

การย้ายและการวางซ้อนทับกันของโครงสร้างเฮเทอโรแวนเดอร์วาลส์สองมิติ  
สำหรับการใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

TRANSFER AND STACKING OF 2D VAN DER WAALS  
HETEROSTRUCTURES FOR ELECTRONIC DEVICE APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-SC-M-030-056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRANSFER AND STACKING OF 2D VAN DER WAALS  
HETEROSTRUCTURES FOR ELECTRONIC DEVICE APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL-2021-SC-M-030-056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การย้ายและการวางซ้อนทับกันของโครงสร้างเฮทเทอโรแวนเดอร์วาลส์สองมิติสำหรับการใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกนกวรรณ บัวปิ่น
รหัสประจำตัว	62605033
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. รัชนก สมพรเสนต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฮาริฮารา รามามูร์ตี

### บทคัดย่อ

หลังจากที่ได้มีการคิดค้นเทคนิคการจัดวางซ้อนทับกันของวัสดุสองมิติ (2D) ขึ้นมา งานวิจัยทางด้านโครงสร้างเฮทเทอโรแวนเดอร์วาลส์ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ก็ได้ก้าวหน้าขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ การสร้างโครงสร้างเฮทเทอโรให้ประสบความสำเร็จได้นั้น ต้องอาศัยชุดเครื่องมือสำหรับใช้ในการย้าย/จัดวางซ้อนทับกันของวัสดุสองมิติ (transfer system) ที่มีราคาสูง ซึ่งนักวิจัยจำนวนมากไม่สามารถเข้าถึงได้ ถึงแม้ว่าที่ผ่านมา ได้มีรายงานเกี่ยวกับการพัฒนา transfer system ที่มีต้นทุนต่ำอยู่บ้าง แต่สำหรับระบบที่มีฟังก์ชันครบครัน พกพาได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงนั้น ในปัจจุบันก็ยังคงมีการคิดค้นและพัฒนากันอยู่ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนา transfer system ขึ้นมา ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ต้นทุนต่ำ มีลักษณะเป็น all-in-one ขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาได้ง่าย และสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว โดยสร้างมาจากกล่องถุงมือ (glovebox) ที่มีลักษณะเรียบง่ายและสามารถทำได้ด้วยตนเอง (DIY) แต่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ glovebox เชิงพาณิชย์ และเนื่องจาก glovebox ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประกอบเข้าและถอดออกได้ ผู้ใช้จึงสามารถเปลี่ยนบรรยากาศภายใน glovebox ได้ตามต้องการ เช่น สามารถเปลี่ยนจากอากาศให้เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยได้ ถ้าวัสดุสองมิติที่กำลังศึกษาอยู่นั้นเป็นวัสดุที่มีความไวต่ออากาศ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายใน glovebox ต่ำสุดที่วัดได้ คือ <math>< 3\%</math> และระดับของ  $O_2$  สามารถทำให้ลดลงจาก 21% เป็นต่ำกว่า 0.1% ได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่นาที หลังจากที่ได้ทำการไล่อากาศออกด้วยก๊าซเฉื่อย ระบบนี้ยังประกอบด้วย PID controller ซึ่งมีน้ำหนักเบาและสามารถประกอบได้ง่ายภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ทำหน้าที่ในการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุที่กำลังศึกษาอีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบความสามารถที่หลากหลายของ transfer system ที่พัฒนาขึ้น โดยนำมาใช้สร้างโครงสร้างเฮทเทอโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลากหลายแบบ ได้แก่ โครงสร้าง hBN/กราฟีน/hBN และ hBN/MoS<sub>2</sub>/hBN ซึ่งใช้เทคนิค hot pickup ในการ transfer วัสดุสองมิติ โครงสร้างกราฟีน/hBN, MoS<sub>2</sub>/hBN, twisted MoS<sub>2</sub> และ twisted MoS<sub>2</sub>/hBN ซึ่งใช้เทคนิค wetting ในการ transfer และโครงสร้าง tunneling heterostructure แบบ แนวตั้งที่ประกอบด้วย MoS<sub>2</sub>/hBN/graphene ซึ่งใช้เทคนิค transfer ทั้งสองเทคนิคข้างต้น นอกจากนี้ ยังได้มีการสาธิตการใช้ glovebox ที่พัฒนาขึ้นกับวัสดุสองมิติที่ไม่เสถียรในอากาศ อย่างเช่น ฟอสฟอรัส ดำ (black phosphorus หรือ BP) อีกด้วย โดยพบว่า BP ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคการลอกใน glovebox มีความเสถียรมากขึ้น โดยสามารถนำ BP ที่ลอกได้นี้มาสร้างเป็นโครงสร้าง hBN/BP/hBN ได้ สำเร็จ อีกทั้งยังได้นำ BP ที่ลอกได้ไปวางบนขั้วไฟฟ้าเพื่อสร้างเป็น electrical device และใช้ hBN วาง ทับด้านบนอีกทีเพื่อป้องกันไม่ให้ BP เกิดการออกซิไดซ์ เนื่องจาก transfer system ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ ต้นทุนรวมทั้งสิ้นเพียง 1,000 ดอลลาร์ จึงคาดวาระบบนี้จะช่วยผลักดันให้งานวิจัยทางด้านวัสดุสองมิติ และโครงสร้างเฮเทอโรกาวหน้าขึ้นไปอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะเป็นประโยชน์กับนักวิจัยทั้งหลายที่กำลัง หันมาเริ่มทำวิจัยในสาขานี้และต้องใช้ทุนวิจัยที่สูงมาก

**คำสำคัญ :** กราฟีน กล่องถุงมือ ฟอสฟอรัสดำ เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ โครงสร้างเฮเทอโร โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์

<b>Thesis Title</b>	Transfer and Stacking of 2D Van Der Waals Heterostructures for Electronic Device Applications
<b>Student Name</b>	Miss Kanokwan Burpan
<b>Student ID</b>	62605033
<b>Degree</b>	Master of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Ratchanok Somphonsane
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Harihara Ramamoorthy

### Abstract

Research in van der Waals heterostructures has been rapidly progressing in the past decade, thanks to the art of sequential and deterministic placement of one two-dimensional (2D) material over another. The successful creation of heterostructures however has relied largely on expensive transfer systems that are not easily accessible to researchers. Although a few reports on low-cost systems have recently surfaced, the full functionality, portability features, and overall effectiveness of such systems are still being explored. In this work, we present an “all-in-one” low-cost transfer setup that is compact, lightweight, and portable and which can be quickly installed with a facile and do it yourself (DIY)-style anaerobic glovebox option that performs at par with commercial anaerobic systems. The “installable” glovebox option means the user has the convenience of quickly converting the working environment into an inert one when air-sensitive 2D materials are used. The lowest RH values obtained in our glovebox is <3%, and the O<sub>2</sub> levels rapidly drop from 21% to less than 0.1% in just a few minutes of purging the chamber with inert gas. The transfer system is also equipped with a light-weight PID-controlled substrate heating option that can be easily assembled within just a few hours. We test the versatility of our low-cost system by the successful creation of hexagonal boron nitride (hBN)-encapsulated graphene and hBN-encapsulated molybdenum

disulphide ( $\text{MoS}_2$ ) heterostructures using the hot pickup technique and graphene-hBN,  $\text{MoS}_2$ -hBN, twisted  $\text{MoS}_2$ , and twisted  $\text{MoS}_2$  on hBN stacks using the wetting technique, and a  $\text{MoS}_2$ -hBN-graphene vertical tunneling heterostructure was formed using a combination approach. The effectiveness of the DIY glovebox is proven with the demonstration of extended stability of freshly exfoliated black phosphorous (BP) flakes, their encapsulation between thin hBN layers, and the formation of electrically contacted BP devices with a protective hBN top layer. At an overall price point of approximately 1000 \$, the versatile setup presented here is expected to further contribute to the growth of research in 2D materials, in particular, for researchers initially faced with overcoming a huge entry-level threshold to work in the field of 2D materials and van der Waals heterostructures.

**Keyword:** Black phosphorous, Glove box, Graphene, Heterostructures, Hexagonal boron nitride, Molybdenum disulphide

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. รัชนก สมพรเสนห์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฮาริฮาริ รามามูร์ตีที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางที่ถูกต้องตลอดระยะเวลาของการทำวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากงบประมาณของ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ขอกราบขอบพระคุณของ คณะวิทยาศาสตร์ บิดา มารดา ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและคอยให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาวกนกวรรณ บัวปั้น

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 โครงสร้างเฮเทอโรไบโพลีเมอร์วาเลสสองมิติ.....	4
2.2 กราฟีน (Graphene).....	6
2.2.1 โครงสร้างผลึกและแถบพลังงานของกราฟีน .....	7
2.2.2 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีน.....	10
2.2.3 คุณสมบัติทางแสงของกราฟีน.....	12
2.2.4 คุณสมบัติทางการนำความร้อนของกราฟีน.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 คุณสมบัติทางกลของกราฟีน .....	13
2.3 เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal boron Nitride).....	14
2.3.1 โครงสร้างผลึกของ hBN.....	14
2.3.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ hBN.....	15
2.3.3 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของ hBN .....	16
2.3.4 คุณสมบัติทางแสงของ hBN .....	17
2.3.5 คุณสมบัติทางกลของ hBN.....	18
2.4 โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide).....	19
2.4.1 โครงสร้างผลึก MoS <sub>2</sub> .....	19
2.4.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS <sub>2</sub> .....	19
2.4.3 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS <sub>2</sub> .....	20
2.4.4 คุณสมบัติทางแสงของ MoS <sub>2</sub> .....	21
2.4.5 คุณสมบัติทางกลของ MoS <sub>2</sub> .....	22
2.5 ฟอสฟอรัสดำ (Black phosphorus).....	22
2.5.1 โครงสร้างผลึกของฟอสฟอรัสดำ.....	22
2.5.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ BP .....	23
2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ BP.....	24
2.5.4 คุณสมบัติทางแสงของ BP .....	25
2.5.5 คุณสมบัติทางกลของ BP.....	25
2.6 การสังเคราะห์วัสดุสองมิติ .....	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 Micromechanical Exfoliation .....	26
2.6.2 Epitaxial Growth.....	27
2.6.3 Chemical Vapor Deposition (CVD).....	27
2.9 หลักการทำงานของรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy).....	30
2.10 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope).....	31
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>34</b>
3.1 การสังเคราะห์วัสดุสองมิติ .....	34
3.1.1 การเตรียมพื้นผิววัสดุฐานรอง .....	34
3.1.2 การสังเคราะห์กราฟีน .....	34
3.1.3 การสังเคราะห์เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์.....	35
3.1.4 การสังเคราะห์ฟอสฟอรัสดำ .....	35
3.1.5 การสังเคราะห์โมลิบดินัมไดซัลไฟด์.....	36
3.2 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ.....	36
3.2.1 ตัวควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิววัสดุฐานรอง.....	37
3.2.2 Micromanipulator .....	38
3.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง .....	39
3.3 การเตรียมชุดอุปกรณ์ DIY สำหรับสร้างโครงสร้างของวัสดุสองมิติ ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและ ความชื้น.....	40
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชุดอุปกรณ์ DIY สำหรับสร้างโครงสร้างของวัสดุสองมิติ .....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง (Dry method).....	41
3.4.1 การเตรียมชั้นพอลิเมอร์ (แสดมภ์ PPC).....	41
3.4.2 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ.....	43
3.5 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (Wetting method) .....	44
3.5.1 การเตรียมชั้นพอลิเมอร์ (แสดมภ์ PDMS).....	44
3.5.2 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ.....	45
3.5.3 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ แบบบิตมุ่ม ของ MoS <sub>2</sub> .....	46
3.6 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง รวมกับ การถ่ายโอนแบบเปียก (Dry + Wetting method).....	47
3.6.1 การเตรียมแสดมภ์ PDMS .....	47
3.6.2 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ.....	47
3.7 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์จำนวนชั้นวัสดุสองมิติ.....	47
3.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy) .....	47
3.7.2 รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy).....	48
3.7.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy).....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>52</b>
4.1 ผลการสังเคราะห์วัสดุสองมิติ.....	52
4.1.1 ผลการสังเคราะห์กราฟีน.....	52
4.1.2 ผลการสังเคราะห์เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์.....	53
4.1.3 ผลการสังเคราะห์ฟอสฟอรัสดำ .....	54

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 ผลการสังเคราะห์โมลิติน้ำมไคซัลไฟด์ .....	55
4.2 ผลการนำวัสดุสองมิติมาซ้อนทับกัน .....	55
4.2.1 ผลจากเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง (Dry transfer) .....	55
4.3 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นของวัสดุสองมิติ .....	79
4.3.1 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นกราฟีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optica microscopy).....	79
4.3.2 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นกราฟีนจากรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy).....	81
4.3.3 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้น hBN และ ฟอสฟอรัสดำ จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy).....	82
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>85</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	94

## สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

3.1 แสดงรายการชิ้นส่วนทั้งหมดที่จำเป็น สำหรับการสร้างเครื่องมือระบบต้นทุนต่ำ.....	49
---	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแบบเฮทเทอโรของวัสดุสองมิติ .....	1
2.2 โครงสร้างของผลึกหกเหลี่ยมของกราฟีน .....	6
2.3 วัสดุคาร์บอนอัญรูปอื่นที่มีกราฟีนเป็นพื้นฐาน.....	7
2.4 โครงสร้างของกราฟีน แสดงให้เห็นถึงการรวมกัน $sp^2$ hybridization เมื่ออะตอมคาร์บอนใช้ อเล็กตรอน $sp^2$ ร่วมกับอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ใกล้เคียงทั้งสามซึ่งก่อตัวเป็นชั้นของรังผึ้งเครือข่าย ของโครงสร้างระนาบซึ่งเรียกอีกอย่างว่ากราฟีนชั้นเดียว.....	8
2.5 โครงสร้างผลึกคล้ายรังผึ้งในกราฟีนโดยใช้ โมเดลของบอลและสติค.....	8
2.6 รูปจำลองแถบพลังงานของกราฟีน.....	9
2.7 (ก) โครงสร้าง Bilayer graphene แสดงแลตทิซประกอบด้วยอะตอม $A_1$ และ $B_1$ บนชั้น 1 และ $A_2$ และ $B_2$ ในชั้น 2 (ข) โครงสร้างแถบพลังงาน Bilayer graphene.....	10
2.8 (ก) กราฟแสดงค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนกับแรงดันเกตที่วัดได้ที่ 10 K บริเวณสีน้ำเงิน (A) และสี แดง (B) แสดงถึงกราฟีนที่เจือด้วยโฮลและอิเล็กตรอน.....	12
2.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านในตัวกลางอากาศ.....	12
2.10 กระบวนการ nanoindentation ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทำการวัดแรงติดคงที่ของแผ่น กราฟีนที่ถูกแขวนอยู่เหนือ $SiO_2$ แผ่นกราฟีนถูกแขวนอยู่ด้วยกันด้วยแรง van der Waals forces.....	14
2.11 แผนภาพของโครงสร้างเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์.....	15
2.12 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ hBN โครงสร้างแถบพลังงานของ hBN ที่มีจำนวนหลายชั้น (ซ้าย) และโครงสร้างแถบพลังงานของ hBN ชั้นเดียว (ขวา).....	16
2.13 แสดงโครงสร้างแถบคำนวณความหนาแน่นรวมและบางส่วนของสถานะ (TDOS และ PDOS).....	17
2.14 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานโฟตอนมีค่าการดูดกลืน สูงสุดที่ 14.87 eV (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเหของแสงกับพลังงาน โฟตอนที่มีขีดจำกัดพลังงาน เป็นศูนย์และขยายได้ถึง 1.5 ที่เกิดเฉพาะปริมาณ UV.....	18
2.15 แสดงค่าความแข็งแรงการแตกหักของกราฟีนและ BN ความหนาที่แตกต่างกัน เส้นประใน คือเส้นโน้ตของภาวะการแตกหักของ BN และ graphene (G) ที่มีความหนาต่างกันขึ้นอยู่กับ การคูณของความแข็งแรงของชั้นเดียวตามจำนวนชั้น.....	18
2.16 แสดงโครงสร้าง 3 มิติของระยะห่างระหว่างชั้นของ $MoS_2$ .....	19

