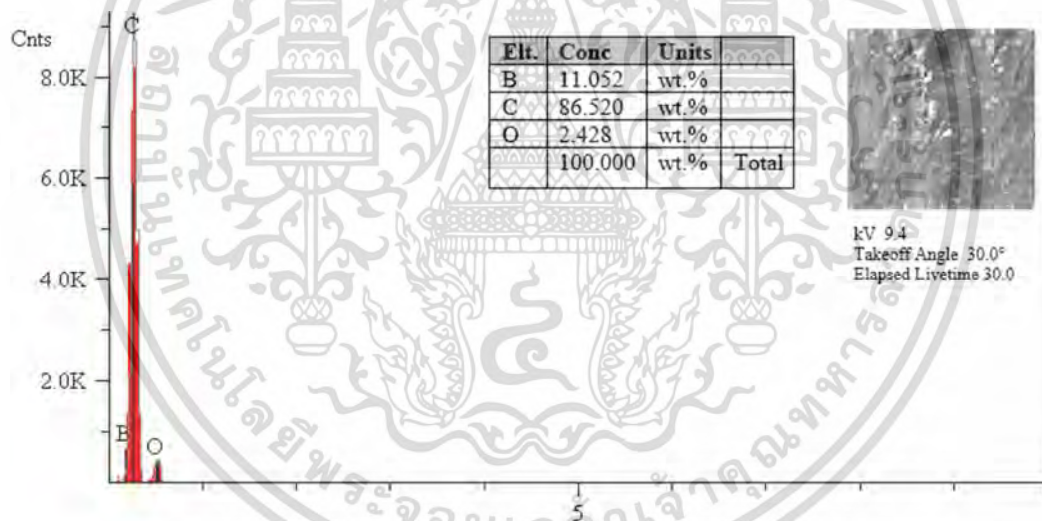


รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)



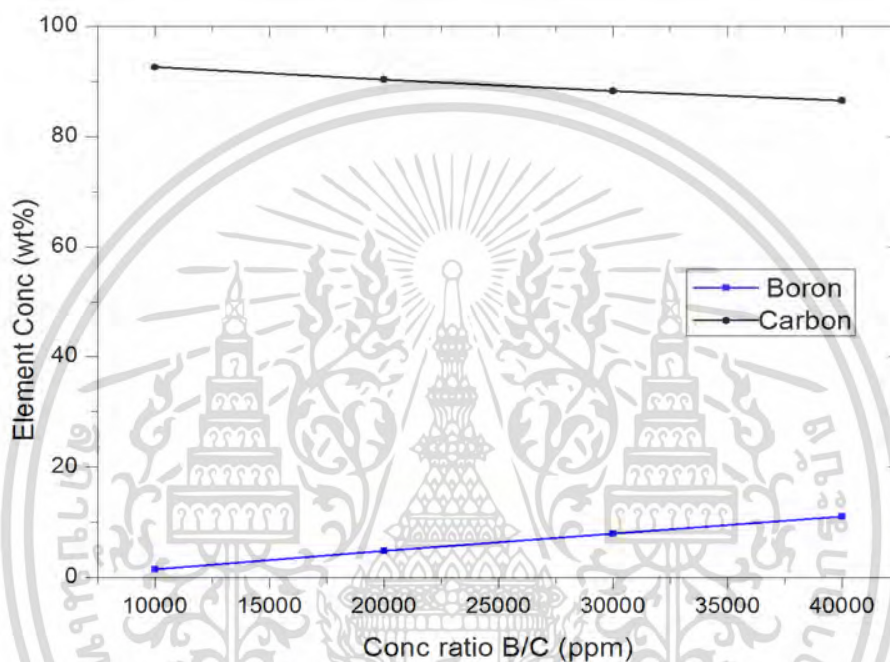
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดพีด้วยเทคนิค EDX ที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถนำค่าที่ได้นั้นมาสรุปเป็นค่าต่างๆดังตารางที่ 4.1 และจากผลการวิเคราะห์นำข้อมูลที่ได้นั้นมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น B/C แสดงดังรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าต่างๆจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ แบบ Pure Element ของผลึกเพชรชนิดพี

อัตราส่วนความเข้มข้น B/C (ppm)	Elt			Units
	Conc B	Conc C	Conc O	
10,000	1.564	92.563	5.873	wt%
20,000	4.884	90.334	4.782	wt%
30,000	7.928	88.310	3.762	wt%
40,000	11.052	86.520	3.428	wt%



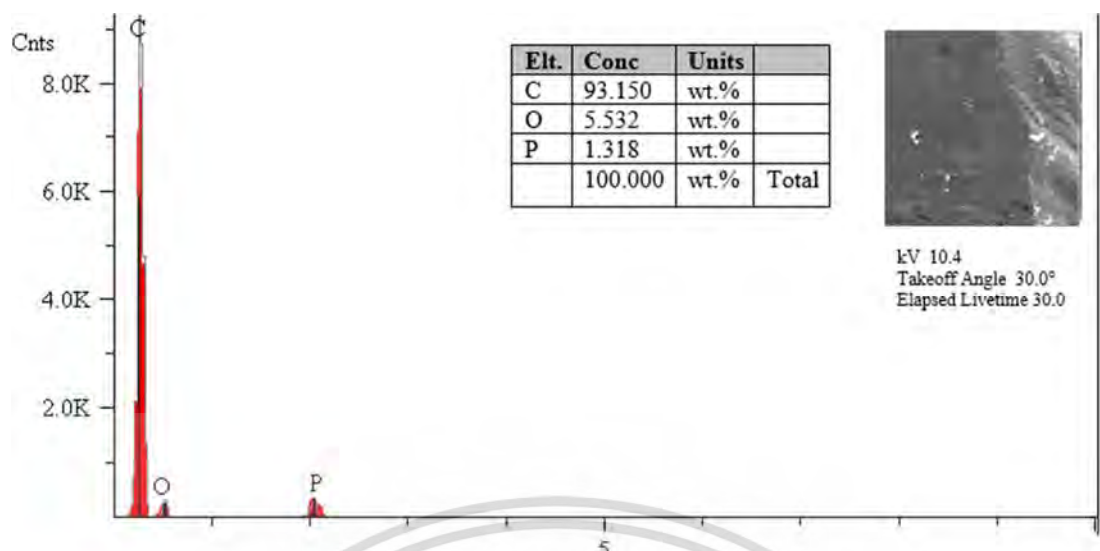
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น B/C

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.29 พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโบรอนนั้นมีค่าเท่ากับ 1.564, 4.884, 7.928 และ 11.052 wt% ตามลำดับ และปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนเท่ากับ 92.563, 90.334, 88.310 และ 86.520 wt% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น B/C มากขึ้นจะพบปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโบรอนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนมีแนวโน้มที่ลดลง

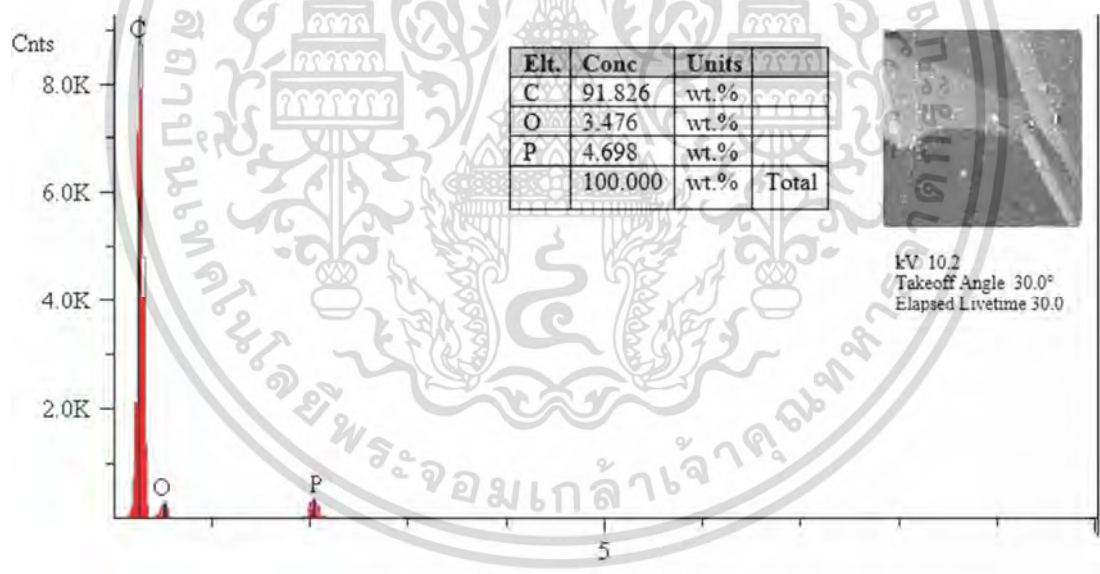
#### 4.2.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วย EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

และในส่วนของการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) แบบ Pure Element ของผลึกเพชรชนิดเอ็น โดยผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