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS <sub>2</sub> โครงสร้างแถบพลังงานของ MoS <sub>2</sub> ที่มีจำนวนหลายชั้น(ซ้าย) และโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS <sub>2</sub> ชั้นเดียว(ขวา) แถบพลังงานของแถบพื้นฐานที่ระบบกำหนดแถบเวเลนซ์ แสดงโดยเส้นทึบ.....	20
2.18 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานความหนาแน่นของสถานะและการนำอิเล็กตรอนของ MoS <sub>2</sub> ชั้นเดียวภายใต้ความเครียด ไอโซโทปิก (isotropic) โดย nonequilibrium Green's วิธีฟังก์ชันในแนวทาง DFTB Ga และ Gz หมายถึงการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนตามทิศทางอาร์มแชร์และซิกแซกของชั้นตามลำดับ.....	21
2.19 แสดงโครงสร้าง 3 มิติของระยะห่างระหว่างชั้นของฟอสฟอรัสดำ.....	23
2.20 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของฟอสฟอรัสดำ โครงสร้างแถบพลังงานของ ฟอสฟอรัสดำ ที่มีจำนวนหลายชั้น(ซ้าย) และโครงสร้างแถบพลังงานของ ฟอสฟอรัสดำ ชั้นเดียว (ขวา).....	24
2.21 กราฟแสดงลักษณะการถ่ายโอนของ FET ที่แรงดันไบแอสที่ต่างกันของ BP.....	25
2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดสำหรับโมโนเลเยอร์สามารถรักษาความเครียดได้ถึง 18 GPa และ 8 GPa ใน zigzag และ armchair.....	26
2.23 (ก) การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Mechanical exfoliation (ข) ภาพกราฟีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	27
2.24 แผนภาพการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD).....	28
2.25 แผนภาพแสดงการถ่ายโอนของวัสดุสองมิติ ด้วยวิธีการถ่ายโอนแบบเปียก.....	28
2.26 แผนภาพแสดงการถ่ายโอนของวัสดุสองมิติ ด้วยวิธีการถ่ายโอนแบบแห้ง.....	29
2.27 แผนภาพการทำงานกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	30
2.28 แสดงหลักการการทำงานของ Raman spectroscopy.....	31
2.29 แสดงกระบวนการการทำงานของ AFM.....	32
2.30 แสดงภาพจาก STM ของค่าความเรียบพื้นผิวกราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ (ซ้าย) และกราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (ขวา).....	33
3.1 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนวิธี Modified exfoliation (ก) ลอกกราฟีนจากกราฟไฟท์ด้วยเทป (ข) ทาบเทปลงบนวัสดุฐานรองวางบนกระจกสไลด์และนำไปให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส 1 นาที (ค) ลอกเทปออกจากวัสดุฐานรอง.....	35
3.2 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งภายในของ CVD สำหรับการสังเคราะห์ MoS <sub>2</sub> .....	36
3.3 แสดงชุดเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างเฮเทอของวัสดุสองมิติ.....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 (ก) แสดงเครื่องมือของตัวควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิววัสดุฐานรอง ที่สร้างจากอะลูมิเนียม (สำหรับวางวัสดุฐานรอง) (ข) ส่วนประกอบของภายในตัวควบคุมอุณหภูมิพื้นผิว.....	38
3.5 แสดงชุดเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างเฮเทอของวัสดุสองมิติ (ก) แสดงเครื่องมือ Micromanipulator (ข) แสดงภาพด้านข้างของแอสมบลีระหว่างแอสมบลีกับวัสดุฐานรอง (ค) แสดงภาพของแอสมบลี PPC สำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้านนอก (ง) แสดงภาพของแอสมบลี PPC สำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้านในกล่อง DIY.....	39
3.6 แสดงเครื่องมือสำหรับถ่ายโอนวัสดุสองมิติให้เป็นโครงสร้างเฮเทอโรกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสงและภาพถ่ายของผลึก hBN ที่แสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์.....	39
3.7 (ก) แสดงภาพขนาดของกล่อง DIY ที่สัมพันธ์กับระบบถ่ายโอนวัสดุสองมิติ (ข) ภาพด้านหน้าและ (ค) มุมมองด้านหลังระบบถ่ายโอนวัสดุสองมิติของกล่อง DIY.....	41
3.8 แสดงขั้นตอนการสร้างชั้นแอสมบลี PPC (ก) เคลือบ PPC ลงบน PDMS (ข) ติดกาวสองหน้า (double tape) ลงบนกระจกสไลด์ (ค) ชั้นแอสมบลี PPC.....	42
3.9 แสดงขั้นตอนการสร้างชั้นแอสมบลี PPC (ก) เคลือบ PPC ลงบน PDMS (ข) ชั้นแอสมบลี PPC.....	43
3.10 พอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ประกอบให้เข้ากันกับ Micromanipulator.....	43
3.11 แสดงขั้นตอนการถ่ายโอนวัสดุสองมิติให้เป็นโครงสร้างแบบเฮเทอโร (hBN/graphene/hBN, hBN/MoS <sub>2</sub> /hBN และ hBN/BP/hBN) ด้วยเทคนิค การถ่ายโอนแบบแห้ง.....	44
3.12 แสดงชั้นแอสมบลี PDMS.....	45
3.13 แสดงขั้นตอนการถ่ายโอนวัสดุสองมิติให้เป็นโครงสร้างแบบเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายโอน แบบเปียก.....	46
4.1 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์จากวิธี Standard Exfoliation สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	52
4.2 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์จากวิธี Modified exfoliation สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	52
4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของ hBN ที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	53
4.4 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของฟอสฟอรัสดำที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	54
4.5 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของ MoS <sub>2</sub> บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ (ก) ภาพกำลังขยาย	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
20 เท่า (ข) ภาพกำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	55
4.6 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบhBN/graphene/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	57
4.7 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	58
4.8 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	59
4.9 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN ที่สร้างภายใต้การควบคุมความชื้น และปริมาณออกซิเจน (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ซ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 20 ไมครอน.....	60
4.10 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/MoS <sub>2</sub> /hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> /hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบ hBN/MoS <sub>2</sub> /hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	62
4.11 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/MoS <sub>2</sub> /hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> /hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบ hBN/MoS <sub>2</sub> /hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	63
4.12 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ก) ผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ข)	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ผลึก BP ที่ได้รับความเสียหายหลังจากสัมผัสอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	64
4.13 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ก) ผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ข) ผลึก BP ที่ได้รับความเสียหายหลังจากสัมผัสอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	64
4.14 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใน glovebox ที่ควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น (ก) ผลึก BP ลอกภายใน glovebox (ข) ผลึก BP หลังจากเก็บภายใน glovebox เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	65
4.15 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใน glovebox ที่ควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น (ก) ผลึก BP ลอกภายใน glovebox (ข) ผลึก BP หลังจากเก็บภายใน glovebox เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	65
4.16 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แอสตมปี PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แอสตมปี PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ช) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิง แสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 20 ไมครอน.....	67
4.17 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แอสตมปี PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แอสตมปี PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้าง เฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ช) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 20 ไมครอน.....	68
4.18 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แอสตมปี PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แอสตมปี PPC (จ) แสดงภาพ โครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (C) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	70
4.19 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แอสตมปี PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
BP/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ โครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (C) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN-BP- contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	71
4.20 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ Graphene/hBN (ก) แสดงภาพ graphene on Si/ SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ graphene on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ graphene on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	72
4.21 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ Graphene/hBN (ก) แสดงภาพ graphene on Si/ SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ graphene on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ graphene on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	73
4.22 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS <sub>2</sub> -hBN (ก) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	74
4.23 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS <sub>2</sub> /hBN (ก) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	74
4.24 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS <sub>2</sub> on Si/SiO <sub>2</sub> (ก) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง (ข) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> ชั้นที่สอง (ง) แสดงภาพ twisted MoS <sub>2</sub> on Si/SiO <sub>2</sub> มุม 15 องศา หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	75
4.25 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS <sub>2</sub> on Si/SiO <sub>2</sub> (ก) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง (ข) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> ชั้นที่สอง (ง) แสดงภาพ twisted MoS <sub>2</sub> on Si/SiO <sub>2</sub> มุม 15 องศาหลังจากกระบวนการถ่ายโอน.....	76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS <sub>2</sub> on hBN (ก) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง (ข) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS ชั้นที่หนึ่งที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on hBN ชั้นที่หนึ่งที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (จ) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> ชั้นที่สอง (ฉ) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS ชั้นที่สองที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ช) แสดงภาพ twisted MoS <sub>2</sub> on hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	77
4.27 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS <sub>2</sub> /hBN/Graphene (ก) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on PPC จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/ SiO <sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ hBN on Graphene จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	78
4.28 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS <sub>2</sub> /hBN/Graphene (ก) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on Si/ SiO <sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> on PDMS จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ MoS <sub>2</sub> /hBN/Graphene สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	79
4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนชั้นเดียว (ก) กำลังขยาย 20 เท่า (ข) กำลังขยาย 50 เท่า (ค) กำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	80
4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนสองชั้นเดียว (ก) กำลังขยาย 20 เท่า (ข) กำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	80
4.31 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของ hBN (ก) ผลึก hBN หลายชั้น (b) ผลึก hBN ความหนาไม่เกิน 10 ไมครอน กำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน.....	81
4.32 กราฟจากรามานสเปกโตรสโกปี (ก) แสดงตำแหน่งพีค G และ 2D ของ กราไฟท์และกราฟีน (ข) แสดงความกว้างของพีค 2D ของ กราไฟท์ และกราฟีนที่มีความหนา 1, 2 และ 3 ชั้น.....	81
4.33 แสดงกราฟรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) กราฟชนิด Lorentzian 4 กราฟ.....	82
4.34 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัลของ 3-4 ชั้น (ก) hBN บนพื้นผิว Si/SiO <sub>2</sub> (ข) ภาพถ่าย hBN จาก AFM และ (ค) กราฟแสดงความสูงจาก AFM ของ hBN 3 ชั้น.....	83
4.35 (ก) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัลของ hBN/BP/contact สเกลบาร์ 10 ไมครอน (ข) ภาพถ่าย hBN-BP จาก AFM และ (ค) กราฟแสดงความสูงจาก AFM ของ hBN 3 ชั้น.....	84

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุสองมิติเช่นกราฟีน (Graphene) เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal Boron nitride (hBN)) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum Disulfide ( $\text{MoS}_2$ )) และอีกหลากหลายชนิดได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในงานวิจัย เนื่องจากวัสดุสองมิติมีคุณสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางแสงเมื่อวัสดุสองมิติต่างชนิดกันที่มีเพียงชั้นเดียวหรือสองชั้นของอะตอมซ้อนทับกันจะเกิดเป็น โครงสร้างแบบเฮเทอโรแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals Heterostructure) ซึ่งจะเป็แนวทางใหม่ในการเพิ่มฟังก์ชันโดยอาศัยวัสดุสองมิติที่จะนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยืดหยุ่นสูงอันเนื่องมาจากพื้นผิวระหว่างชั้นของวัสดุสองมิติไม่มีสิ่งเจือปนปนเปื้อนนั้นจะส่งผลให้ได้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง [1] ในทางกลับกันถ้าระหว่างชั้นของวัสดุสองมิติมีสิ่งปนเปื้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อกลไกการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุ โครงสร้างแบบเฮเทอโรสามารถสร้างได้หลากหลายโครงสร้างจากวัสดุสองมิติ เช่น กราฟีน ที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมในแลตทิซซึ่งมีความหนาเพียง 1 ชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้มีคุณสมบัติที่โดดเด่น แตกต่างไปจากคาร์บอนอัญรูปซึ่งทำให้กราฟีนมีความแข็งแรงเชิงกลที่สูงมากอีกทั้งผลึกยังจัดเรียงตัวกันแบบเป็นระเบียบและมีคุณสมบัติความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่สูงมาก

เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ มีโครงสร้างลักษณะที่เหมือนกันกับกราฟีนที่มีเกิดจากอะตอมของโบรอนและไนโตรเจนเรียงตัวสลับกันหรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า “กราฟีนขาว” (White Graphene) โดยมีลักษณะทางกายภาพที่ทนทานต่อปฏิกิริยาทั้งเชิงกลและเคมี [2]

โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ โครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นหกเหลี่ยมที่มีอะตอมของ Mo หนึ่งตัว อะตอม S สองตัวเรียงซ้อนทับกัน และมีการเคลื่อนที่ที่สมเหตุสมผลดึงดูดความสนใจเป็นพิเศษสำหรับการใช้งานทางด้านแสงและออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [3]

กราฟีน เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และ ฟอสฟอรัสดำ วัสดุสองมิติเหล่านี้เมื่อเกิดเป็นโครงสร้างเฮเทอโรสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดการเตรียมวัสดุสองมิติโดยเทคนิคการลอกเชิงกล คือการลอกจากสก็อตเทป วิธีนี้สามารถเตรียมวัสดุสองมิติให้มีความบริสุทธิ์สูงและอีกหนึ่งเทคนิคสำหรับการสังเคราะห์วัสดุสองมิติคือ เทคนิค CVD การสร้างโครงสร้างเฮเทอโร ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค การถ่ายโอนแบบแห้ง (All dry transfer) และ การถ่ายโอนแบบเปียก (Wet transfer) ซึ่งเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง สามารถสร้างโครงสร้างเฮเทอโรแวนเดอร์วาลส์ได้โดยวัสดุ