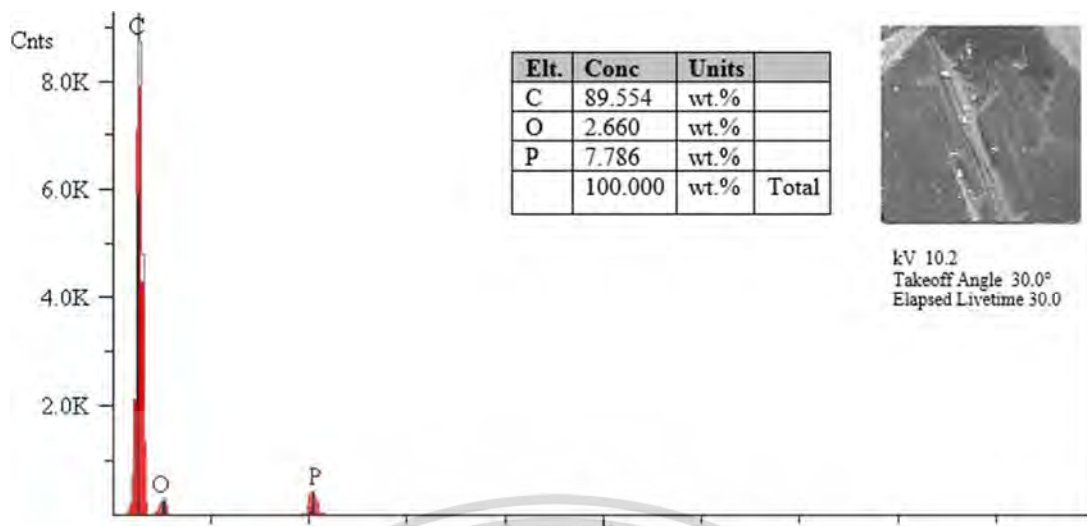


รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

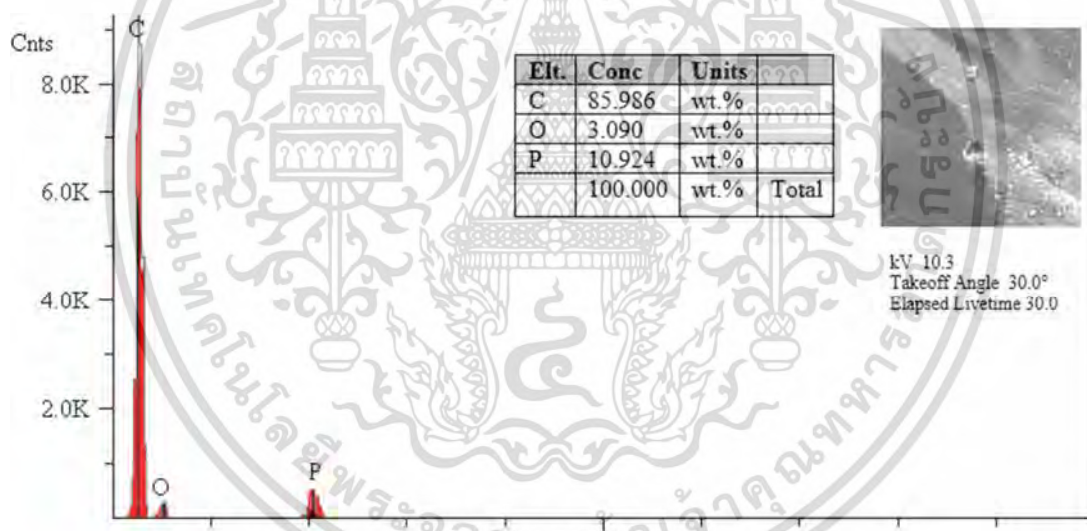


รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)



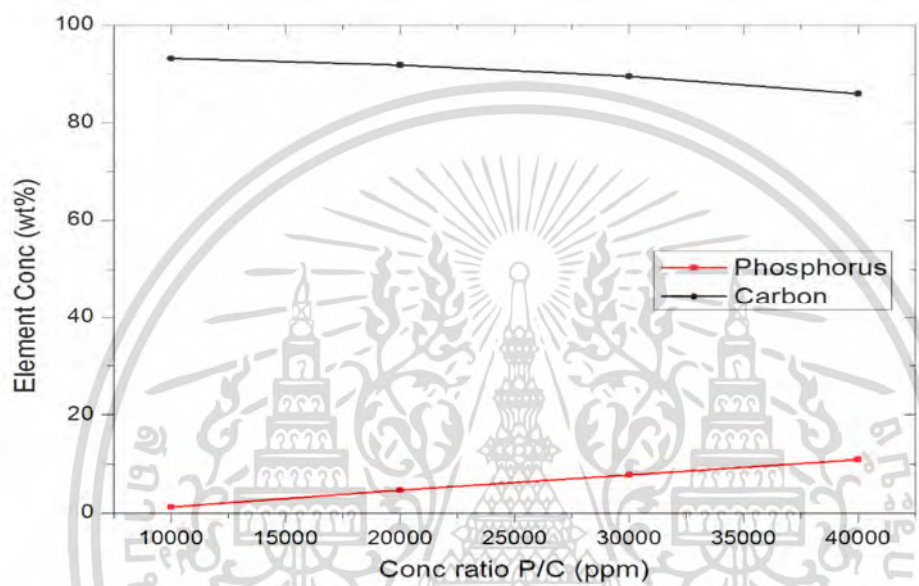
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)

จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรชนิดเอ็นด้วยเทคนิค EDX ที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น นำค่าที่ได้นั้นมาสรุปเป็นค่าต่างๆดังตารางที่ 4.2 และจากการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2 สามารถนำข้อมูลที่ได้นั้นมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น P/C แสดงดังรูปที่ 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าต่างๆจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ แบบ Pure Element ของผลึกเพชรชนิดเอ็น

อัตราส่วนความเข้มข้น P/C (ppm)	Elt			Units
	Conc C	Conc O	Conc P	
10,000	93.150	5.532	1.318	wt%
20,000	91.826	3.476	4.698	wt%
30,000	89.554	2.66	7.786	wt%
40,000	85.986	3.09	10.924	wt%



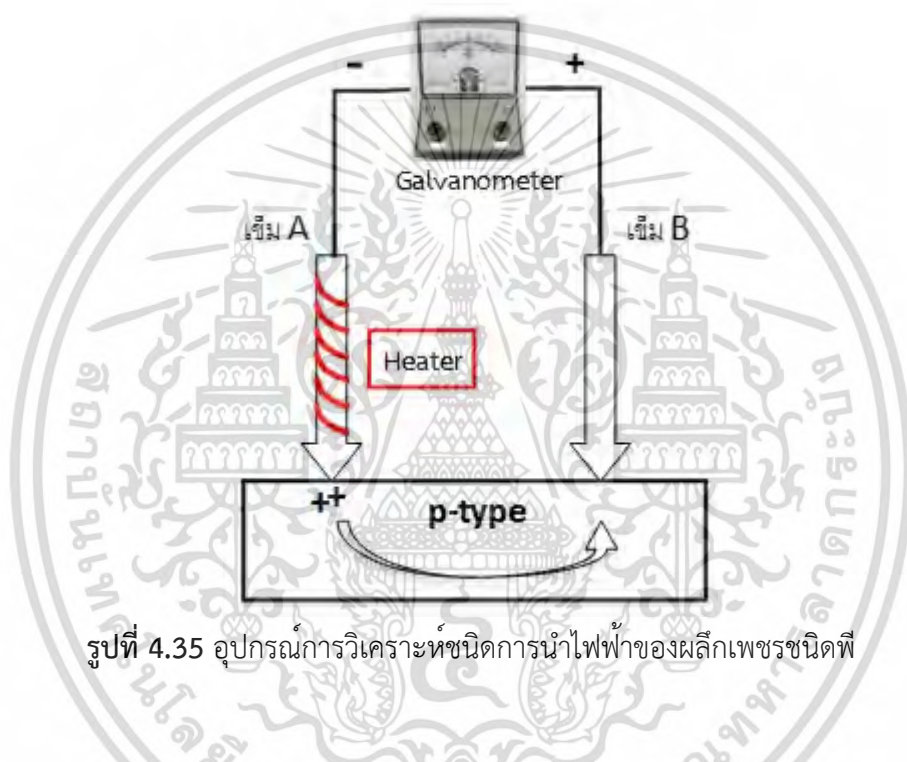
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณกับอัตราส่วนความเข้มข้น P/C

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.34 พบว่าปริมาณของฟอสฟอรัสนั้นมีค่าเท่ากับ 1.318, 4.698, 7.786 และ 10.924 wt% ตามลำดับ และปริมาณของคาร์บอนเท่ากับ 93.150, 91.826, 89.554 และ 85.986 wt% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น P/C มากขึ้นจะพบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของฟอสฟอรัสนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากขึ้น และปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนมีแนวโน้มที่ลดลง

4.2.7 ผลการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธี Hot-Point Probe

จากการวิเคราะห์ชนิดของพาหะส่วนมากของผลึกเพชรชนิดพีที่ค่าอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีเข็มร้อน (Hot-point probe) ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งประกอบด้วยชุดอุปกรณ์เข็ม 2 เล่ม จี้ติดบนผลึกเพชร โดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็นเข็มความร้อน ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง พบว่าผลการวิเคราะห์หลังจากให้ความร้อนแก่เข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลป์มานอมิเตอร์นั้นชี้ไปทางด้านบวก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่บริเวณเข็มร้อน (เข็ม A) มีพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้มีประจุโฮลเพิ่มขึ้น ซึ่งมีพลังงานที่สูงกว่าประจุโฮลที่บริเวณอื่นๆ ดังนั้นทำให้ประจุโฮลดังกล่าวแพร่กระจายออกไปรอบๆ ซึ่งทำให้เกิดการแพร่ของประจุโฮลไหลจากเข็มร้อนไปยังเข็มที่เย็นกว่า ทำให้บริเวณเข็มร้อนขาดประจุไฟฟ้าบวก ส่งผลให้มีศักย์เป็นลบและในส่วนเข็มเย็นนั้นจะมีศักย์เป็นบวก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลจากเข็มเย็นไปยังเข็มร้อน ซึ่งแสดงว่าประจุนั้นเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอิมิตอร์ทางขั้วบวก ทำให้เข็มของกัลป์วานอิมิตอร์ชี้เบนไปทางด้านบวก ดังนั้นพหุผลหลักในการนำกระแสของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C ที่ค่าต่างๆดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วคือ โฮล จึงเป็นข้อมูลที่สามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี



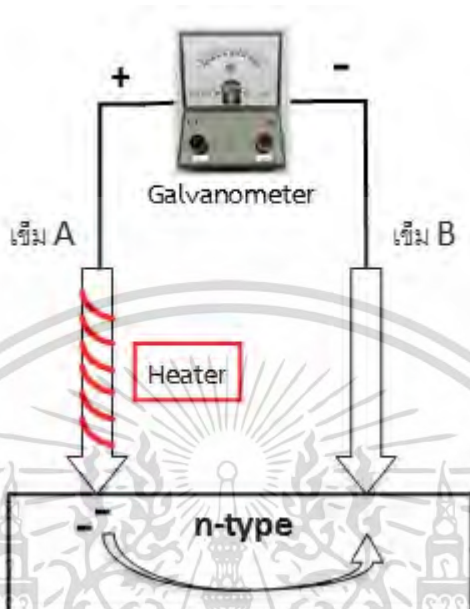
รูปที่ 4.35 อุปกรณ์การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพี

#### 4.2.8 ผลการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง ด้วยวิธี Hot-Point Probe

ในทำนองเดียวกันการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ค่าอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง ด้วยวิธีเข็มร้อน (Hot-point probe) ดังรูปที่ 4.36 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์หลังจากให้ความร้อนแก่เข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลป์วานอิมิตอร์นั้นชี้ไปทางด้านลบ โดยที่บริเวณเข็มร้อน (เข็ม A) มีพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้มีประจุอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ทำให้มีพลังงานที่สูงกว่าประจุอิเล็กตรอนที่บริเวณอื่นๆ ดังนั้นทำให้เกิดการแพร่ของประจุอิเล็กตรอนดังกล่าวกระจายออกไปรอบๆ โดยไหลจากเข็มร้อนไปยังเข็มที่เย็นกว่า ทำให้บริเวณเข็มร้อนนั้นขาดประจุไฟฟ้าลบส่งผลให้มีศักย์เป็นบวก และในส่วนเข็มเย็นนั้นจะมีศักย์เป็นลบ ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลจากเข็มเย็นไปยังเข็มร้อน ซึ่งแสดงว่าประจุนั้นเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิเตอร์ทางซ้ายลบ ทำให้เข็มของกัลวานมิเตอร์ชี้เบนไปทางด้านลบ ดังนั้นพหุหลักในการนำกระแสของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C ที่ค่าต่างๆดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว คือ อิเล็กตรอน จึงเป็นข้อมูลที่สามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 4.36 อุปกรณ์การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็น

จากการวิเคราะห์ชนิดของพหุส่วนมากของผลึกเพชรพีและชนิดเอ็นจากเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วสามารถนำมาสรุปทิศของเข็มกัลวานมิเตอร์ที่ชี้เบนไปทางด้านบวกและลบ และชนิดสารกึ่งตัวนำผลึกเพชรที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นแสดงในตารางที่ 4.3

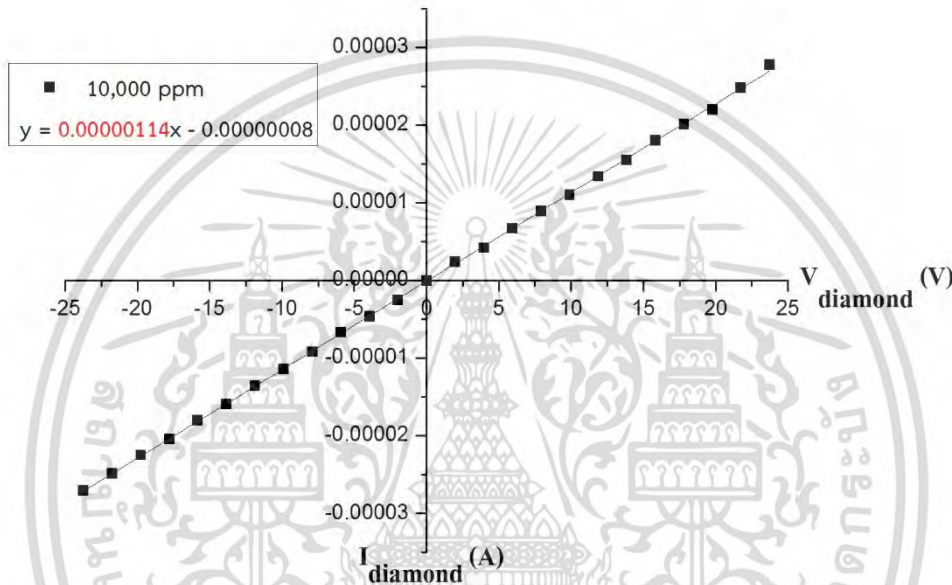
ตารางที่ 4.3 ชนิดของพหุส่วนมากของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Hot-Point Probe

ผลึกเพชรสังเคราะห์	ทิศของเข็มกัลวานมิเตอร์	ชนิด
(B/C) 10,000 ppm	บวก	p
(B/C) 20,000 ppm	บวก	p
(B/C) 30,000 ppm	บวก	p
(B/C) 40,000 ppm	บวก	p
(P/C) 10,000 ppm	ลบ	n
(P/C) 20,000 ppm	ลบ	n
(P/C) 30,000 ppm	ลบ	n
(P/C) 40,000 ppm	ลบ	n

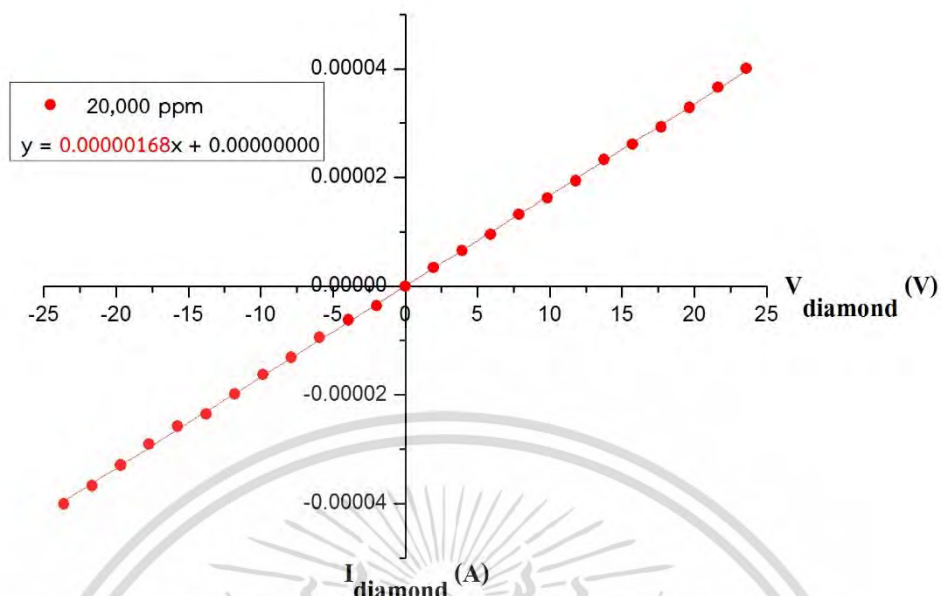
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.9 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง

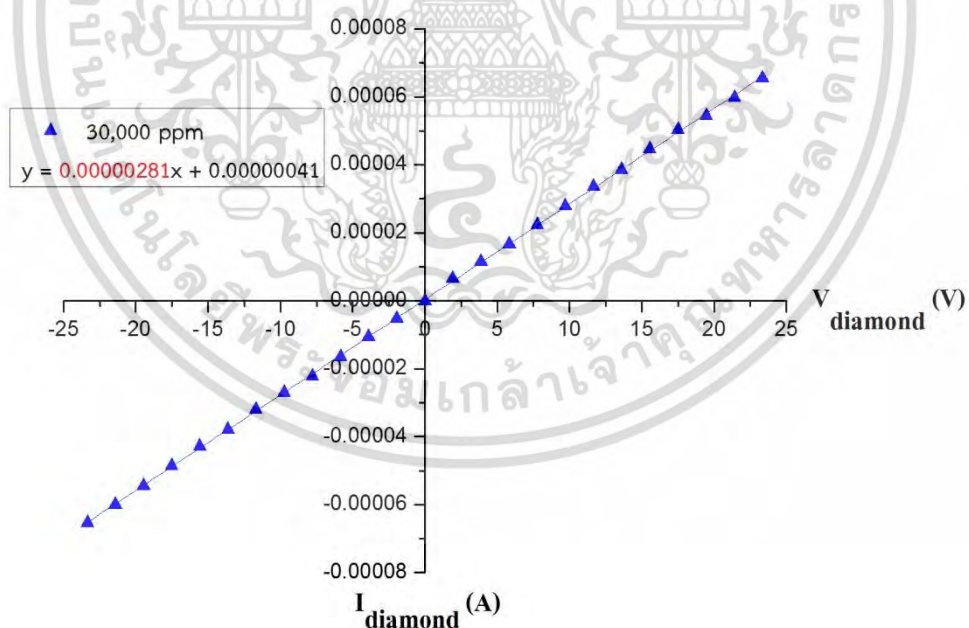
หลังจากที่นำผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm และ 40,000 ppm ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 240 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว จึงทำการสร้างขั้วสัมผัสโพลีเมอร์ด้วยกาวยกเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ตามเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวในข้างต้น ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.37, 4.38, 4.39 และ 4.40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm

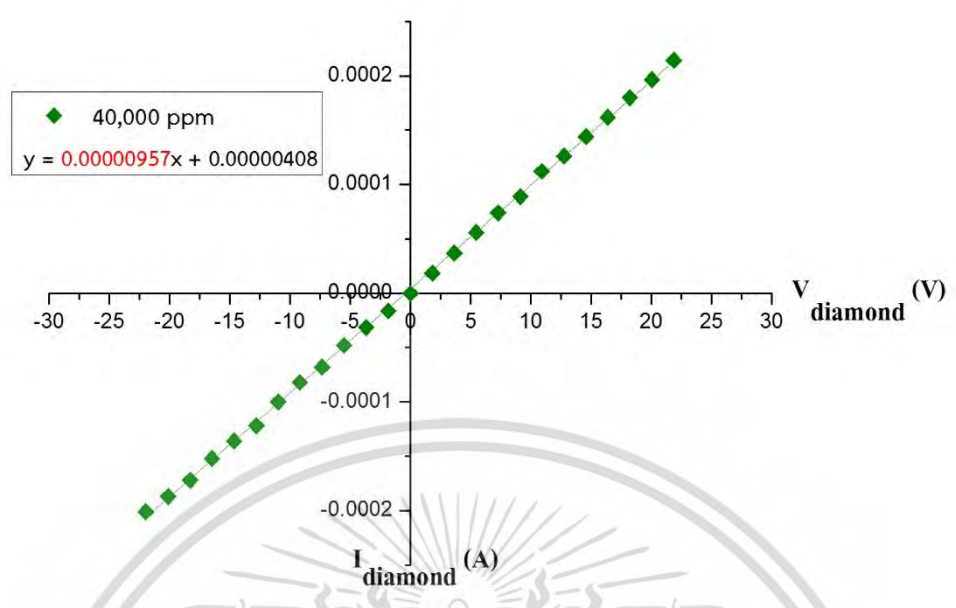


รูปที่ 4.38 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของฟลิกเพอร์ชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 20,000 ppm



รูปที่ 4.39 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของฟลิกเพอร์ชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 30,000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

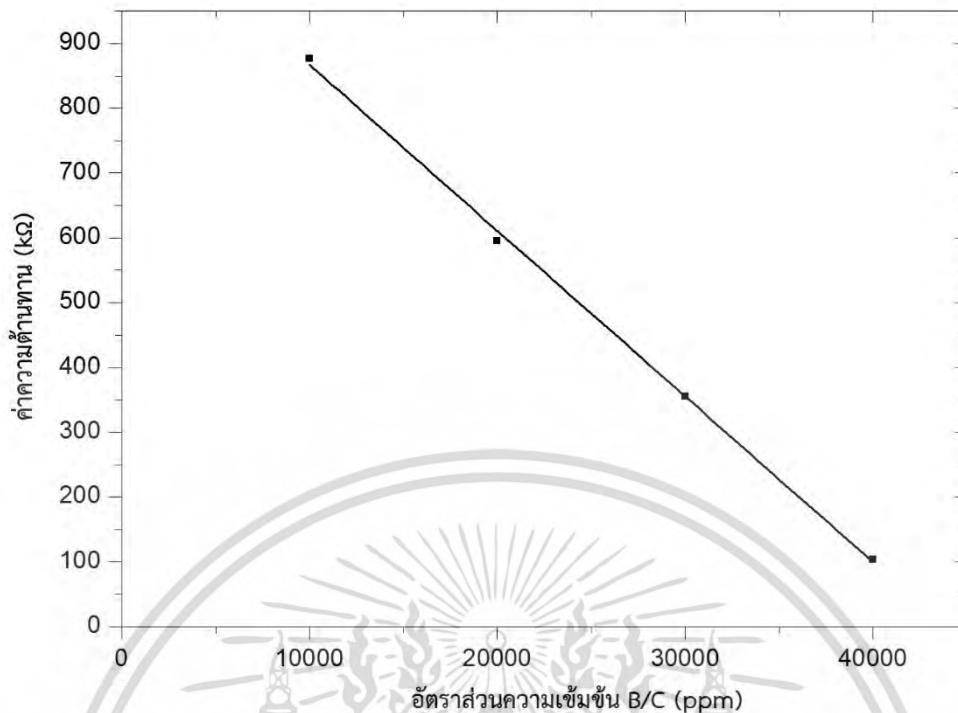


รูปที่ 4.40 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีในอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 40,000 ppm

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ดังรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.40 แล้วทำการสรุปค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น B/C เพิ่มมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้นั้นมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีกับที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.41

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ

อัตราส่วนความเข้มข้น B/C (ppm)	ค่าความต้านทาน (kΩ)
10,000	877.19
20,000	595.23
30,000	355.87
40,000	104.49

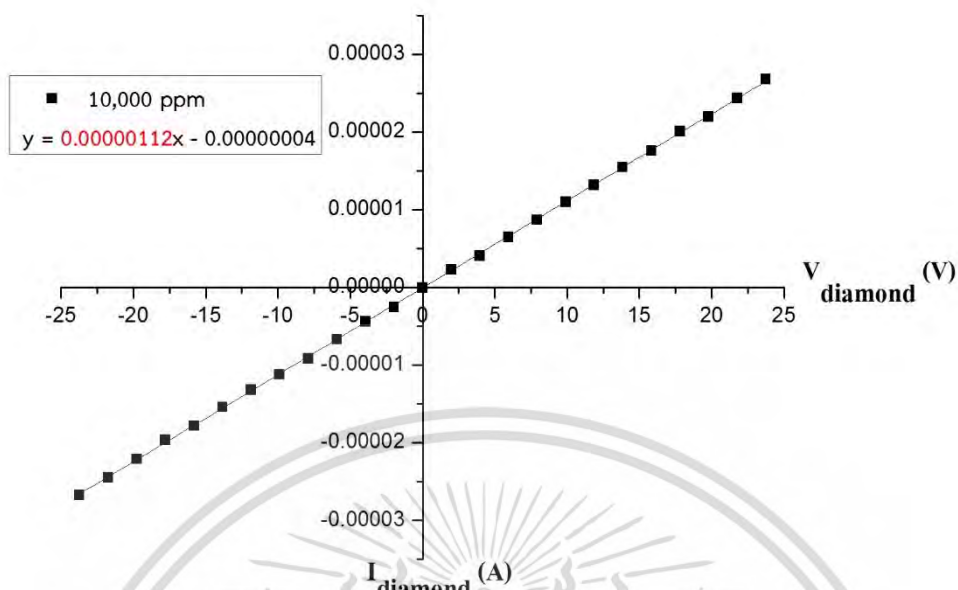


รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีกับที่อัตราส่วนความเข้มข้น B/C ที่ใช้ในการสังเคราะห์