สองมิติไม่เกิดการเสียรูปแบบวิธีนี้จะใช้ โพลีโพรพิลีนคาร์บอเนต (Polypropylene carbonate (PPC)) เป็นตราประทับในการถ่ายโอนวัสดุสองมิติเนื่องจาก PPC มีคุณสมบัติยึดเกาะที่ดีและการถ่ายโอนแบบเปียกใช้ พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane (PDMS)) กับน้ำ วิธีนี้วัสดุสองมิติสามารถถ่ายโอนได้โดยไม่มีสารเคมีซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีข้อดีที่แตกต่าง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสังเคราะห์วัสดุสองมิติ และ สร้างโครงสร้างเฮเทอโรโดยผลึก hBN ที่มีคุณสมบัติพิเศษของพื้นผิวที่เรียบมาเป็นตัวต่อหุ้มวัสดุสองมิติ (กราฟีน, ฟอสฟอรัสดำ และ MoS<sub>2</sub>) เพื่อให้ได้โครงสร้างเฮเทอโรที่แตกต่าง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์วัสดุสองมิติ (กราฟีน, hBN และ ฟอสฟอรัสดำ) ด้วยเทคนิคการลอกเชิงกล เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สังเคราะห์วัสดุสองมิติให้มีความบริสุทธิ์สูง สำหรับ การสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> จะใช้เทคนิค CVD
- 2) ตรวจสอบจำนวนของวัสดุสองมิติ ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) และอีกหนึ่งเทคนิคคือ AFM
- 3) สร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ ด้วยเทคนิค การถ่ายโอนแบบแห้ง (dry transfer) ที่มี PPC เป็นตัวกลางในการถ่ายโอน และการถ่ายโอนแบบเปียก (Wet transfer) ที่มีเพียง Stamp PDMS และใช้น้ำในการลดแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุสองมิติกับวัสดุฐานรอง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างโครงสร้างแบบเฮเทอโรของ กราฟีน, hBN และ ฟอสฟอรัสดำ ให้ได้โครงสร้างที่แตกต่างสำหรับการประยุกต์ใช้งานและเข้าใจหลักการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรแต่ละชนิดซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน

## 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)											
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Literature review												
สังเคราะห์ กราฟีน hBN และ ฟอสฟอรัสดำ ด้วยเทคนิคการ ลอก และ สังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD												
วิเคราะห์จำนวนชั้นของวัสดุสอง มิติ ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy และ AFM												
สร้างเครื่องมือสำหรับการย้าย และซ้อนทับกันของวัสดุสองมิติ												
สร้างโครงสร้างเฮเทอโรของ วัสดุสองมิติ (กราฟีน hBN MoS <sub>2</sub> และ ฟอสฟอรัสดำ)												
จัดเตรียมรายงาน												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

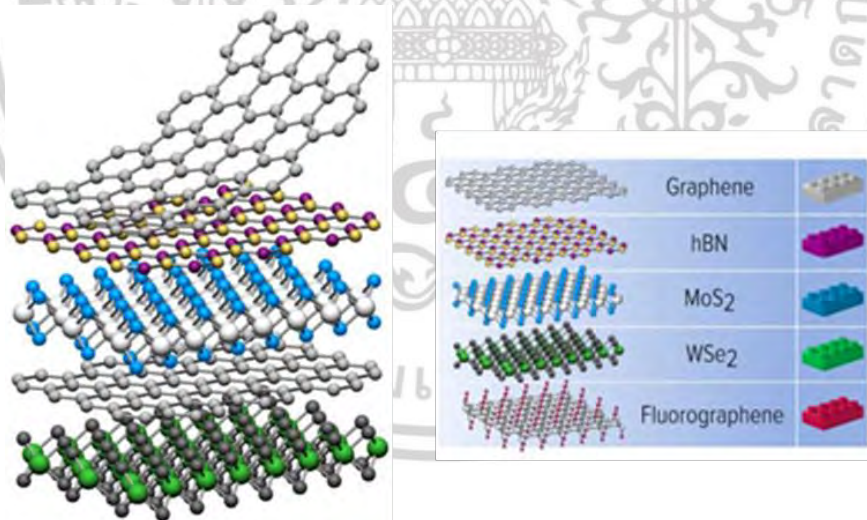
### 2.1 โครงสร้างเฮเทอโรแวนเดอร์วาลส์สองมิติ

โครงสร้างเฮเทอโรแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals Heterostructures) เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มมีการสาธิตกราฟีนครั้งแรกในปี 2547 และนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบวัสดุสองมิติอื่นๆ ที่เป็นชั้นบาง ๆ มากกว่า 2,500 ชนิด ในขณะที่วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีแสงและเชิงกล ต่อมาเมื่อมีการค้นพบว่าผลึกของวัสดุสองมิติเหล่านี้สามารถรวมกันได้อย่างอิสระเพื่อสร้างวัสดุใหม่ และมีการค้นพบว่าเมื่อวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกราฟีนแบบอะตอมเดี่ยววางซ้อนทับกันคุณสมบัติจะเปลี่ยนไปและเกิดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไฮบริดแบบใหม่ก็ปรากฏขึ้นซึ่งปูทางไปสู่การออกแบบวัสดุใหม่และอุปกรณ์นาโน คุณสมบัติของวัสดุไฮบริดเหล่านี้สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำโดยการบิดชั้นอะตอมที่ซ้อนกันสองชั้น เพื่อสร้างความอิสระที่ไม่เหมือนใครนี้สำหรับการควบคุมวัสดุคอมโพสิตระดับนาโนและอุปกรณ์นาโนในเทคโนโลยีในอนาคต ในขณะที่พันธะโควาเลนต์ที่แข็งแกร่งให้ความเสถียรในระนาบของผลึกวัสดุสองมิติเหล่านี้เรียกว่าโครงสร้างเฮเทอโรแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals Heterostructures) แสดงดังรูปที่ 2.1 เนื่องจากระหว่างชั้นอะตอมของวัสดุสองมิติ ยึดติดกันได้โดยไม่ได้ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีแต่สามารถสร้างเป็นวัสดุชนิดใหม่ขึ้นได้โดยยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) [4], [5] เพื่อสร้างความอิสระที่ไม่เหมือนใครนี้สำหรับการควบคุมวัสดุคอมโพสิตระดับนาโนและอุปกรณ์นาโนในเทคโนโลยีในอนาคต

วัสดุสองมิติได้รับความสนใจศึกษาวิจัยในการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมากได้แก่ กราฟีน (Graphene) ประกอบด้วยชั้นเดี่ยวของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงเป็นแบบตาข่ายหกเหลี่ยมและมีความแข็งแรงเชิงกลสูงสุดคุณภาพของผลึกและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ยอดเยี่ยม กราฟีนเป็นเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน (ZERO GAP) หรือเรียกว่าเป็นวัสดุกึ่งโลหะ (Semi-metal) พฤติกรรมของอิเล็กตรอนในกราฟีนเหมือนอนุภาคโฟตอน ซึ่งเป็นอนุภาคไร้มวล (Massless particle) ซึ่งนับว่าสมบัติของอิเล็กตรอนในกราฟีนนั้นน่าสนใจอย่างยิ่ง [6]

เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal Boron nitride (hBN)) เป็นวัสดุสองมิติ ที่มีโครงสร้างคล้ายกราฟีนที่ประกอบด้วยสองอะตอมคืออะตอม B และ N เรียงสลับกัน hBN เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการจัดการทางกลและปฏิกิริยาทางเคมี เป็นฉนวนและมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง UV และยังเป็นวัสดุที่ยอดเยี่ยมมีพื้นผิวที่มีลักษณะแบนเหมาะสำหรับการห่อหุ้มชั้นหรือพื้นผิวสำหรับอุปกรณ์ซ้อนกันของวัสดุสองมิติ [7]

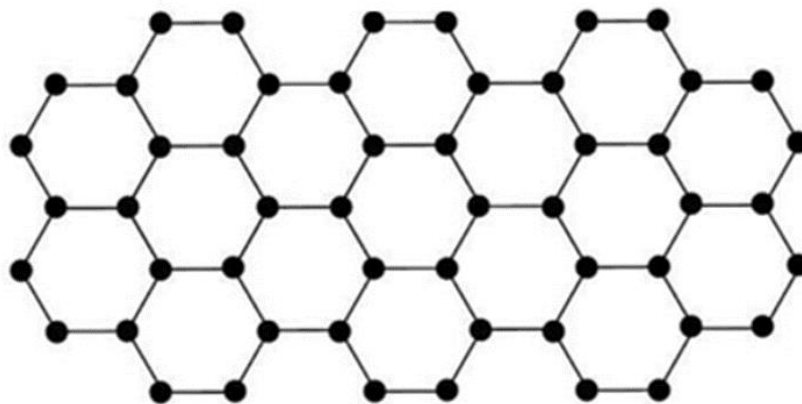
ฟอสฟอรัสดำ (Black Phosphorus (BP)) เป็นเซมิคอนดักเตอร์มีลักษณะคล้ายกับกราฟไฟท์ซึ่งมีการใช้งานมากมายในงานออปโตอิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์และเซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปแบบ สองมิติฟอสฟอรัสดำ เมื่อมีการแยกชั้นจนเหลือเพียงชั้นเดียวหรือ 2-3 ชั้น เรียกว่า ฟอสฟอรีน (Phosphorene) และมีคุณสมบัติคล้ายกับวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ 2D อื่น ๆ [8] นอกจากนี้ยังมีโลหะทรานซิชันไดคัลโคจีไนด์ (Transition metal dichalcogenides (TMD)) ประกอบด้วยสององค์ประกอบโลหะทรานซิชันและเซลโคเจน (chalcogen) มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลายตั้งแต่การเป็นฉนวนหรือเซมิคอนดักเตอร์เป็นโลหะหรือ semi metallic โครงสร้าง TMD มีโครงสร้างหกเหลี่ยม พบมากที่สุด โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum Disulfide ( $\text{MoS}_2$ )) โครงสร้างประกอบด้วยอะตอมซ้อนทับกันสามชั้น อะตอม Mo หนึ่งตัวและอะตอม S สองตัวและมีการเคลื่อนที่ที่สมเหตุสมผลดึงดูดความสนใจเป็นพิเศษสำหรับการใช้งานทางด้านแสงและออปโตอิเล็กทรอนิกส์และอีกหนึ่งวัสดุที่พบมากที่สุด ทังสแตนไดซีลีไนด์ (Tungsten diselenide ( $\text{WSe}_2$ )) มีโครงสร้างคล้ายกับ  $\text{MoS}_2$  มีการเชื่อมต่อ สปินกับออร์บิทัลที่แข็งแรงในสารประกอบทังสแตน (W) และความเสถียรต่ำกว่าในสารประกอบซีลีไนด์ (Se) [9] ดังนั้นการสร้างโครงสร้างเฮเทอโร สามารถทำได้โดยการซ้อนทับผลึกของวัสดุสองมิติเข้าด้วยกัน งานวิจัยนี้มีความสนใจในลักษณะทางกายภาพและสมบัติการนำไฟฟ้าที่โดดเด่นเมื่อนำวัสดุสองมิติมาสร้างโครงสร้างเฮเทอโรกับวัสดุสองมิติต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ

## 2.2 กราฟีน (Graphene)

กราฟีนเป็นเซมิคอนดักเตอร์ที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นศูนย์ (Zero gap) หรือที่เรียกว่าเป็นกึ่งโลหะ กราฟีนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนชั้นเดียวที่จับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในแนวระนาบเป็นแบบหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง [10] ซึ่งอะตอมของคาร์บอนเป็นธาตุหมู่ที่ 4 ที่มีความไวต่อการสร้างโมเลกุลของสารประกอบและผลึกของแข็ง คาร์บอนมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 4 อิเล็กตรอน ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนอื่นๆ เพื่อสร้างคาร์บอนในอัญรูปต่างๆ กราฟีนมีสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจมาก อาทิ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม กราฟีนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเงิน ซึ่งเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีที่สุด หรือการที่กราฟีนโปร่งใส สามารถดูดแสงได้มากเมื่อเทียบกับวัสดุสองมิติที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียว [6], [11] แสดงดังรูปที่ 2.2

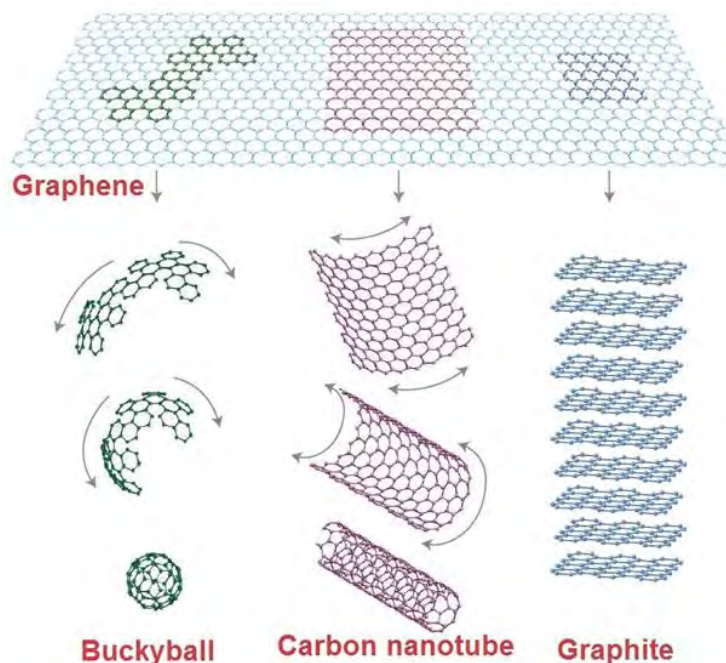


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผลึกแบบหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งของกราฟีน

ปี 2004 กราฟีนถูกแยกออกจากกราไฟท์ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก โดยนักวิทยาศาสตร์สองท่านจากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ สหราชอาณาจักร ศ. ดร. อังเดร ไกม์ (Andre Geim) และ ศ. ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) ทำให้กราฟีนได้รับความสนใจมากมายจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก เนื่องจากนักฟิสิกส์หลายคนเชื่อว่าไม่มีทางสังเคราะห์กราฟีนได้ด้วยความคิดที่ว่าอะตอมที่มีการเรียงตัวใน สองมิติ จะไม่มีความเสถียรและจะไม่สามารถอยู่ได้ในธรรมชาติ โดย ศ. ดร. อังเดร ไกม์ และ ศ. ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ ได้ทำการทดลองสำเร็จโดยใช้วิธีง่ายๆ คือ การลอกกราฟีนออกจากกราไฟท์โดยใช้เทปกาว เรียกวิธีการนี้ว่า exfoliation method กราฟีนที่ได้จากวิธีนี้จะมองเห็นได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์เมื่อกราฟีนถูกวางไว้บนฐานรองที่เหมาะสม [12]

กราฟีนเป็นโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอัญรูป อื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อกราฟีนเกิดการม้วนตัวเป็นทรงกลมทำให้เกิดเป็นบักกั๊บอลกราฟีน ม้วนเป็น

ทรงกระบอกทำให้เกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอนและเมื่อแผ่นกราฟีนซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้นเกิดเป็นกราไฟท์ [13]