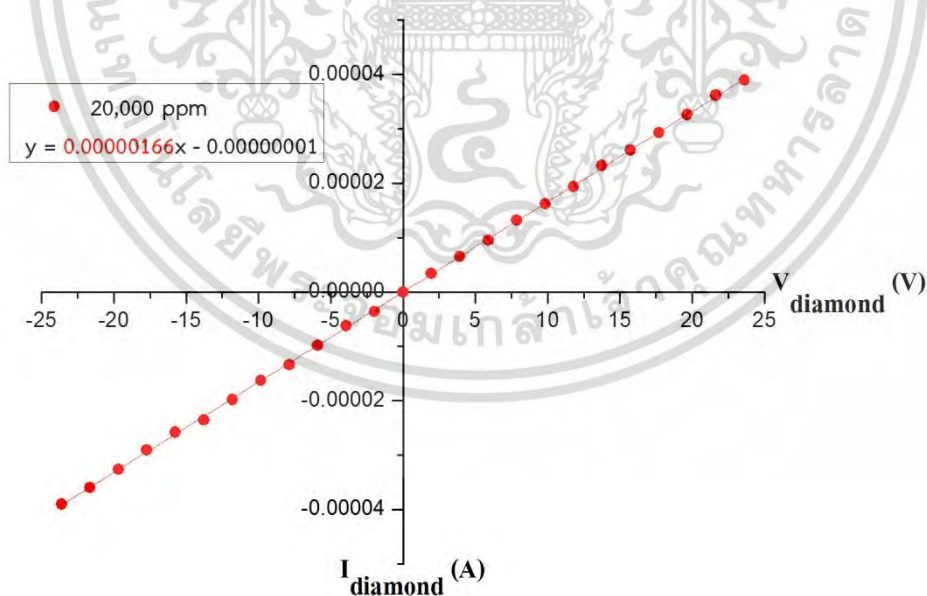
พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.41 พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความเข้มข้น B/C มากขึ้น ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 และ 40,000 ppm ตามลำดับ ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 877.19 kΩ, 595.23 kΩ, 355.87 kΩ และ 104.49 kΩ ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง

#### 4.2.10 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์เป็นเวลา 240 ชั่วโมง

และในส่วนของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 และ 40,000 ppm ตามลำดับ ที่ทำการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 240 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว จึงทำการสร้างขั้วสัมผัสโหนดมิกด้วย กาวเงินเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ตามเงื่อนไข ดังที่กล่าวมาข้างต้น แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.42, 4.43, 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ

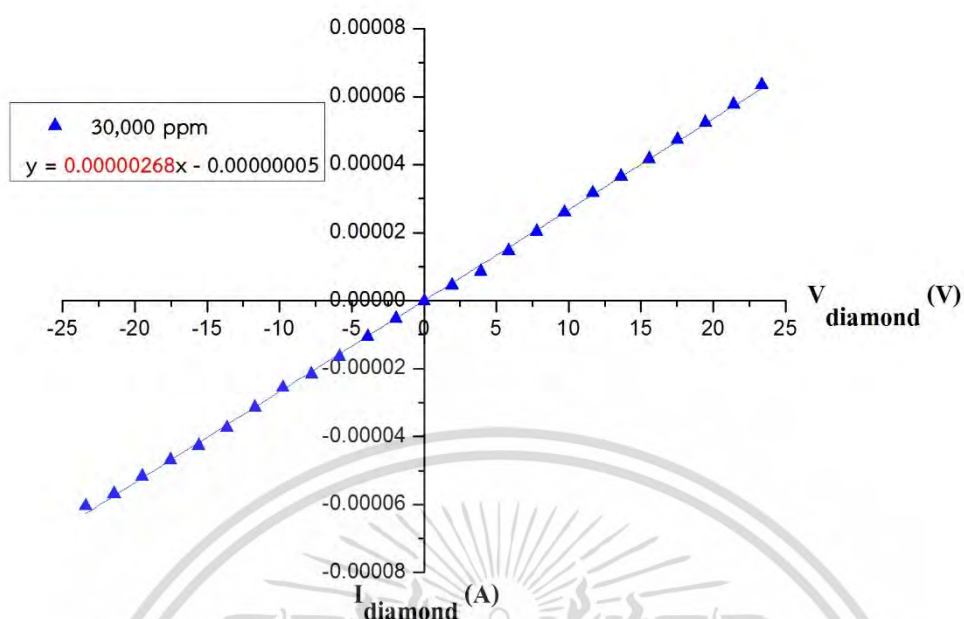


รูปที่ 4.42 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 ppm

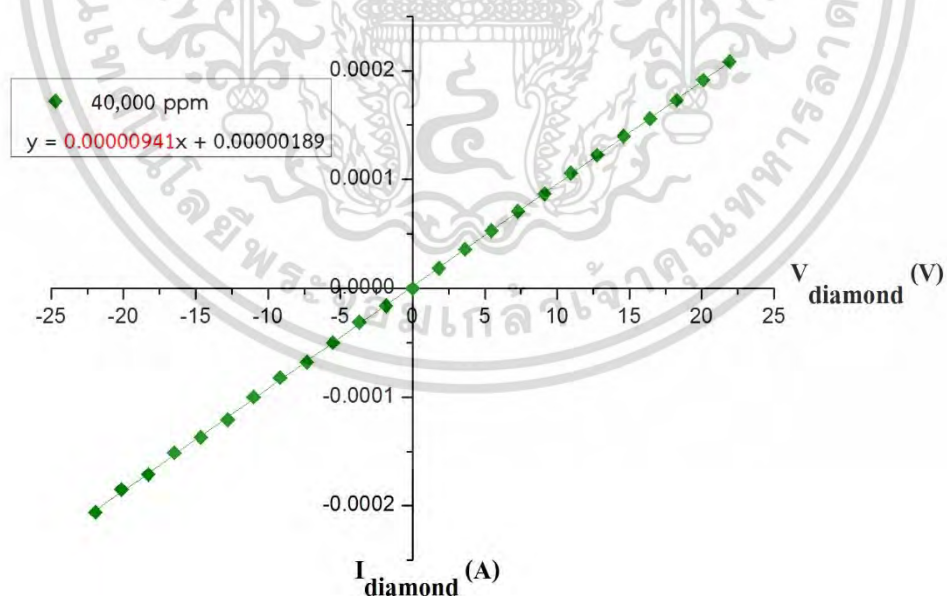


รูปที่ 4.43 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 20,000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 30,000 ppm



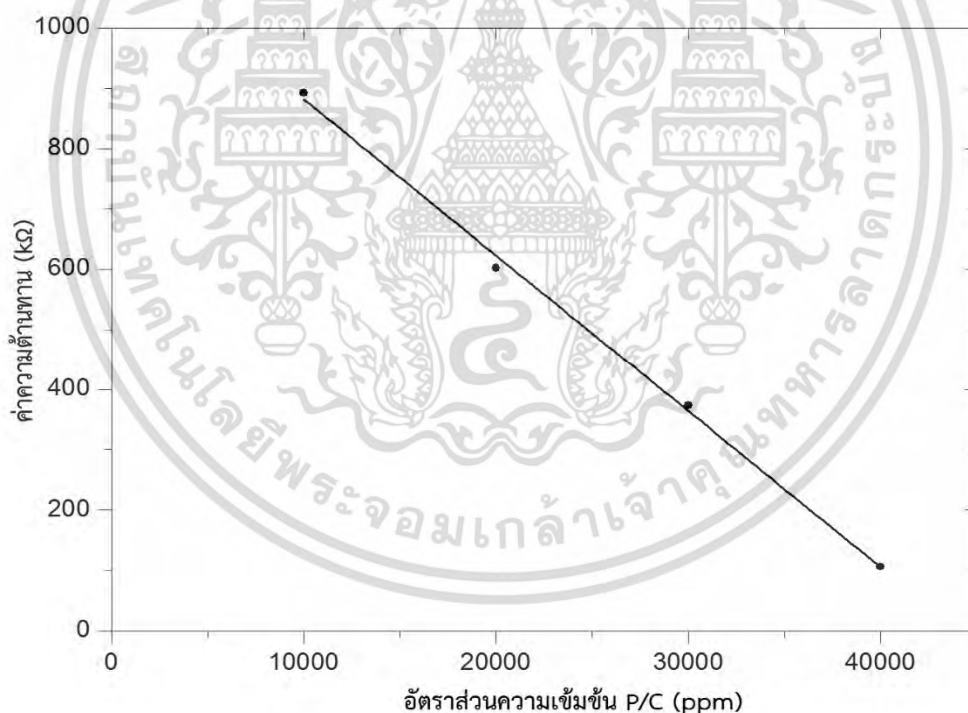
รูปที่ 4.45 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นในอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 40,000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟดังรูปที่ 4.42, 4.43, 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ แล้วทำการสรุปค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น P/C เพิ่มมากขึ้น จากตารางที่ 4.5 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดเอ็นกับที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C ที่ใช้ในการสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.46

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ

อัตราส่วนความเข้มข้น P/C (ppm)	ค่าความต้านทาน (k $\Omega$ )
10,000	892.85
20,000	602.40
30,000	373.13
40,000	106.26



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดเอ็นกับที่อัตราส่วนความเข้มข้น P/C ที่ใช้ในการสังเคราะห์

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.46 พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความเข้มข้น P/C มากขึ้น ค่าความต้านทานที่ได้นั้นจะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000, 20,000 30,000 และ 40,000 ppm ตามลำดับ ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 892.85 k $\Omega$ , 602.40 k $\Omega$ , 373.13 k $\Omega$  และ 106.26 k $\Omega$  ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเพื่อนำเสนอกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรเอ็กทรินซิค ด้วยวิธี HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน และฟอสฟอรัส ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 240 ชั่วโมง ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียสทุกๆ 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 12 นาที โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีที่ อัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 20,000 30,000 40,000 ppm ตามลำดับ และชนิดเอ็นที่ อัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000 20,000 30,000 40,000 ppm ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy พบว่าตำแหน่งยอดของ Raman Spectrum ของผลึกเพชรทั้งสองชนิดที่สังเคราะห์ขึ้นตามเงื่อนไขข้างต้น มีค่าอยู่ที่ ตำแหน่ง  $1332\text{ cm}^{-1}$  ทั้งหมด และนำไปแปลผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของ คาร์บอน จึงสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นนั้นมีคุณสมบัติ เป็นเพชรทั้งหมด จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) พบว่าผลึกเพชรชนิดพีมีขนาดของผลึกเท่ากับ 0.592, 0.637, 0.604 และ 0.628 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผลึกเพชรชนิดเอ็นมีขนาดของผลึกเท่ากับ 0.624, 0.597, 0.610 และ 0.625 มิลลิเมตร ตามลำดับ

หลังจากนั้นคัดเลือกผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในแต่ละเงื่อนไขมา สังเคราะห์ต่อเพื่อเพิ่มขนาดรวมเป็นระยะเวลาทั้งหมด 240 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy อีกครั้ง พบว่าผลึกเพชรทั้งสองชนิดที่ทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดผลึก ตามเงื่อนไขข้างต้น มีค่าตำแหน่งยอดของ Raman Spectrum อยู่ที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ทั้งหมด และเมื่อนำไปแปลผลเปรียบเทียบกับตารางการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอน ทำให้ยืนยันได้ว่ามี คุณสมบัติเป็นเพชรทั้งหมด จากนั้นนำผลึกเพชรทั้งสองชนิดที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขข้างต้น ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพร้อมกับทำการวัดขนาด ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) พบว่าผลึกเพชรชนิดพีมีขนาดเท่ากับ 1.901, 2.152, 2.299 และ 2.214 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผลึกเพชรชนิดเอ็นมีขนาดเท่ากับ 1.863 2.090 2.254 และ 2.216 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) แบบ Pure Element จากการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดพีนั้นทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณ กับอัตราส่วนความเข้มข้น B/C พบว่าปริมาณของโบรอนนั้นมีค่าเท่ากับ 1.564 4.884 7.928 และ 11.052 wt% ตามลำดับ และปริมาณของคาร์บอนเท่ากับ 92.563 90.334 88.310 และ 86.520 wt% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น B/C มากขึ้นจะพบปริมาณเปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักของโบรอนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วยและปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนมี แนวโน้มที่ลดลง ในส่วนการวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุเชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอัตราส่วนความเข้มข้น P/C พบว่าปริมาณของฟอสฟอรัสนั้นมีค่าเท่ากับ 1.318 4.698 7.786 และ 10.924 wt% ตามลำดับ และปริมาณของคาร์บอนเท่ากับ 93.150 91.826 89.554 และ 85.986 wt% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น P/C มากขึ้นปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของฟอสฟอรัสก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนมีแนวโน้มที่ลดลง ในส่วนของการวิเคราะห์ชนิดของพหุสสารของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น ด้วยวิธีเข็มร้อน (Hot-point probe) จากการวิเคราะห์ผลึกเพชรที่เติมอะตอมสารเจือโบรอนพบว่าพหุสสารหลักในการนำกระแสคือ โสไลต์ จึงสามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และการวิเคราะห์ผลึกเพชรที่เติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส พบว่าพหุสสารหลักในการนำกระแสของผลึกเพชรชนิดเอ็นที่เงื่อนไขในการสังเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว คือ อิเล็กตรอน จึงเป็นข้อมูลที่สามารถยืนยันได้ว่าผลึกเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

หลังจากนั้นจึงนำผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่สังเคราะห์รวมระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 240 ชั่วโมง มาทำการสร้างขั้วสัมผัสโอมมิคด้วยกาวเงินเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ตามเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวในข้างต้น จากการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิดพีและเอ็นจะสามารถหาค่าความต้านทานได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิดพีและชนิดเอ็นที่ ในส่วนของผลึกเพชรชนิดพีพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความเข้มข้น B/C มากขึ้น ค่าความต้านทานที่ได้นั้นจะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มข้น B/C 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 และ 40,000 ppm ตามลำดับ ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 877.19 k $\Omega$ , 595.23 k $\Omega$ , 355.87 k $\Omega$  และ 104.49 k $\Omega$  ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง และเมื่อวิเคราะห์ผลึกเพชรชนิดเอ็นพบว่าค่าอัตราส่วนความเข้มข้น P/C แปรผกผันกับค่าความต้านทานโดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มข้น P/C 10,000, 20,000 30,000 และ 40,000 ppm ตามลำดับ ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 892.85 k $\Omega$ , 602.40 k $\Omega$ , 373.13 k $\Omega$  และ 106.26 k $\Omega$  ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Singh. Semiconductor Devices : an introduction. New York : McGraw-Hill. 1994.
- [2] Press release, General Electric Corporation, Schenectady, NY, 1955.
- [3] F.P. Bundy, H.T. Hall, H.M. Strong, R.H. Wentorf, Man-made diamonds, Nature 176 (1955) 51–56.
- [4] G. William, Eversole, personal communication, circa, 1965.
- [5] J.J. Lander, J.Morrison, Low energy electron diffraction study of the (111) diamond surface, Surf Sci 4 (1966) 241–246.
- [6] J.C. Angus, Diamond Synthesis at Low Pressure, internal 3M report, 1960.
- [7] J.C. Angus, N.C. Gardner, D.J. Pofert, S. Chauhan, T.J. Dyble, P. Sung, Growth of diamond and semiconducting diamond at subatmospheric pressure, Proceedings of the International Conference on Applications of Synthetic Diamond in Industry, Naukova Dumka, Kiev, USSR, 1974, pp. 30–31, [in Russian].
- [8] B.V. Spitsyn, B.V. Deryagin, A technique of diamond growth on a diamond face, USSR Inventor's Certificate 339,134, filed July 10, 1956, published in Bulletin of Inventions (1980) No. 17, 1980, p. 323.
- [9] N. Setaka, History of diamond synthesis in Japan, in: K.E. Spear, J.P. Dismukes (Eds.), Synthetic diamond: emerging CVD science and technology, The Electrochemical Society Series John Wiley, Interscience, NY, 1994, pp. 57–90.
- [10] M. Kamo, Diamond research at NIMS, NIMS NOW Int 8 (1) (2010) 3–4.
- [11] B.V. Spitsyn, L.L. Builov, B.V. Deryagin, Vapor growth of diamond on diamond and other surfaces, J Cryst Growth 52 (1981) 219–226.
- [12] S. Matsumoto, Y. Sato, M. Tsutsumi, N. Setaka, Growth of diamond particles from methane-hydrogen gas, J Mater Sci 17 (1982) 3106–3112.
- [13] S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo, N. Setaka, Vapor deposition of diamond particles from methane, Jpn J Appl Phys Part 2, Lett 21 (1982) 183–185.
- [14] รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ศุภเดช “ เซมิคอนดักเตอร์ ดีไวซ์” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [15] Wikimedia Commons 2007 Diamond and graphite samples with their respective structures. [Online]. Available : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond\\_and\\_graphite.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond_and_graphite.jpg)
- [16] รุ่งนภา จิตภักดี , ลัดดาวัลย์ สุภาติ , ดร.อิทธิพล แจ่มชัด , รศ.ดร.วิสุทธิ จิตติรุ่งเรือง. “เทคนิคการลดการรบกวนจากผลึกข้างเคียงในการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD.” First National Symposium on GRAD-RESEARCH Chiang Mai University, June 2000.
- [17] A.Lettington And J.W.Steeds.Thin Film Diamond. London:Chamman&Hall for The Royal Society, 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] Lawrence S. Pan and Don R. Kania. Diamond:Electric Properties And Application. USA:Kluwer Academic Publishers, 1995
- [19] Robert F. David. Diamond Films and Coatings. New Jersey : Noyes Publications. 1993.
- [20] M. Shur. Phisic of Semiconductor Devices. New Jersey : Prentice-Hall. 1990.
- [21] ประภัสสร มีเคลือบ “การศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P ขนาดใหญ่ ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2560
- [22] กอบศักดิ์ ศรีประภา. “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.
- [23] ลัดดาวลีย์ สุภาติ “การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค HFCVD”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
- [24] คชพงศ์ สุมานนท์ , ลัดดาวลีย์ สุภาติ , รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “ผลจากระนาบของซิลิกอนต่อการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบHFCVDให้มีขนาดใหญ่ “วารสารการประชุมทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย.ครั้งที่ 1 , 2543. หน้า 181-184
- [25] นายปิยชาติ สดงาม , นายวศิน ปัญญาเลิศ , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “การสร้าง DIAMOND MESFET FABRICATION OF DIAMOND MESFET” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### เครื่องมือวิเคราะห์