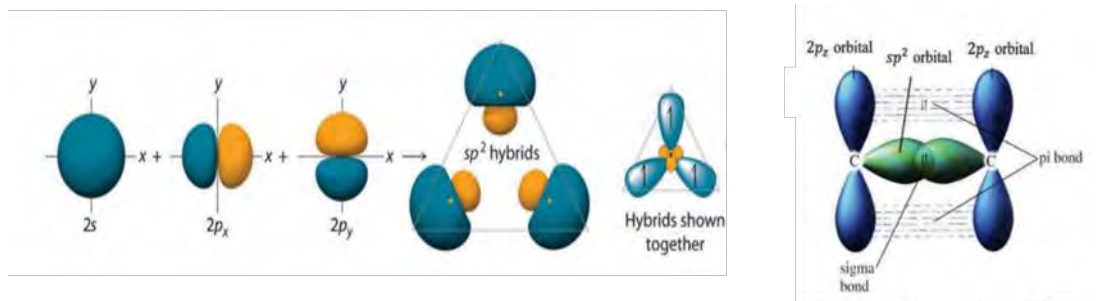


รูปที่ 2.3 วัสดุนาโนคาร์บอนอัญรูปอื่นที่มีกราฟีนเป็นพื้นฐาน

## 2.2.1 โครงสร้างผลึกและแถบพลังงานของกราฟีน

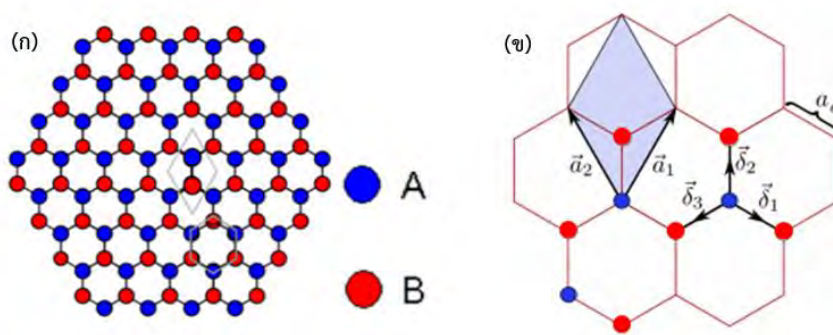
### 2.2.2.1 กราฟีนชั้นเดียว (Monolayer graphene)

กราฟีนมีการจัดเรียงโครงสร้างอะตอมแบบ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัล ที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น  $2s$  ออร์บิทัลจับตัวกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น  $2p_x, 2p_y$  ออร์บิทัล หรือที่เรียกว่าการผสมกัน (hybridization) เมื่อมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน ส่งผลให้การจับตัวกันของอิเล็กตรอนเกิดพันธะซิกมา ( $\sigma$ -bonds) กับออร์บิทัล  $sp^2$  เกิดเป็นโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนที่เรียงต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยม ในระนาบสองมิติที่มีความหนาเพียง 1 อะตอมคาร์บอน ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงที่สุดของพันธะโควาเลนต์ ส่วนอิเล็กตรอนอีก 1 ตัวที่เหลือจากการ hybridization ซึ่งอยู่ในออร์บิทัล  $2p_z$  และตั้งฉากอยู่กับออร์บิทัล  $sp^2$  สามารถจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ หรือเรียกว่าพันธะพาย ( $\pi$ -bonds) กับคาร์บอนอะตอมอื่นได้อีก 1 พันธะ ดังรูปที่ 2.4 ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของกราฟีน [14]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกราฟีน แสดงให้เห็นถึงการรวมกัน  $sp^2$  hybridization เมื่ออะตอมคาร์บอนใช้อิเล็กตรอน  $sp^2$  ร่วมกับอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ใกล้เคียงทั้งสามซึ่งก่อตัวเป็นชั้นของรังผึ้งเครือข่ายของโครงสร้างระนาบซึ่งเรียกอีกอย่างว่ากราฟีนชั้นเดียว [14]

จากรูปที่ 2.5 อธิบายโครงผลึกกราฟีนโดยใช้ โมเดลของบอลและสติค (ball and stick model) โดยใช้สัญลักษณ์ คือ ลูกบอลสีน้ำเงินแทน ซับแลตทิซเอ (sublattice A) และสีแดง แทน ซับแลตทิซบี (sublattice B) สัญลักษณ์ ที่เป็นเส้นดำทึบ แสดงถึงอะตอมของคาร์บอนที่จับตัวกันด้วยพันธะซิกมาดังรูป 2.5 (ก) ความยาวพันธะ จากอะตอม A ถึงอะตอม B มีค่า  $1.42 \text{ \AA}$  ถ้ารวมระบบโครงผลึกทั้งหมดเข้าด้วยกันจะมี  $2 \pi$  อิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ โดยพื้นฐาน ระบบโครงผลึกแบบหกเหลี่ยม และมีหน่วยเซลล์ (primitive unit cell) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก สี่เหลี่ยมด้านขนานที่มีด้านเท่ากันทุกด้านและความยาวระหว่างอะตอม A ถึงอะตอม A ลูกครีสีดำ มีค่า  $2.46 \text{ \AA}$  [15] ดังรูป 2.5 (ข)



รูปที่ 2.5 โครงผลึกคล้ายรังผึ้งในกราฟีนโดยใช้ โมเดลของบอลและสติค (ก) โครงผลึกกราฟีน (ข) โครงผลึกแบบหกเหลี่ยมและมีหน่วยเซลล์

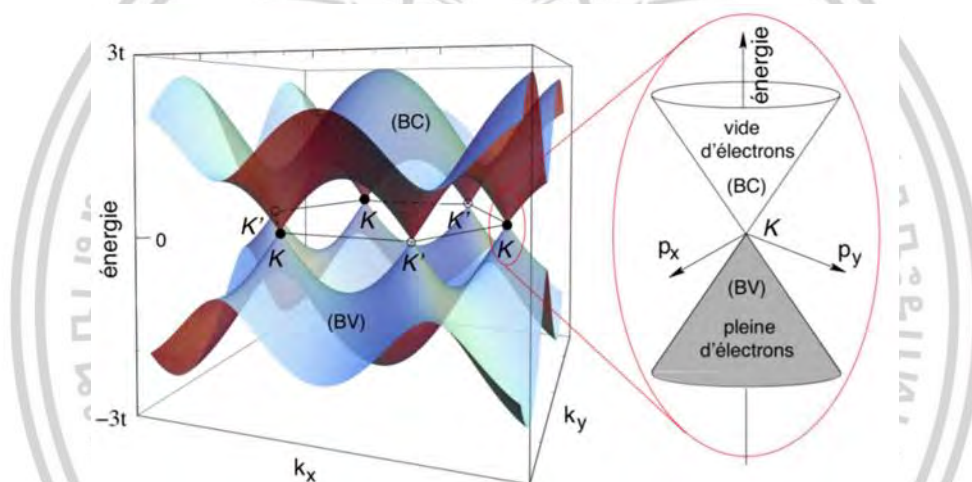
โครงสร้างเชิงโมเมนตัมของกราฟีนกำหนดจุดเป็น  $K, K', M$  และ  $\Gamma$  โดยเราจะนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของพลังงานกับโมเมนตัมโดยใช้ทฤษฎี Tight binding model กราฟีนจัดเรียงโครงสร้างอะตอมแบบ  $sp^2$  ไฮบริดออปิทัล จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับโมเมนตัมดังสามการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ที่ให้พลังงานของอิเล็กตรอนออกมาในรูปของ “wave vector  $k$ ” ภายใต้การสมมติฐานที่ว่าอิเล็กตรอนสามารถกระโดดไปที่อะตอมข้างๆ ที่ใกล้ที่สุดด้วยค่าพลังงาน “ $\gamma_0$ ” (Hopping energy)

$$E(\mathbf{k}) = \pm \gamma_0 \sqrt{1 + 4 \cos^2 \frac{1}{2} a k_x + 4 \cos \frac{1}{2} a k_x \cdot \cos \frac{\sqrt{3}}{2} a k_y} \quad (1)$$

โดยที่  $\gamma_0$  เป็น Hopping energy มีค่าประมาณ 2.8 eV โดยที่เครื่องหมาย + และ - สอดคล้องกับแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ ซึ่งแถบพลังงานทั้งสองนี้จะสัมผัสกันที่จุด  $k$  ใน Brillouin zone ทำให้กราฟีนเป็นวัสดุกึ่งโลหะ (semi-metal) ที่ไม่มีแถบพลังงานว่าง (ZERO GAP) [16] แสดงดังรูป 2.6



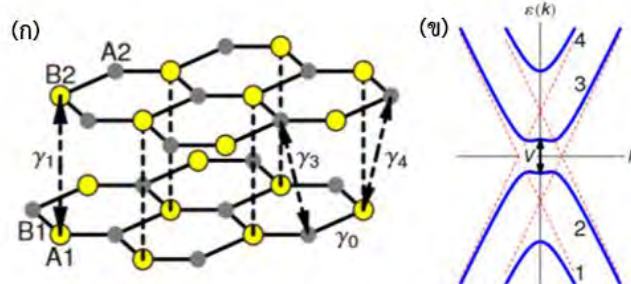
รูปที่ 2.6 รูปจำลองแถบพลังงานของกราฟีน

### 2.2.2 กราฟีนสองชั้น (Bilayer graphene)

กราฟีน ถูกเรียกว่าเป็นกึ่งโลหะ (semimetal) เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเกิดจากแถบนำ (conduction bands) และแถบวาเลนซ์ (valence bands) ไม่ได้ซ้อนทับกันแต่สัมผัสกันพอดีที่จุดๆหนึ่ง กราฟีนสองชั้นประกอบด้วยโครงร่างคู่คาร์บอนของอะตอมคาร์บอนซึ่งครึ่งหนึ่งของอะตอมอยู่ตรงกลางของรูปหกเหลี่ยมในแผ่นกราฟีนประกอบด้วยอะตอม  $A_1$  และ  $B_1$  บนชั้นที่หนึ่ง และ  $A_2$  และ  $B_2$  ในชั้นที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) ทั้งสองชั้นจะถูกจัดเรียงใน Bernal stacking ที่อะตอม  $A_2$  ตั้งอยู่ด้านล่างของอะตอม  $B_1$  โดยตรง ค่าคงที่ของชั้นนั้นประมาณ 0.246 nm และระยะห่างของชั้น 0.334 nm ในกรณีที่กราฟีนเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนหกเหลี่ยมการรวมกันเชิงเส้นของอะตอม ไม่มีความผิดปกติโครงสร้างของกราฟีนสองชั้นสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2

$$E_{u,s}(k) = s(u \frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + (hv_F k)^2}) \quad (2)$$

โดยที่  $\mu = \pm 1$ ,  $s = \pm 1$ ,  $y_1 = 0.39$  eV ที่เชื่อมต่อระหว่างชั้น ดัชนี  $\mu = (-)$  ให้แถบความถี่หนึ่งคู่ใกล้กับ ศูนย์พลังงานและ  $\mu = (+)$  อีกคู่หนึ่งถูกผลักออกไปประมาณ  $\pm y_1$  ในแต่ละคู่  $s = (+1)$  และ  $(-1)$  แทน อิเล็กตรอน (CB) และโฮล (VB) ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 (ข) โครงสร้างแถบของ bilayer graphene เป็นกำลังสองที่ small momenta เช่นแก๊สอิเล็กตรอนสองมิติและกลายเป็นเส้นตรงด้วย โมเมนตัมที่เพิ่มขึ้นเหมือนกราฟีนชั้นเดียว



รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้าง Bilayer graphene แสดงแลตทิซประกอบด้วยอะตอม A<sub>1</sub> และ B<sub>1</sub> บนชั้น 1 และ A<sub>2</sub> และ B<sub>2</sub> ในชั้น 2 (ข) โครงสร้างแถบพลังงาน Bilayer graphene

### 2.2.2 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีน

กราฟีนเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีเยี่ยม เนื่องจากกราฟีนเป็นวัสดุที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวของอะตอมคาร์บอนและเป็นวัสดุที่บาง แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้ มีความแข็งแรงกว่าเหล็ก มีค่ามอดูลัสของยังประมาณ 1 TP นอกจากนี้ค่าการนำความร้อนของกราฟีนที่อุณหภูมิห้องมีค่า มากกว่า 5000 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> เทียบเท่ากับค่าการนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนที่รวมตัวกันเป็นมัดและยิ่งกว่านั้น กราฟีนยังมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับค่าการนำความร้อนของเพชรซึ่งเพชร เป็นอัญรูปหนึ่งของ คาร์บอนที่มีสมบัติการนำความร้อนที่ดีเยี่ยม กราฟีนเป็นวัสดุที่มีความหนาของ คาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่มี พื้นที่ผิวขนาดใหญ่ 2,630 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> มีสมบัติเกือบโปร่งแสงมีค่าการดูดกลืนแสง ~2.3 % ของแสงสีขาว กราฟีนยังสามารถคืนสภาพเดิมได้และมีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจในหลายๆด้าน กราฟีนมีค่า การนำไฟฟ้าดีเยี่ยม การนำไฟฟ้าของกราฟีนเกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกราฟีนซึ่งมีพฤติกรรม เลียนแบบอนุภาคเฟอร์มิออน (Massless fermions) ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายโดยใช้สมการดิแรก (Dirac-like equation) เป็นผลมาจากการที่อิเล็กตรอนในกราฟีนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฟอร์มิ (Fermi

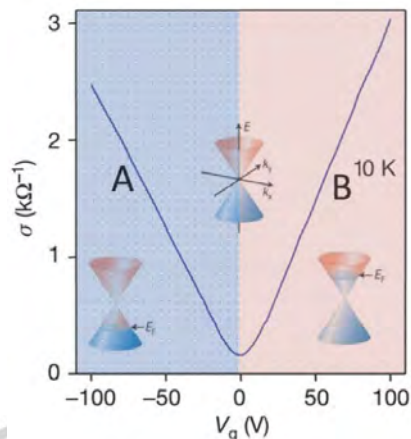
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

velocity) มีค่าประมาณ  $1 \times 10^6 \text{ ms}^{-1}$  ในระยะทางระดับไมโครเมตรโดยไม่มีการกระเจิงของอิเล็กตรอนเกิดขึ้น [17]

### 2.2.3.1 การขนส่งของอิเล็กตรอน

กราฟีนเป็นวัสดุสองมิติที่การขนส่งอิเล็กตรอนถูกควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพโดยทฤษฎีควอนตัมสัมพัทธภาพกราฟีนมีค่าความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทูลูณหุุมิห้องที่มีค่ามากกว่า  $15,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลเกือบจะเป็นค่าเดียวกัน โดยที่ค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 10K ถึง 100K ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงการเกิดการกระเจิงจากข้อบกพร่องของผลึก และความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ในอุณหภูมิห้องมีค่าสูงถึง  $200,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ที่ความหนาแน่นของพาหะประจุเท่ากับ  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ความต้านทานของ กราฟีนมีค่าประมาณ  $10^{-6}$  โอห์มเซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าความต้านทานของเงินและกราฟีนยังมีค่าความต้านทานต่ำสุดที่อุณหภูมิห้องจากการทดลองกราฟีนมีค่าความคล่องตัวของการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าอยู่ที่  $40,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  เนื่องจากกราฟีนที่อยู่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ มีการกระเจิงของอิเล็กตรอนโดยโฟนอนแสงของพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์มีขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิห้องมากกว่าการกระเจิงด้วย โฟนอนของตัวกราฟีนเอง [18]