รูปที่ ก-1 เครื่อง Microscope ของ Nikon รุ่น 1500x ได้รับความอนุเคราะห์จาก TMEC

รูปที่ ก-2 เครื่อง Scanning Electron Microscope ( SEM ) ของ Hitachi รุ่น S-4700 ได้รับความอนุเคราะห์จาก TMEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 เครื่อง Raman Spectroscopy ของ RENISHAW ได้รับความอนุเคราะห์  
บริษัท WESTERN DIGITAL



รูปที่ ก-4 เครื่อง EDX ได้รับความอนุเคราะห์จาก TMEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Prasert Chanthep, Wasin Panyalert, Vilailuck Siriwongrungson, Narin Atiwongsangthong and Wisut Titiroongraung “The Study of Fabricated N-Type Diamond for Hall Sensor by Hot Filament Chemical Vapor Deposition” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017 (IMECS 2017) pp. 741-744. 2017



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Study of Fabricated N-Type Diamond for Hall Sensor by Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) Method

Prasert Chanthep, Wasin Panyalert, Vilailuck Siriwongrungson, Narin Atiwongsangthong and Wisut Titiroongraung, Member, IAENG

**Abstract**—In this research, the study of fabricated n-type diamond for Hall sensor by hot filament chemical vapor deposition (HFCVD) method is presented. The fabricated n-type diamond film doped with phosphorus in ethanol ( $C_2H_5OH$ ) at P/C ratio of 10,000 ppm was synthesis on silicon substrate at  $750^\circ C$  for 12 hours. Its morphology, crystallinity and types of carbon were analyzed using optical microscope and Raman spectroscopy. The structure of n-type diamond for Hall Sensor comprises of four silver paste electrodes on the surface of the fabricated n-type diamond film. An electrical property of electrode, Ohmic, was tested on the fabricated silver paste electrodes. The impact of temperature on the fabricated n-type diamond for Hall sensor was evaluated. The operating temperature as high as  $240^\circ C$  was observed. Magnetic response characteristic of the fabricated n-type diamond was measured. The absolute sensitivity of  $9 \mu V/Gauss$  was observed. Properties of the fabricated n-type diamond for Hall sensor under operation were measured. The electrical density is  $1.82 \times 10^{15} cm^{-3}$ , electrical resistance is  $5.443 \Omega \cdot cm$  and electrical mobility is  $630 cm^2/v \cdot sec$ .

**Index Terms**—HFCVD, n-type diamond, Hall sensor

## I. INTRODUCTION

Nowadays, the structure of diamond carbon is another popular semiconductor due to its remarkable properties. It has band gap of 5.5 eV, which is five times higher than silicon. This can be implied that if we built a semiconductor device using this diamond structure of carbon, it can be used in higher temperature than silicon. In this research, we studied the fabrication process of n-type diamond for Hall sensor by HFCVD method and investigated the effect of temperature on the fabricated n-type diamond Hall sensor. Various parameters such as density of electrical resistance and electrical mobility can be calculated.

Manuscript received December 21, 2016; revised February 5, 2017. This work was supported in part by the Electronics research center of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand.

P. Chanthep is with the Electronics Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand. (e-mail: prasert.kmitl@gmail.com).

W. Panyalert is with the Electronics Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand. (e-mail: wasinerc@gmail.com).

V. Siriwongrungson is with the College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand. (e-mail: vilailuck.si@kmitl.ac.th).

N. Atiwongsangthong is with the Electronics Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand. (e-mail: narin.at@kmitl.ac.th).

W. Titiroongraung is with the Electronics Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand. (e-mail: ktwisut@kmitl.ac.th).

## II. THEORY

The diamond film synthesis by HFCVD (hot filament chemical vapor deposition) is a low cost method. The synthesis by HFCVD method is shown in figure 1.

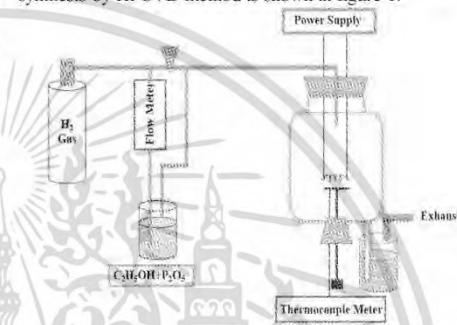


Fig. 1. HFCVD synthesis method.

Firstly, hydrogen gas ( $H_2$ ) flows through ethanol ( $C_2H_5OH$ ), which is mixed with phosphorus penta-oxide ( $P_2O_5$ ). Atoms of carbon and phosphorus are transported by hydrogen gas ( $H_2$ ) into a chamber that provides activated heat at  $2,000^\circ C$  from a hot filament in the chamber. This reaction causes the atoms of carbon and phosphorus to break and then fall on a silicon substrate at  $750^\circ C$ . Finally, the broken carbon and phosphorus atoms Compose to n-type diamond film.

According to Hall effect study [1], it can be confirmed that there are two different carriers in semiconductor. These are electron and hole. The Hall effect can also identify the type of semiconductor and use to calculate electrical density, electrical resistance and electrical mobility as shown in (1), (2) and (3), respectively. Electrical density, electrical resistance and electrical mobility can be calculate from equations as follows. Figure 2 shows the Hall effect and phenomenon occurred in n-type semiconductor.

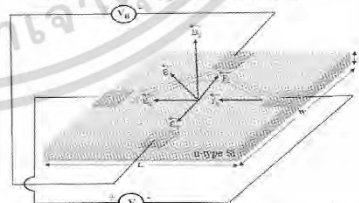


Fig. 2. Hall effect and another phenomenon in n-type semiconductor.

electrical density

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x B_z}{qdV_H} \tag{1}$$

electrical resistivity

$$\rho = \frac{V}{I_x} = \frac{w.d}{L} \tag{2}$$

electrical mobility

$$\mu_{p,n} = \frac{1}{p \cdot (p,n) \cdot q} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \tag{3}$$

where,  $V$  is voltage,  $w$  is width,  $I_x$  is current,  $\rho$  is resistivity,  $B_z$  is magnetic field,  $q$  is electron charge,  $V_H$  is Hall voltage,  $d$  is thickness,  $R_H$  is Hall coefficient and  $L$  is length.

Optical microscope at 1,500x is normally applied to characterize the structure and surface of synthesis diamond.

The Raman spectroscopy technique is used for analysis of carbon type through the Raman spectrum, which indicates types of bonds between carbon atoms.


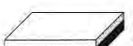

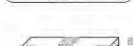
### III. THE FABRICATION PROCESS N-TYPE DIAMOND FOR HALL SENSOR.

The process of n-type Hall sensor building by HFCVD is as follow. Firstly, prepare a 5 mm. x 5 mm. silicon substrate and scrub the surface by diamond paste. Secondly, clean the substrate after preparation using acetone. Then the carbon is synthesized by HFCVD method with addition of phosphorus substance at P/C ratio of 10,000 ppm at 750 °C for 12 hours. After that, the synthesis diamond film was annealed to improve the quality of the synthesis diamond film under hydrogen atmosphere at the substrate temperature of 900 °C for 9 minute. Lastly, the synthesis diamond film surface was characterized using optical microscope and the type of carbon was analyzed using Raman spectroscopy. The carbon type will be compared with carbon type as shown in Table I

TABLE I  
ANALYSIS OF CARBON TYPE USING RAMA SPECTROSCOPY [2]

Peak position (cm <sup>-1</sup> )	Type of carbon	Description
~1140	Small size (<0.1 μm) cubic diamond	Occasionally observed in diamond films with very small grain size (<0.1 μm).
1315-1326	Hexagonal diamond	Broad band, observed in shock wave produced diamond.
1332	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 19 cm <sup>-1</sup> for natural diamond.
1345	Amorphous carbon	Broad band, it becomes a shoulder of the 1550 cm <sup>-1</sup> band when the material is hydrogenated.
1355	Microcrystalline graphite	Observed in material with small grain size.
1550	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band.
1580	Graphite	First order peak.
2458	Cubic diamond	Second order peak.
2710	Microcrystalline graphite	Second order peak.
3240	Graphite	Second order peak.

TABLE II  
FABRICATION PROCESS OF N-TYPE DIAMOND FOR HALL SENSOR

Figure	Description
 ■ Si	Prepare a 5mm.x 5 mm. silicon substrate, scrub the surface by diamond paste, and clean the substrate after preparation.
 □ Diamond ■ Si	The synthesis of diamond film by HFCVD method.
 □ Diamond ■ Si	Annealing of the synthesis diamond film under hydrogen atmosphere at the base temperature of 900 °C for 9 minute.
 ■ Silver paste □ Diamond ■ Si	Building four silver pastes on the surface of n-type diamond film.