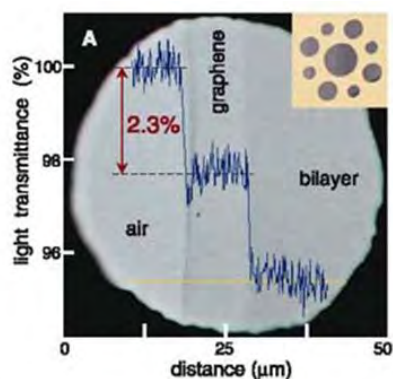
บริเวณจุดตัดของแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าเกิดพลังงานเฟอร์มิขึ้นที่จุดสองจุดนี้และการกระจายพลังงานเชิงเส้นจะแสดงที่  $1 \text{ eV}$  ของการแยกเหล่านี้ส่งผลให้เกิดโครงสร้างรูปกรวยเนื่องจากรูปทรงกรวยที่มีลักษณะเฉพาะนี้พาหะประจุไฟฟ้าภายในวัสดุจึงมีความสัมพันธ์เชิงสัมพัทธ์ ดังนั้นประจุพาหะจึงถูกจัดประเภทเป็น ไม่มีมวล และสามารถพิจารณาอิเล็กตรอนได้โดยไม่ต้องมีมวลเลย เรียกว่า massless relativistic particle โดยมีประจุเป็นอิเล็กตรอน และจุด K และ K' ถือเป็นจุดไคเรคอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนกราฟีนแบบ เป็นเส้นตรงเรียกว่า การนำไฟฟ้าโดยไม่มีการกระเจิง (Ballistic transport) บนสเกล submicrometer การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนและค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์พบว่าทั้งคู่เป็นฟังก์ชันของแรงดันเกต [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คุณลักษณะทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งในกราฟีนชั้นเดียวคือการมีอยู่ของเอฟเฟกต์ควอนตัมฮอลล์ผิดปกติ "Half integer" ที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิห้อง เกิดขึ้นจากการปรากฏตัวของระดับ quantized ที่ศูนย์ซึ่งประกอบด้วยทั้งอิเล็กตรอนและโฮล แนวโน้มดังกล่าวมีความชัดเจนในการวัดค่าการนำไฟฟ้าฮอลล์เทียบกับความเข้มข้นของพาหะอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนแผ่นกราฟีนยังมีความสามารถในการทะลุ ทะลวงชั้นที่มาขวางได้อย่างง่ายดาย โดยไม่มีการสูญเสียโมเมนตัมและความคล่องตัวสูงมากเรียกว่า Klein effect



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนกับแรงดันเกตที่วัดได้ที่ 10 K บริเวณสีน้ำเงิน (A) และสีแดง (B) แสดงถึงกราฟีนที่เจือด้วยโฮลและอิเล็กตรอน [19]

### 2.2.3 คุณสมบัติทางแสงของกราฟีน

กราฟีนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านแสงที่โดดเด่นมีความโปร่งแสงสูงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว กราฟีนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวของอะตอมคาร์บอนจะมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 2.3% ของแสงขาว จากการทดลองเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านได้ในตัวกลางอากาศ ของค่าโครงสร้างละเอียดคงที่ ที่เกิดจากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีนชั้นเดียวเกิดความผิดปกติทำให้แถบพลังงานของกราฟีนที่เป็นรูปทรงกรวยมาสัมผัสกันที่จุด Dirac point ซึ่งเป็นคุณภาพที่แตกต่างจากแถบขนาดใหญ่ที่อยู่ในรูปแบบแถบของกราฟไฟท์ จากผลการทดลองทางสเปกโตรสโกปี กราฟีนมีความโปร่งแสงสูงถึง 97-98 % เนื่องจากความทึบของกราฟีนจะไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นจำนวนชั้นของกราฟีนเพิ่มขึ้นหนึ่งชั้นจะทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้น 2.3 % แสดงให้เห็นว่าความทึบแสงของกราฟีนจะเพิ่มตามจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น [20] แสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านในตัวกลางอากาศ

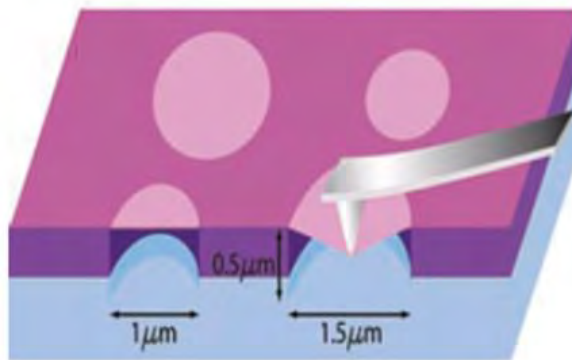
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 คุณสมบัติทางการนำความร้อนของกราฟีน

คุณสมบัติการนำความร้อนเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่น่าสนใจและกราฟีนยังเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการใช้งานของการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่อุณหภูมิห้องกราฟีนมีค่าการนำความร้อนที่วัดได้อยู่ในช่วง 3000 - 5000 W/mK มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของกราฟที่ไพโรไลติกประมาณ  $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองค่าการนำความร้อนในระนาบของกราฟีนที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ประมาณ 2000–4000  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  สำหรับตัวอย่างที่แขวนลอยอย่างอิสระ กราฟีนถือเป็นตัวนำความร้อนที่ดีเยี่ยม จากการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างการนำความร้อนได้ไม่จำกัดโดยพิจารณาจากขนาดของตัวอย่างยิ่งกราฟีนมีขนาดใหญ่เท่าใด ความร้อนก็จะยิ่งถ่ายเทได้มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งกราฟีนสามารถดูดซับความร้อนได้ไม่จำกัด ค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามลอการิทึม และนักวิจัยเชื่อว่านี่อาจเป็นเพราะรูปแบบการยึดติดที่เสถียรเช่นเดียวกับการเป็นวัสดุสองมิติ เนื่องจากกราฟีนมีความทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีกว่าเหล็ก อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่น [21] การนำไฟฟ้าของกราฟีนจึงมีประโยชน์ในการใช้งานจริง

### 2.2.5 คุณสมบัติทางกลของกราฟีน

กราฟีนได้รับการยกย่องว่าเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความแข็งแรงมากที่สุดกราฟีนมีค่าความแข็งแรงต้านการแตกหัก (breaking strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร หรือมากกว่า 100 เท่าของแผ่นเหล็กที่มีความหนาเท่ากัน ด้วยโมดูลัสแรงดึงจาก 1 TPa และค่าความแข็งแรงภายใน (Intrinsic strength) สูงถึง 130 GPa กราฟีนมีน้ำหนักเพียงประมาณ 0.77 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร ด้วยสมบัติเชิงกลที่พิเศษเหล่านี้ของกราฟีน ประกอบกับความเบาและแข็งแรงแต่ยืดหยุ่นทำให้กราฟีนถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกลระดับไมโคร จากการทดลองโดยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมวัดแรงดึงคดคงที่ของกราฟีนที่อยู่บนวัสดุฐานรอง SiO<sub>2</sub> แผ่นกราฟีนที่ยึดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ปลายโพรบของ AFM แทรกเข้าไปในโพรงสองโพรง แสดงดังรูป 2.10 วัดค่าแรงคดคงที่จะมีค่าอยู่ในช่วง 1-5 N/m และ ค่าโมดูลัสของ Young เป็น 0.5 TPa มีค่าสูงมากต่างจากค่าของกราฟที่ไพโรไลติก ทำให้กราฟีนแข็งแรงและหนาแน่น [22]



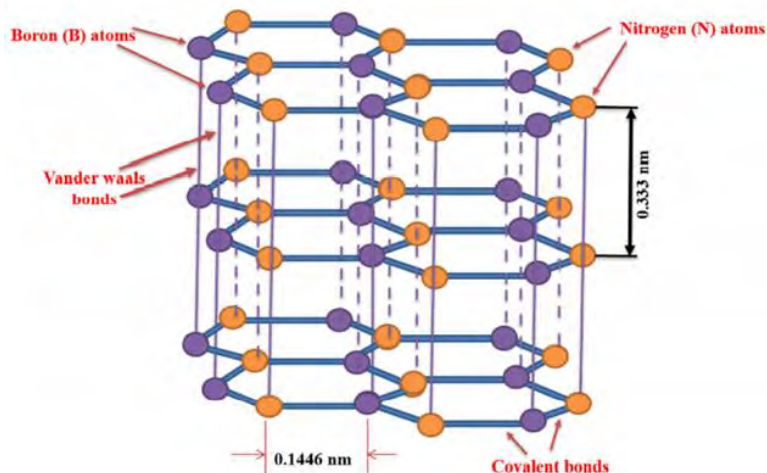
รูปที่ 2.10 กระบวนการ nanoindentation ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทำการวัดแรงตึงคองที่ของแผ่นกราฟีนที่ถูกแขวนอยู่เหนือ SiO<sub>2</sub> แผ่นกราฟีนถูกแขวนอยู่ด้วยกันด้วยแรง van der Waals forces

## 2.3 เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal boron Nitride)

เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal Boron nitride (hBN)) เป็นวัสดุสองมิติ ที่มีโครงสร้างคล้ายกราฟีนที่ประกอบด้วยอะตอม B และ N เรียงสลับกันและมีความทนทานต่อการจัดการทางกลและปฏิกิริยาทางเคมี hBN มีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง UV วัสดุ [23]

### 2.3.1 โครงสร้างผลึกของ hBN

hBN เป็นฉนวนมีความเสถียรสูงเป็นวัสดุที่มีความพิเศษของพื้นผิวเนื่องจากพื้นผิวมีลักษณะแบนเรียบเป็นพิเศษเหมาะสำหรับการห่อหุ้มชั้นเพื่อปกป้องวัสดุจากการเกิดออกซิเดชัน และการกีดกันทางไฟฟ้าหรือทางความร้อนหรือนำมาใช้เป็นพื้นผิวสำหรับซ้อนกันของวัสดุสองมิติ เช่น กราฟีน, MoS<sub>2</sub> และอื่นๆ [24] hBN ประกอบด้วยอะตอม B และอะตอม N จัดเรียงสลับกันในรูปแบบรังผึ้งคล้ายกราฟีน ความยาวพันธะระหว่างอะตอม B – N ยาวประมาณ 1.45 nm เป็นการจัดเรียงตัวแบบ sp<sup>2</sup> hybridization วงโคจร sp<sup>2</sup> ของอะตอม B แต่ละวงจะรวมกับวงโคจร sp<sup>2</sup> ของอะตอม N ที่อยู่ติดกันเพื่อสร้างพันธะที่แข็งแรงเช่นเดียวกับวงโคจร sp<sup>2</sup> แต่ละอะตอม N จะรวมกับวงโคจร sp<sup>2</sup> ของอะตอม B ที่อยู่ติดกันเพื่อสร้างพันธะที่แข็งแรง และระหว่างชั้นถูกยึดติดด้วยแรงแวนเดอวาล์ (van der Waals) ระยะระหว่างชั้นห่างประมาณ 0.333 nm ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกับกราฟีน ในแต่ละชั้นของอะตอม B และ N อะตอมจะถูกรวมเข้าด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) [25] แสดงดังรูป 2.11

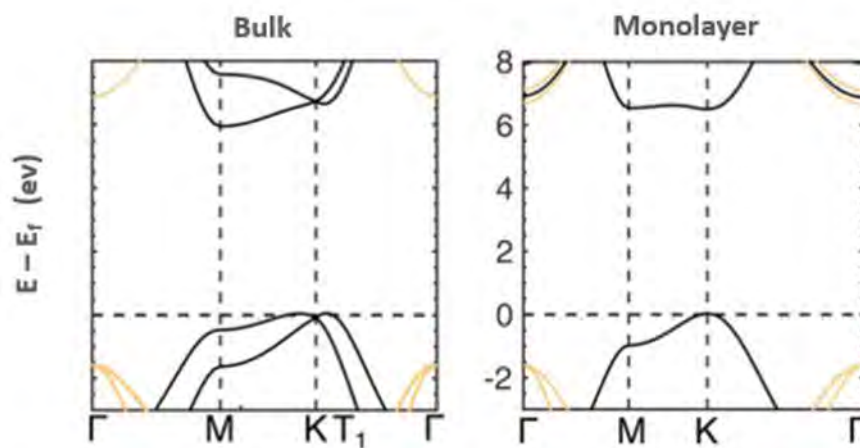


รูปที่ 2.11 แผนภาพของโครงสร้างเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

### 2.3.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ hBN

hBN มีช่องว่างแถบพลังงานที่มีความหนาหลายชั้นจะเป็นช่องว่างแถบพลังงานแบบทางอ้อม (indirect) โดยมีค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่จุด T1 (ตาม  $K-\Gamma$ ) และค่าต่ำสุดของแถบนำ (conduction band) ที่จุด M ของ Brillouin zone มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 4.90 eV เมื่อจำนวนชั้นลดลง ช่องว่างของแถบพื้นฐานเพิ่มขึ้น hBN ชั้นเดียว แสดงช่องว่างที่ใหญ่ที่สุดมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 6.47 eV ช่องว่างแถบพลังงานของ hBN ชั้นเดียว แถบวาเลนซ์และแถบนำของจะตรงกันอยู่ที่จุด K [26] แสดงดังรูป 2.12 hBN มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเข้ากันได้กับ back-gating (3-4 ออเดอร์) มีความแข็งแรง และไม่มีพันธะบนระนาบ เนื่องจากโครงสร้างผลึกระนาบของ hBN สามารถสังเคราะห์โดยเทคนิคการลอกเชิงกลลงบนพื้นผิวในลักษณะเดียวกับกราฟไฟท์ทำให้เกิดความบริสุทธิ์สูง ด้วยวิธีนี้ hBN จะเกิดความผิดปกติน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่น นอกเหนือจากการให้พื้นผิวที่สะอาดของโครงสร้างผลึกของ hBN ยังมีความน่าสนใจ เนื่องจากค่าคงที่ของโครงสร้างเฮเทอโรของกราฟีนและ hBN ลดลงเพียง -1.8% ซึ่งส่วนที่ต่อกันของ hBN กับกราฟีนแบบเรียงซ้อน บริเวณที่ขยายแต่ละ sublattice คาร์บอนติดกับอะตอมของโบรอน (หรือไนโตรเจน) เท่านั้น ซึ่งคาดการณ์ในทางทฤษฎีว่า ช่องว่างแถบพลังงานในกราฟีนจะกว้างขึ้น ความสัมพันธ์การกระจายเชิงเส้นของกราฟีนใกล้กับจุด Dirac มีหน้าที่ในการขนส่งพาหะ และถือเป็นคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัสดุคาร์บอนของ Keener เนื่องจากกราฟีนไม่มีช่องว่างแถบพลังงานการประยุกต์ใช้กราฟีนในการสร้างอุปกรณ์ นาโนอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นไปได้ยาก เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ต้องการช่องว่างแถบพลังงานนักวิจัยได้ใช้วิธีการที่หลากหลายเพื่อวัตถุประสงค์วิธีการเป็นโครงสร้างนาโนคู่ซึ่งทำให้พวกเขาน่าสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างชั้นและการซ้อนทับกันให้ระดับความอิสระเพิ่มขึ้นในการควบคุมโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุคาร์บอน และ hBN

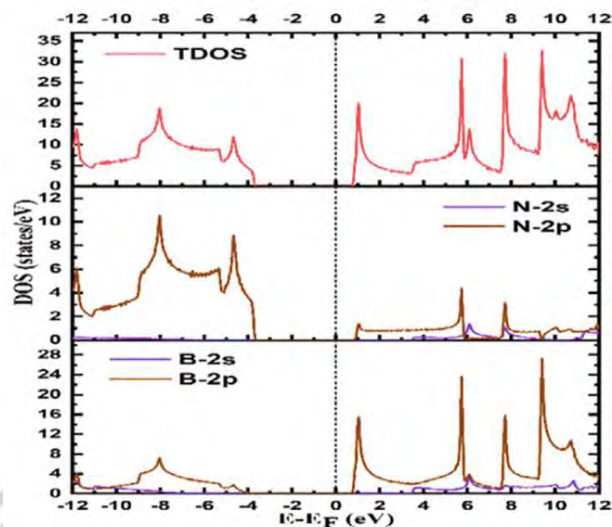
มีค่าคงที่โครงสร้างตาข่ายที่ตรงกัน ด้วยการสร้างโครงสร้างเฮเทอโร graphene / hBN เพื่อควบคุมโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์และแถบพลังงานของกราฟีนได้เป็นอย่างดี [27]



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ hBN โครงสร้างแถบพลังงานของ hBN ที่มีจำนวนหลายชั้น (ซ้าย) และโครงสร้างแถบพลังงานของ hBN ชั้นเดียว (ขวา)

### 2.3.3 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของ hBN

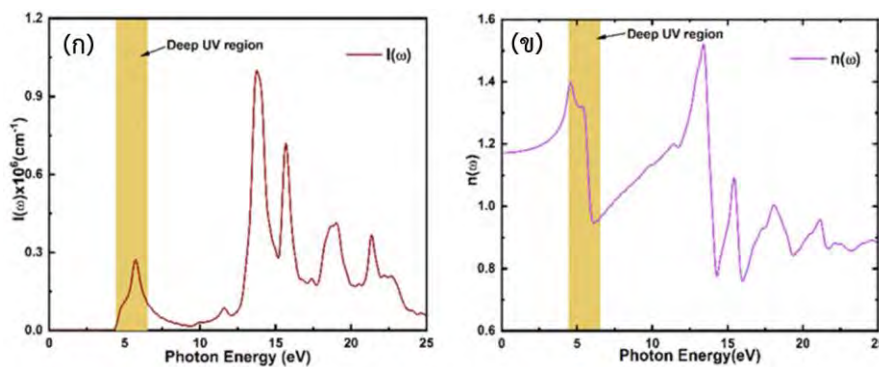
hBN มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจาก มีช่องว่างแถบพลังงานขนาดใหญ่ hBN ชั้นเดียวเป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ชั้นเยี่ยมที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และยังเป็นวัสดุควบคุมความร้อนได้ดี ในขณะที่ hBN มีความเป็นฉนวนในระนาบของ hBN นั้นสูงกว่าของอลูมินาไทฟ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) พิล์ม hBN ชั้นเดียวยังมีค่าการนำโปรตอนสูงที่อุณหภูมิห้อง [28] การซึมผ่านที่เป็นเอกลักษณ์นี้มีความสนใจเป็นพิเศษในการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน และ Curve กล่าวว่า hBN เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรแบบไดนามิก โครงสร้างแถบคำนวณความหนาแน่นรวมและบางส่วนของสถานะ (TDOS และ PDOS) ของ hBN ใน TDOS พีกสูงสุดจะเกิดขึ้นในแถบนำ เนื่องจากวงโคจร 2p ของอะตอม B ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในรูป การมีส่วนร่วมของสถานะ 2s และ 2p สำหรับอะตอม B และ N แสดงให้เห็นผ่าน PDOS จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการมีส่วนร่วมสูงสุดของสถานะ 2s และ 2p สำหรับอะตอม B และ N ในแถบวาเลนซ์ (valance band) เนื่องจากสถานะ 2p ของอะตอม N ในขณะที่แถบการนำจะได้รับสูงสุดโดยอะตอม B ในสถานะ 2p [29] แสดงดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแถบคำนวณความหนาแน่นรวมและบางส่วนของสถานะ (TDOS และ PDOS) [29]

### 2.3.4 คุณสมบัติทางแสงของ hBN

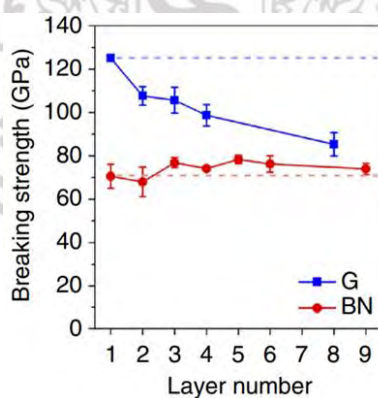
hBN มีคุณสมบัติทางแสงที่น่าสนใจ เช่น ฟังก์ชันไดอิเล็กตริก ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนดัชนีการหักเหของแสง และค่าการสะท้อนแสงด้วยแสงตรวจสอบระหว่างช่วงพลังงาน 0 ถึง 25 eV hBN ชั้นเดียวมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 4.90 eV การวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงของ hBN ยังให้ผลลัพธ์ที่เป็นบวกอย่างมากเกี่ยวกับคุณสมบัตินาโนโฟโตนิกที่เป็นไปได้ของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับความไวที่จำกัดของ hBN ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของแถบพลังงาน hBN มีการดูดซับความยาวคลื่นในช่วง 1950-3200 nm จากการทดลองการแสดงให้เห็นว่า hBN เป็นวัสดุโปร่งใสในบริเวณที่มองเห็นได้ การดูดกลืนสูงสุดอยู่ในบริเวณรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยค่าสูงสุดที่ 14.87 eV แต่ไม่มีการดูดซึมในบริเวณที่มองเห็นได้ ดัชนีการหักเหของแสงจะปรับขนาด 1.17 ที่ขีดจำกัดพลังงานเป็นศูนย์และขยายได้ถึง 1.5 เกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณ UV ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนิววีแบบที่มองเห็นได้ [30] แสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานโฟตอนมีค่าการดูดกลืนสูงสุดที่ 14.87 eV (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเหของแสงกับพลังงานโฟตอนที่มีขีดจำกัดพลังงานเป็นศูนย์และขยายได้ถึง 1.5 ที่เกิดเฉพาะบริเวณ UV [29]

### 2.3.5 คุณสมบัติทางกลของ hBN

hBN ได้รับการยกย่องว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นสูง อะตอมบางเป็นฉนวนไฟฟ้าที่แข็งแรงที่สุดชนิดหนึ่ง จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางกลของ hBN โดยใช้เทคนิค AFM วัด hBN ที่มีความหนา 1-9 ชั้น พบว่าโมดูลัสของ Young มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.865 TPa และความแข็งแรงการแตกหัก 70.5 GPa ในส่วนของ hBN ที่มีความหนาชั้นเดียวหรือ 2-3 ชั้นนั้นมีความแข็งแรงเท่ากับ 1L และในทางตรงกันข้าม กราฟีนชั้นเดียวมีค่าเท่ากับ  $1.026 \pm 0.022$  TPa แต่กราฟีน 8 ชั้นมีค่าเท่ากับลดลงเหลือ  $0.942 \pm 0.003$  TPa [31] แสดงดังรูป 2.15 พบว่าความแข็งแรงลดลงอย่างมากเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น แผ่นโบรอนไนไตรด์สองสามชั้นมีความแข็งแรงคล้ายกับโบรอนไนไตรด์แบบโมโนเลเยอร์



รูปที่ 2.15 แสดงค่าความแข็งแรงการแตกหักของกราฟีนและ BN ความหนาที่แตกต่างกัน เส้นประใน คือเส้นโครงของภาวะการแตกหักของ BN และ graphene (G) ที่มีความหนาต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของความแข็งแรงของชั้นเดียวตามจำนวนชั้น [31]

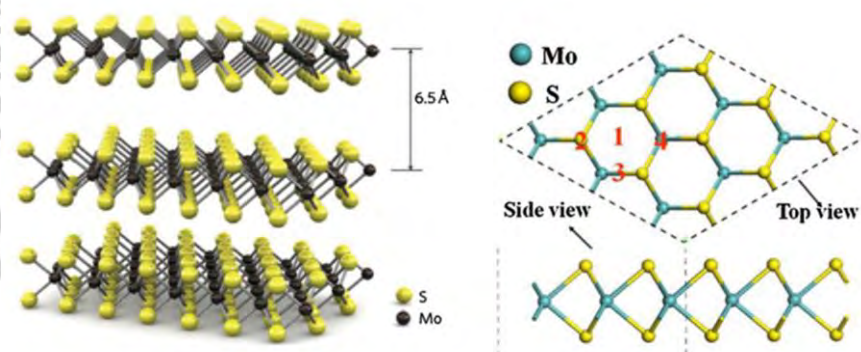
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide)

โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ )) เป็นวัสดุประเภทโลหะทรานซิชันไดคัลโคจีไนด์ (transition metal dichalcogenides (TMDCs)) ประกอบด้วยสององค์ประกอบของโลหะทรานซิชันและเซลโคเจน (Chalcogen) จัดอยู่ในรูปแบบของสารกึ่งตัวนำประเภท  $\text{MX}_2$  โดยที่ M คืออะตอมของโลหะทรานซิชัน (Transition) และ X คืออะตอมของเซลโคเจน (Chalcogen) [32]

### 2.4.1 โครงสร้างผลึก $\text{MoS}_2$

โครงสร้างผลึกของ  $\text{MoS}_2$  อยู่ในรูประนาบหกเหลี่ยมของอะตอม S ที่ด้านใดด้านหนึ่งของระนาบหกเหลี่ยมของอะตอม Mo ระนาบสามระนาบเหล่านี้ซ้อนกันโดยมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแกร่งระหว่างอะตอม Mo และ S ในแต่ละชั้นยึดเข้าด้วยกันด้วยแรงแวนเดอวาล์ (van der Waals) ที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงอ่อนๆ มีระยะห่างระหว่างชั้นห่างกันประมาณ 6.5 Å มีความยาวระหว่างพันธะ Mo-S ห่างกันประมาณ 2.42 Å และโครงสร้างตาข่ายที่ปรับให้เหมาะสมค่าคงที่ของ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวมีความหนาความหนา 3.18 Å [33] แสดงดังรูป 2.16 จากความสนใจในการวิจัย  $\text{MoS}_2$  เป็นวัสดุสองมิติ การใช้งานอุปกรณ์ที่มีศักยภาพ เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบทางตรง (direct) ทำให้มีข้อได้เปรียบเหนือกราฟีน สำหรับการใช้งานหลายอย่าง รวมถึงเซ็นเซอร์ออปติคัลและทรานซิสเตอร์แบบ field-effect [34]



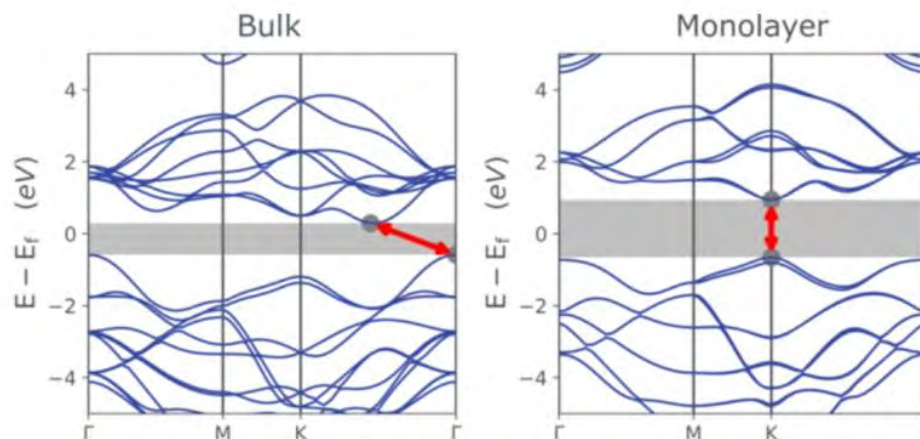
รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้าง 3 มิติของระยะห่างระหว่างชั้นของ  $\text{MoS}_2$

### 2.4.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ $\text{MoS}_2$

โครงสร้างแถบพลังงานของ  $\text{MoS}_2$  มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงเมื่อเทียบกับจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ  $\text{MoS}_2$  หลายชั้นมีช่องว่างแถบพลังงานแบบทางอ้อม (indirect) มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.2 eV แถบวาเลนซ์สูงสุดอยู่ที่จุด  $\Gamma$  และแถบนำต่ำสุดอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างจุด K และ จุด  $\Gamma$  แต่เมื่อจำนวนชั้นลดลงแถบวาเลนซ์และแถบนำของจุดสูงสุดจะตรงกันที่จุด K ส่งผลให้แถบนำและแถบวาเลนซ์มีการเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบทางตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(direct) โดยมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มสูงขึ้น  $\sim 1.89$  eV ซึ่งเป็นโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียว [35] แสดงดังรูป 2.17



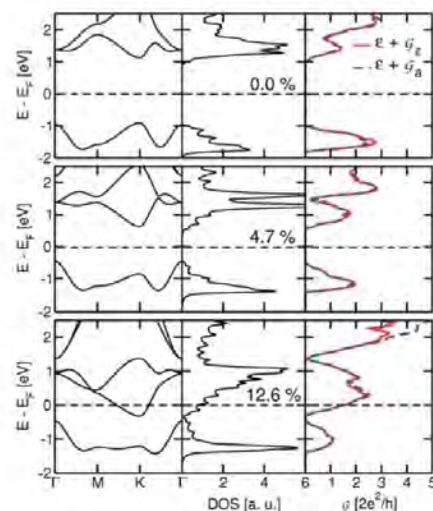
รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> โครงสร้างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> ที่มีจำนวนหลายชั้น(ซ้าย) และโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียว(ขวา) แถบพลังงานของแถบพื้นฐานที่ระบบกำหนดแถบเวเลนซ์ แสดงโดยเส้นทึบ

### 2.4.3 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS<sub>2</sub>

MoS<sub>2</sub> เป็นวัสดุสองมิติ ที่มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่โดดเด่นในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่น่าสนใจสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จากการรายการการศึกษาคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวและสองชั้นภายใต้แรงดึงหรือแรงอัด มีการตรวจสอบความเครียดแบบสองแกนภายในโครงการ DFT GGA ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวและสองชั้นจะลดลงเมื่อมีการเสียรูปแบบประเภทใดก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่คล้ายคลึงกันเกี่ยวกับความแปรผันของช่องว่างแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันของความดันในกลุ่ม MoS<sub>2</sub> สำหรับ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวการเปลี่ยนจากช่องว่างแถบพลังงานแบบทางตรงเป็นทางอ้อม สามารถสังเกตได้เมื่อใช้ความเครียดที่ค่อนข้างเล็กน้อยประมาณ 2% เมื่อพลังงานของแถบด้านบนของสถานะที่ถูกยึดครองเพิ่มขึ้นที่จุด  $\Gamma$  และพลังงานของด้านล่างของแถบว่างที่ว่างลดลงที่จุด K ความเครียดแรงดึงขนาดใหญ่ประมาณ 8% หรือความเครียดอัดประมาณ 15% จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของเซมิคอนดักเตอร์-โลหะ การใช้ความเครียดแกนเดียวกับ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวทำให้ช่องว่างของแถบพลังงานลดลงและแปลงเป็นเซมิคอนดักเตอร์ช่องว่างแบนด์ทางอ้อมตามอนุภาคควอซีเฟิลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น GW การคำนวณ สำหรับความเครียด 1% ของ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวยังคงควรมีช่องว่างแถบพลังงานทางตรง แต่สำหรับความเครียดขนาดใหญ่กว่า มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่ช่องว่างพลังงานทางอ้อม ช่องว่างแถบพลังงานตามทฤษฎีของ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวจะลดลงตามเส้นตรงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยืด จนกระทั่งวัสดุกลายเป็นโลหะที่ระดับความเครียดที่แน่นอน คุณสมบัติที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานที่เป็นไปได้ในนาโนอิเล็กทรอนิกส์และวิศวกรรมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [36] แสดงดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานความหนาแน่นของสถานะและการนำอิเล็กตรอนของ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวภายใต้ความเครียด ไอโซโทปิก (isotropic) โดย nonequilibrium Green's วิธีฟังก์ชันในแนวทาง DFTB Ga และ Gz หมายถึงการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนตามทิศทางอาร์มเจอร์และซิกแซกของชั้นตามลำดับ