The overall fabrication process of n-type Hall sensor is summarized in Table II.

After the fabrication, all four silver pastes was electrical tested to study type of contracts as show in Figure 3.and measured the temperature of n-type Hall sensor.

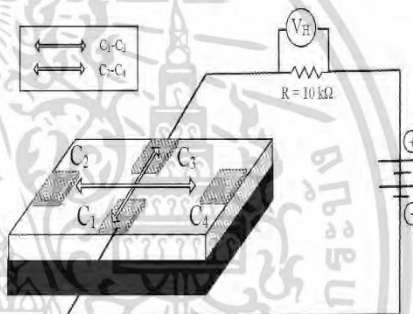


Fig. 3. Electrical test for study type of contracts.

The responsibility test of n-type diamond Hall sensor to magnetic fields is shown in Figure 4. The data obtained is used to calculate the electrical density, electrical resistance and electrical mobility, respectively.

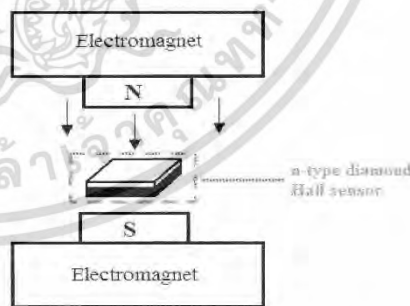


Fig. 4. The responsibility test of n-type diamond Hall sensor to magnetic fields.

IV. RESULT AND DISCUSSION

Diamond film synthesized by HFCVD method at silicon substrate 750 °C for 12 hours was characterized using optical microscope at 1,500x. The image obtained is shown in Fig. 5.

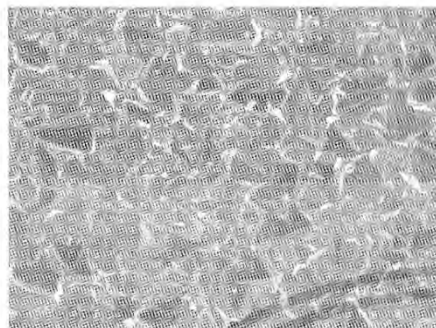


Fig. 5. The surface of diamond film synthesized by HFCVD method at substrate temperature of 750 °C for 12 hours. Diamond film thickness is 100 μm.

Figure 5 shows the surface of diamond film with triangle and plane (111). After that, type of carbon of the diamond film was analyzed using Raman spectroscopy.

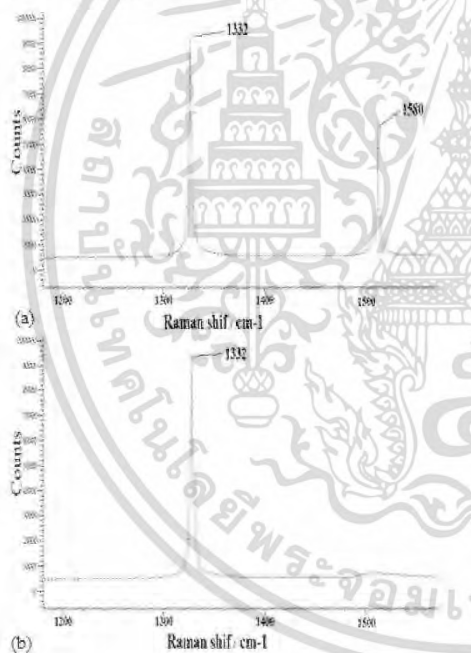


Fig. 6. Raman spectrum of the diamond film synthesized by HFCVD at substrate temperature of 750 °C for 12 hours (a) Raman spectrum of n-type diamond film before annealing (b) Raman spectrum of n-type diamond film after annealing.

From Figure 6 (a) there are 2 peaks at 1332 cm<sup>-1</sup> and 1580 cm<sup>-1</sup>. When compare these peaks with Table I, these peaks correspond to diamond and graphite, respectively. As a result, the graphite, which is a contaminant, was removed by annealing method at substrate temperature of 900 °C for 9 minute under hydrogen atmosphere [3]. After that, the annealed film was reanalyzed using Raman spectroscopy. The graphite's peak decreased drastically as shown in Fig. 6 (b). The annealed film was taken to build the n-type diamond Hall sensor according to Table II and test its electrical properties.

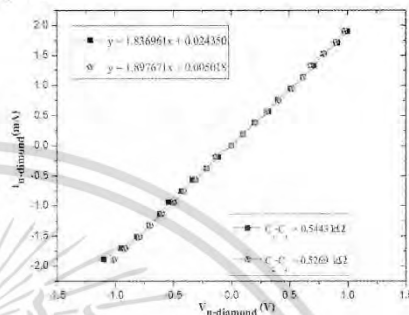


Fig. 7. Result of electrical test.

From Fig. 7, the relationship between current and voltage, from the measurement of C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub> and C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>, is linear that follows the Ohm's theory. The linear equation, which is  $y = 1.836961x + 0.024350$ , can be used to calculate the resistance of the C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub>. The resistance is the inverse of the slope, which is equal to 0.5443 kΩ. This relationship shows Ohmic properties of the fabricated contacts. Then, the effect of temperature on n-type diamond film was tested. The result is shown in Fig. 8.

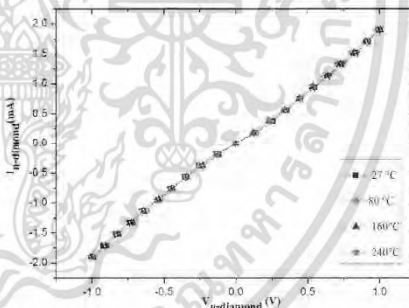


Fig. 8. The relationship between current and voltage of n-type diamond film at different temperatures.

From Fig. 8, when test the electrical properties of n-type diamond film at different temperatures at 27, 80, 160, 240 °C, respectively, it was found that the electrical properties of n-type diamond film did not change with temperatures. This can be observed from the linear relationship between current-voltage and temperature. The slope of each graph is relatively similar. Therefore, it can be implied that this n-type diamond film can be used in high temperatures up to 240 °C without electrical property changes.

The responsibility to magnetic fields of n-type diamond Hall sensor was tested and the obtained values was used to calculate critical parameters as shown in Figure 9.

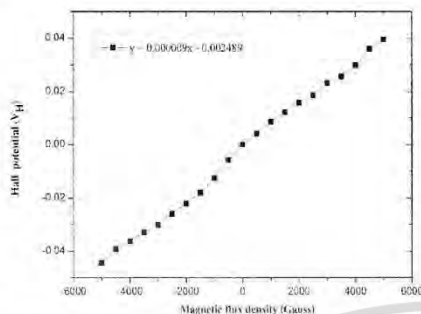


Fig. 9. The responsibility to magnetic fields of n-type diamond Hall sensor.

Figure 9 shows the responsibility of n-type diamond Hall sensor to magnetic fields. The relationship is linear with linear equation  $y = 0.000009x + 0.002989$ , which indicates the ability of response. From the slope, the absolute sensitivity is equal to  $9 \mu\text{V}/\text{Gauss}$ . Regarding the obtained data, electrical density and electrical mobility can be calculated from (1) and (2), respectively. The calculated electrical density and electrical mobility is equal to  $1.82 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  and  $630 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ , respectively.

#### V. CONCLUSION

From the study of the fabrication process of n-type diamond for Hall sensor by HFCVD method, it is shown that the synthesized n-type diamond film can be used to build Hall sensor. The result of electrical properties testing at different temperatures shows that the electrical properties of n-type diamond film remain unchanged. Therefore, it can be used at high temperatures up to  $240^\circ\text{C}$ . The responsibility testing with magnetic field shows the absolute sensitivity is equal to  $9 \mu\text{V}/\text{Gauss}$ . The electrical properties of n-type diamond Hall sensor are electrical density, electrical resistance and electrical mobility, which are equal to  $1.82 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5.443 \Omega\cdot\text{cm}$  and  $630 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ , respectively.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by The Electronic Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The authors would like to thank researchers from Thai Microelectronic Center for their assistance in Optical Microscope and Western Digital for their support in Raman spectroscopy.

#### REFERENCES

- [1] Somkiat suphadej, "Hall effect," *Semiconductor Physics*, vol. 7, pp. 389-393, 2015
- [2] Lawrence S. Pan, Don R. Kania. *Diamond: Electronic Properties And Applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995
- [3] P. Wasin et al. "Synthesis of Diamond Film by HFCVD for p-n Junction Application," *6<sup>th</sup> Electrical Engineering Network 2014 of Rajamangala University of Technology Conference*, pp. 593-598, 2015

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายประเสริฐ จันทเพ  
 วัน เดือน ปีเกิด 4 เมษายน 2535  
 ที่อยู่ 375 หมู่ 6 ต.ริมกก อ.เมือง จ.เชียงราย 57100  
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี  
 สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
- 2.) HFCVD
- 3.) Diamond Crystals

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] “The Study of Fabricated N-Type Diamond for Hall Sensor by Hot Filament Chemical Vapor Deposition” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017 (IMECS 2017) pp. 741-744. 2017