#### 2.4.4 คุณสมบัติทางแสงของ $\text{MoS}_2$

$\text{MoS}_2$  ยังมีคุณสมบัติทางแสงที่โดดเด่น เป็นผลมาจากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางแสงซึ่ง  $\text{MoS}_2$  เป็นเซมิคอนดักเตอร์ที่สามารถดูดซับโฟตอนด้วยพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานของ  $\text{MoS}_2$  ซึ่งหมายความว่าแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าจะถูกดูดกลืนชั้นอะตอมของ  $\text{MoS}_2$  เพื่อถูกใช้เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์และเครื่องตรวจจับอัลตราไวโอเล็ต โฟโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญ และ  $\text{MoS}_2$  นั้นมีการแสดงปฏิกิริยาตอบสนองแสงที่  $7.5 \text{ mA W}^{-1}$  ซึ่งคล้ายกับอุปกรณ์กราฟีนโดยที่  $\text{MoS}_2$  แบบหลายชั้นแสดงการตอบสนองต่อแสงที่สูงขึ้น ประมาณ  $100 \text{ mA W}^{-1}$  ซึ่งคล้ายกับอุปกรณ์ซิลิกอน และการทำหน้าที่ของทองที่สัมผัสขั้วไฟฟ้า (gold contact) ของ  $\text{MoS}_2$  ที่มีความหนาแน่นเดียวช่วยให้สามารถประดิษฐ์เครื่องตรวจจับแบบอัลตราไวโอเล็ตได้เครื่องตรวจจับดังกล่าวมีความไวแสงสูงถึง  $880 \text{ A W}^{-1}$ ,  $10^6$  มากกว่าตัวตรวจจับแสง กราฟีน และการควบคุมไฟฟ้าสถิตในระดับสูงนี้เกิดจากบริเวณแอกทีฟ (active) ของโมโนเลเยอร์ ซึ่งเกิดได้เพียงกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์ ในขณะที่เครื่องตรวจจับแสงรุ่นปัจจุบันโดยทั่วไปแล้วจะเป็นจุดต่อ p-n ทำให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ เช่น เครื่องตรวจจับแสงที่มีความไวสูงและยืดหยุ่น ข้อจำกัดเพียงอย่างเดียวสำหรับอุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันคือไดนามิกการตอบสนองด้วยแสงที่ช้า [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.5 คุณสมบัติทางกลของ MoS<sub>2</sub>

MoS<sub>2</sub> มีคุณสมบัติโดดเด่นเป็นเลิศในฐานะวัสดุหล่อลื่นเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ การเลื่อนระหว่างชั้นจะกระจายพลังงานเมื่อมีการใช้แรงเฉือนกับวัสดุ มีการทำงานอย่างกว้างขวางเพื่อกำหนดลักษณะสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงเฉือนของ MoS<sub>2</sub> ในบรรยากาศต่างๆ [38] แรงเฉือนของ MoS<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น คุณสมบัตินี้เรียกว่า superlubricity ที่สภาวะแวดล้อม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับ MoS<sub>2</sub> ถูกกำหนดเป็น 0.150 โดยมีค่าแรงเฉือนโดยประมาณที่สอดคล้องกันที่ 56.0 MPa วิธีการวัดค่าแรงเฉือนโดยตรงระบุว่า ค่าอยู่ใกล้ 25.3 MPa ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา MoS<sub>2</sub> ถูกใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ยืดหยุ่น ส่งเสริมการตรวจสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุนี้มากขึ้น และการทดสอบการดัดงอด้วยกล้องนาโนของเทคนิค AFM กับผลึก MoS<sub>2</sub> ที่ได้จากเทคนิคการลอกเชิงกลที่วางทับบนพื้นผิวที่เป็นรู มีค่าความแข็งแรงของผลึกที่มีความหนาชั้นเดียวคือ 270 GPa ในขณะที่ผลึกมีความหนาเพิ่มขึ้นก็มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 330 GPa [39] การจำลองแบบไดนามิกระดับโมเลกุลพบว่าความแข็งแรงของผลผลิตในระนาบของ MoS<sub>2</sub> เท่ากับ 229 GPa โครงสร้างโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> มีความไวต่อความเครียด

## 2.5 ฟอสฟอรัสดำ (Black phosphorus)

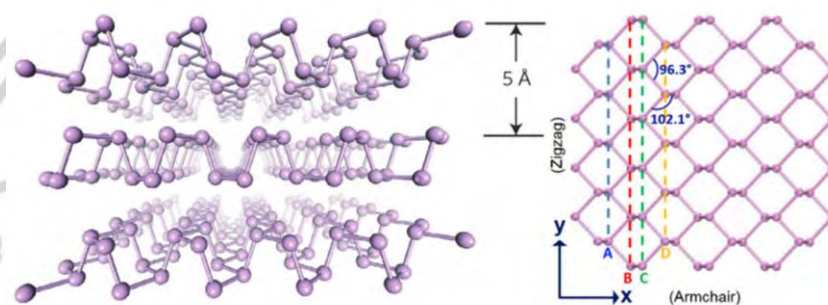
ฟอสฟอรัสดำ (Black phosphorus (BP)) เป็นวัสดุสองมิติที่มีสมบัติทางกายภาพ เคมี และอิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจ ฟอสฟอรัสถือว่ามีหลายรูปแบบสามารถแบ่งเป็น สีขาว สีแดง และสีดำ จากโมเลกุลมิติต่ำ (0 มิติ เป็นรูปแบบ ฟอสฟอรัสขาว), โครงสร้างพอลิเมอร์ (1 มิติ เป็นรูปแบบ nanorods ฟอสฟอรัส) ถึงชั้น (สองมิติ เป็นรูปแบบ ฟอสฟอรัสดำ) และโครงสร้างแบบท่อ (สองมิติ และ 3 มิติ เป็นรูปแบบผลึกของฟอสฟอรัสแดง) [40]

### 2.5.1 โครงสร้างผลึกของ BP

BP เป็นเซมิคอนดักเตอร์ มีลักษณะคล้ายกับกราฟไฟท์ โครงสร้างผลึกของฟอสฟอรัสดำ จะมีจำนวนฟอสฟอรัสจับไม่ถ่วงจัดเรียงตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่ชั้นของ BP ไม่แบนราบแต่มีการหยักขึ้นลง อะตอมแต่ละอะตอมถูกผูกมัดกับอะตอมที่อยู่ใกล้เคียง 3 อะตอม และโครงสร้างที่เป็นรอยหยักของชั้นเกิดจากการผสมของ sp<sup>3</sup> hybridization ระหว่างอะตอมของฟอสฟอรัสเนื่องจากธาตุฟอสฟอรัสมีอิเล็กตรอนเพียงสามตัวเท่านั้น และ BP ที่เรียงต่อกันเพียงชั้นเดียวหรือ 2-3 ชั้น เรียกว่า ฟอสโฟรีน (phosphorene) โดยที่อะตอมของฟอสฟอรัสแต่ละชั้นถูกยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 0.35 nm โดยที่ชั้นเดียวของฟอสฟอรัสดำประกอบด้วยชั้น

อะตอม 2 ชั้น โดยที่ระยะพันธะระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุด  $d_1$  คือ 2.224 nm และ ความยาวของการเชื่อมต่อระหว่างอะตอมบนและล่าง  $d_2$  ในชั้นเดียวคือ 2.244 nm [41] แสดงดังรูป 2.19

BP เป็นอัญรูปที่เสถียรที่สุดของฟอสฟอรัส ภายใต้สภาวะปกติ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างเป็นชั้นและโครงสร้างเป็นแบบ orthorhombic ที่เป็นรอยหยักระหว่างชั้น BP ยังแสดงลำดับโครงสร้างที่น่าสนใจจากการแปลงจากเคมีคอนดักเตอร์เป็นเฟสกึ่งโลหะจากนั้นเป็นเฟสโลหะตามลำดับเมื่อความดันเพิ่มขึ้น และการสังเคราะห์ผลึกของ BP ทำได้โดยนำฟอสฟอรัสขาวมาให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิต่ำและสูง ถ้าอุณหภูมิต่ำเกิน 450 องศาเซลเซียส หรือทิ้งไว้นานๆ สามารถเปลี่ยนเป็นฟอสฟอรัสแดงซึ่งเป็นรูปอัญรูปที่เสถียรที่สุด

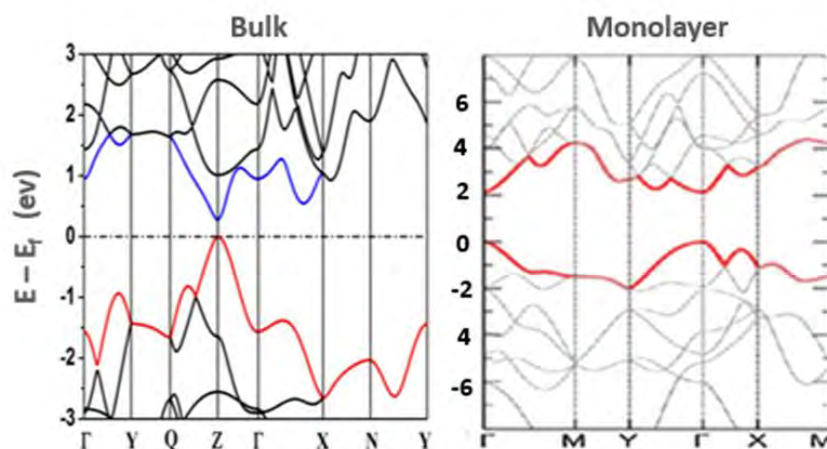


รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้าง 3 มิติของระยะห่างระหว่างชั้นของฟอสฟอรัสดำ

## 2.5.2 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ BP

BP เป็นเคมีคอนดักเตอร์ที่มี ช่องว่างแถบพลังงานแบบทางตรง (direct) โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟอสฟอรัสหลายชั้น สามารถจับแถบช่องว่างที่ขึ้นกับความหนาได้ แต่การคำนวณจะประเมินค่าช่องว่างต่ำกว่ามาตรฐานเสมอ BP หลายชั้นเป็นวัสดุที่มีช่องว่างแถบพลังงานทางตรงที่ช่วงอินฟราเรดกลาง (mid-IR) BP ชั้นเดียวมีช่องว่างแถบพลังงานทางตรงประมาณ 2 eV เนื่องจาก พันธะโควาเลนต์สามพันธะครอบครองอิเล็กตรอนทั้งสามในอะตอมทั้งการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองสเปกตรัมพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนแบบละเอียดเชิงมุมแสดงให้เห็นว่าจำนวนชั้นอะตอมมากกว่า 8 ผลึกของ BP จะมีสารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานทางตรงประมาณ 0.3 eV ซึ่งก็คือ ว่างกราฟีนที่มีช่องว่างแถบศูนย์และโลหะทรานซิชันซัลไฟด์ที่มีช่องว่างแถบขนาดใหญ่ โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ BP คำนวณโดยใช้แบบจำลองต่างๆ ระยะห่างระหว่างด้านบนและด้านล่างของแถบนำทางที่จุด Z ของ BP ที่มีความหนาหลายชั้นคือ 0.3 eV และความโค้งของแถบพลังงานนั้นสูงสุด ณ จุดนี้ ความโค้งตามทิศทาง Z-Q คือมากกว่าแนว Z- $\Gamma$  [42] กล่าวคือ เมื่อจำนวนชั้นลดลง ถึงประมาณ 6 ชั้น โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ BP ชั้นเดียวหรือแบบบาง ผลึกมีลักษณะที่ขึ้นกับจำนวนชั้น จากการคำนวณทางทฤษฎีค่าช่องว่างของผลึก BP

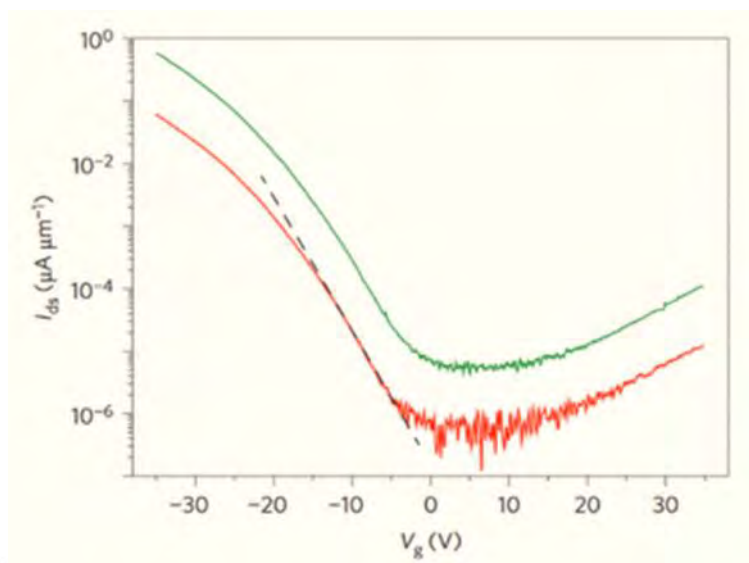
ชั้นเดี่ยวอยู่ระหว่าง 2.0 eV และ 1.4 eV แต่ส่วนใหญ่ระบุว่าชั้นเดี่ยวของ BP มีช่องว่างแถบพลังงานทางตรง [43] แสดงดังรูป 2.20 โครงสร้างจะแสดงการกระจายตัวของพลังงานและโมเมนตัมแบบแอนไอโซทรอปิกที่แข็งแกร่ง ซึ่งแสดงให้เห็นมวลที่มีประสิทธิภาพของพาหะแอนไอโซทรอปิกอย่างชัดเจน [44]



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของฟอสฟอรัสดำ โครงสร้างแถบพลังงานของ ฟอสฟอรัสดำ ที่มีจำนวนหลายชั้น (ซ้าย) และโครงสร้างแถบพลังงานของ ฟอสฟอรัสดำ ชั้นเดี่ยว (ขวา)

### 2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ BP

BP เป็นวัสดุสองมิติที่มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคล่องตัวพาหะ (carrier mobility) ที่ดีเยี่ยม จากการศึกษาเชิงทฤษฎีพบว่ามวลที่มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอนใน BP คือ  $0.22 m_0$  และมวลที่มีประสิทธิภาพของโฮล คือ  $0.24 m_0$  น้อยกว่ามวลที่มีประสิทธิภาพของพาหะซิลิกอน (silicon carriers) [45] จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานของ BP ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของ BP ถูกควบคุมด้วยโฮลแทนการควบคุมของอิเล็กตรอน ที่อุณหภูมิห้อง การเคลื่อนที่ของพาหะของโฮลใน BP มีค่า  $350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ S}^{-1}$  สูงกว่าอิเล็กตรอนอย่างมากซึ่งการเคลื่อนที่พาหะของอิเล็กตรอนใน BP มีค่า  $220 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ S}^{-1}$  ที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน ช่องว่างแถบพลังงานของ BP จะลดลงเมื่อความดันภายนอกเพิ่มขึ้น และ BP เปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำเป็นโลหะและสุดท้ายเป็นตัวนำยิ่งยวด ในบรรดาวัสดุทั้งหมด มีเพียง BP เท่านั้นที่สามารถผ่านการเปลี่ยนเฟสได้ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความดัน ซึ่งแสดงให้เห็นอีกครั้งว่าแอนไอโซทรอปิกของคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของ BP [46],[47] แสดงดังรูป 2.21



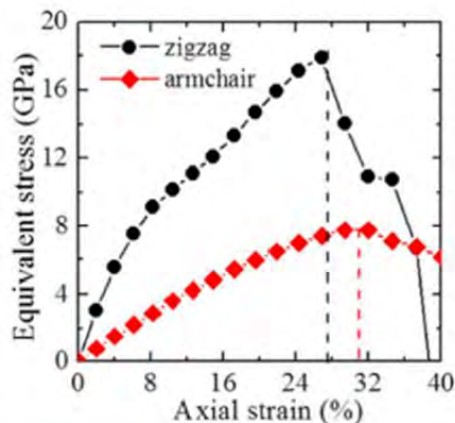
รูปที่ 2.21 กราฟแสดงลักษณะการถ่ายโอนของ FET ที่แรงดันไบแอสที่ต่างกันของ BP

#### 2.5.4 คุณสมบัติทางแสงของ BP

BP เป็นวัสดุ 2 มิติที่มีคุณสมบัติทางแสงที่โดดเด่นแปลกประหลาดมากมาย รวมถึงเชิงเส้น การดูดกลืนแสงและการดูดกลืนความถี่แบบไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ยังมี excitons ที่แตกต่างกันที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางแสงที่แปลกประหลาดเหล่านี้ ซึ่งแสดงคุณสมบัติของ exciton แบบแอนไอโซทรอปิก จากการศึกษา Surface plasmons เป็นจุดสนใจในการวิจัยเชิงทัศนศาสตร์ แสดงให้เห็นว่า BP มีช่องว่างแถบพลังงานทางตรงกว้างที่ปรับแต่งได้ ซึ่งทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างในออปติก (โดยเฉพาะในบริเวณคลื่นอินฟราเรดและบริเวณอินฟราเรดกลาง) [48]

#### 2.5.5 คุณสมบัติทางกลของ BP

BP เป็นวัสดุสองมิติ ที่มีความเปราะบางอย่างมากเนื่องจากมีความไม่เสถียรทางอากาศ จากการศึกษาเชิงทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าความเข้ม (intensity) ของ BP ตามทิศทางซิกแซกของความหนาชั้นเดียวนั้นสูงถึง 18 GPa และตัวแปรความเครียด (strain) สูงถึง 27% ความหนาแน่นตามทิศทางเฉพาะนั้นสูงถึง 8 GPa และ ตัวแปรตามสูงถึง 30% แสดงดังรูปที่ 2.22 จากการทดลองแสดงผลการคำนวณแบบพับเป็นชั้นของโครงสร้าง BP ลดโมดูลัสของ Young และแสดง ความเค้น-ความเครียด (stress-strain) ที่เห็นได้ชัด BP มีเอฟเฟกต์ปัวซองเชิงลบ (negative Poisson effect) ในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างระนาบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสีรูปการตัดของ BP ประเภทซิกแซกเป็นสาเหตุของการเกิดความไม่เสถียรในการตัดทิศทางแบบซิกแซก แรงผลักของคู่อิเล็กตรอนใน BP เป็นกลไกหลักของกลไกทางกายภาพของแอนไอโซโทรปีในการเปลี่ยนรูปการตัดของ BP [49]



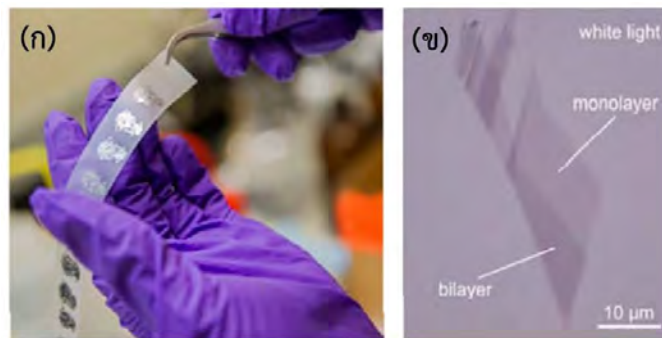
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดสำหรับโมโนเลเยอร์สามารถรักษาความเครียดได้ถึง 18 GPa และ 8 GPa ใน zigzag และ armchair [49]

## 2.6 การสังเคราะห์วัสดุสองมิติ

นักวิทยาศาสตร์ได้มีการคิดค้นวิธีการสังเคราะห์วัสดุสองมิติ ให้คงคุณสมบัติต่างๆ ทั้งคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางแสง โดยปกติการเตรียมวัสดุสองมิติสามารถเตรียมได้ 3 วิธีหลักๆ คือ การลอกที่มีความบริสุทธิ์สูง (Micromechanical Exfoliation) การปลูกผลึกเดี่ยว (Epitaxial Growth) บนซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และการสร้างชั้นสารจากไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition หรือ CVD)

### 2.6.1 Micromechanical Exfoliation

การเตรียมวัสดุสองมิติด้วยเทคนิค Micromechanical Exfoliation คือการลอกโดยใช้เทปกาว ทาบลงบนผลึกของวัสดุสองมิติ แสดงดังรูป 2.23 เทคนิคนี้เป็นเทคนิคแรกที่มีการถูกค้นพบจากผลึกกราไฟท์และเป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อนในสังเคราะห์น้อยที่สุด และเทคนิคนี้ก็ยังทำให้ได้ วัสดุสองมิติ ที่มีความบริสุทธิ์สูงอีกด้วยจึงเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่ แต่วิธีนี้สามารถเตรียมได้ที่ละน้อย (เพียงไม่กี่ไมครอน) [50]



รูปที่ 2.23 (ก) การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Mechanical exfoliation [1] (ข) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของกราฟีน

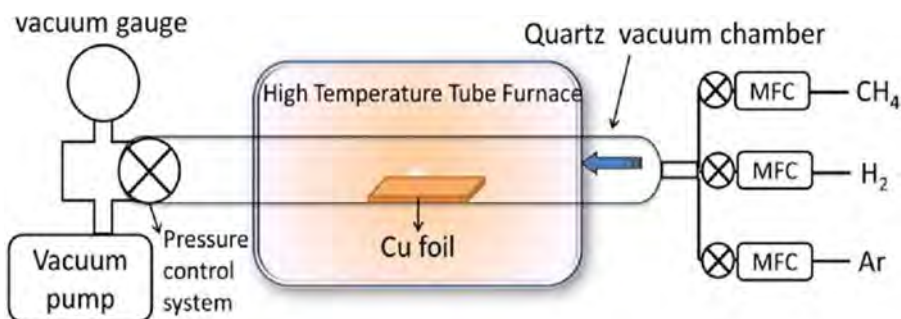
### 2.6.2 Epitaxial Growth

เทคนิคนี้เป็นการปลูกวัสดุสองมิติบนฐานรอง (substrate) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) โดยจะต้องปลูกภายใต้สภาวะสุญญากาศ (UHV  $10^{-7}$  Pa) และมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยความร้อนที่ให้แก่ซิลิกอนคาร์ไบด์นั้น จะทำให้อะตอมซิลิกอนเกิดการระเหิดออกมาจากพื้นผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ เหลือไว้เพียงอะตอมคาร์บอนที่ก่อตัวเป็นชั้นของวัสดุสองมิติ จากนั้นย้ายวัสดุสองมิติไปไว้บนวัสดุรองรับอื่นที่พร้อมใช้งาน [51]

### 2.6.3 Chemical Vapor Deposition (CVD)

สำหรับวิธีการสังเคราะห์ด้วย CVD นั้น เป็นการสังเคราะห์ทางเคมีที่สามารถทำได้ในระดับห้องปฏิบัติการสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก โดยวิธีนี้จะอาศัยหลักการให้ความร้อนกับสารเคลือบที่อยู่ในสถานะของแข็งเป็นสารตั้งต้นแตกตัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและเคลือบลงบนวัสดุฐานรอง เริ่มต้นกระบวนการโดยการปล่อยก๊าซที่เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อก๊าซที่เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาเข้าไป สารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยา กันเกิดเป็นวัสดุสองมิติ โดยในการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ของวัสดุสองมิติแต่ละชนิดจะใช้สารตั้งต้น แก๊สและวัสดุฐานรองที่ต่างชนิดกัน ในปัจจุบันกราฟีนเป็นวัสดุสองมิติที่นิยมการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD เริ่มต้นกระบวนการ ด้วยการนำ มีเทน (Methane) เป็นสารที่มีสมบัติการระเหย ทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการซ้อนทับแล้วลงไปเคลือบบนผิวของวัสดุฐานรอง โดยวัสดุฐานรองที่นิยมใช้การการสังเคราะห์กราฟีนเป็นวัสดุประเภทเซรามิกซ์หรือโลหะ ได้แก่ คอปเปอร์ (Copper) และ นิกเกิล (Nickel) และปล่อยสารที่มีความสามารถในการแตกตัวได้ในความร้อนเข้าไปในท่อ จากนั้นอะตอมของคาร์บอนจะเกิดการเคลือบบนผิวของวัสดุฐานรองเกิดขึ้นเป็นกราฟีน [52] แสดงดังรูป 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



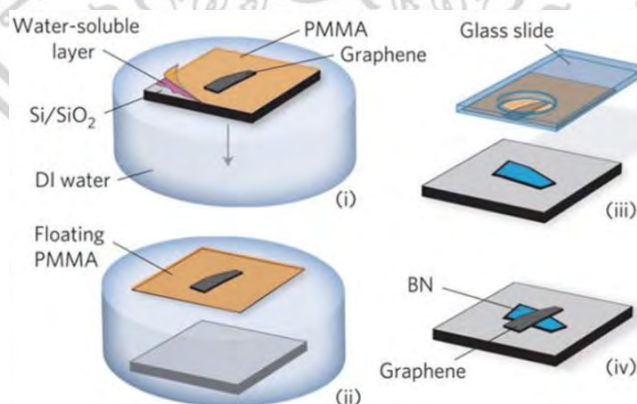
รูปที่ 2.24 แผนภาพการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD)

## 2.7 วิธีการถ่ายโอนวัสดุสองมิติ (Transfer methods)

วิธีการถ่ายโอนวัสดุสองมิติโดยทั่วไปจะเป็นการถ่ายโอนโดยใช้น้ำหรือของเหลวเป็นตัวพา เรียกว่า การถ่ายโอนแบบเปียก (Wet transfer) และการถ่ายโอนแบบแห้ง (Dry transfer) ที่ใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติยึดเกาะเป็นตัวพาในการถ่ายโอน

### 2.7.1 การถ่ายโอนแบบเปียก (Wet transfer)

วิธีการถ่ายโอนแบบเปียกใช้น้ำสำหรับการถ่ายโอนโครงสร้างวัสดุสองมิติ บนพื้นผิวที่มีรูปร่างและองค์ประกอบต่างๆ การถ่ายโอนเกิดขึ้นผ่านการแทรกซึมของชั้นน้ำระหว่างวัสดุฐานรองที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ โครงสร้างวัสดุสองมิติ เช่น กราฟีน  $\text{MoS}_2$  ฯลฯ ถูกล็อกไว้ภายในฟิล์มบางโพลีเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ฟิล์มการกักโครงสร้างวัสดุสองมิติ ถูกยกขึ้นและลอยที่ส่วนต่อประสานระหว่างอากาศกับน้ำ โครงสร้างวัสดุสองมิติ สามารถถ่ายโอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการได้ในภายหลังโดยการกำจัด น้ำและการละลายของฟิล์มโพลีเมอร์ [53] แสดงดังรูป 2.25

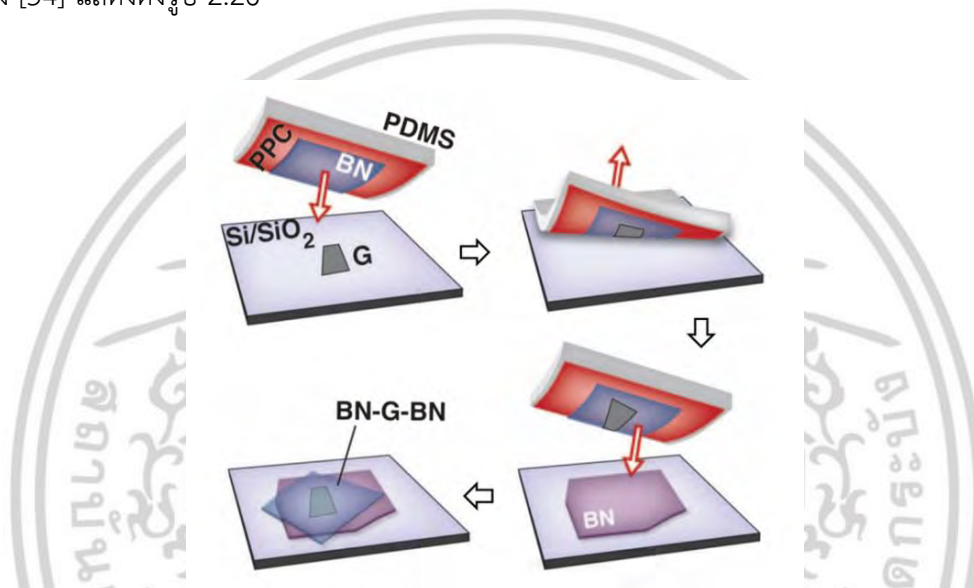


รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงการถ่ายโอนของวัสดุสองมิติ ด้วยวิธีการถ่ายโอนแบบเปียก [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 การถ่ายโอนแบบแห้ง (Dry transfer)

วิธีถ่ายโอนแบบแห้งเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้กันโดยทั่วไปจะใช้แอสแตมพ์ที่ห่อหุ้มด้วยชั้นของโพลีโพรพิลีนคาร์บอนेट เพื่อตั้ง วัสดุสองมิติ ลำดับแรก ตั้ง BN ถัดไปนำ BN สัมผัสกับผลึกเป้าหมาย (กราฟีน) เนื่องจากทั้งผลึก BN และผลึกเป้าหมายแรงยึดเกาะผลึกเป้าหมายอาจมีขนาดใหญ่มาก โดยค่อยๆยกแอสแตมพ์ขึ้นมาผลึกสามารถหยิบขึ้นมาจากวัสดุฐานรอง จากนั้นนำผลึกที่ซ้อนกันอยู่บนแอสแตมพ์เข้ามาสัมผัสกับ BN ที่อยู่ด้านล่างซึ่งสามารถถ่ายโอนได้โดยการสัมผัสเบาๆระหว่างผลึกที่ซ้อนทับกันกับ BN ที่อยู่ด้านล่าง [54] แสดงดังรูป 2.26

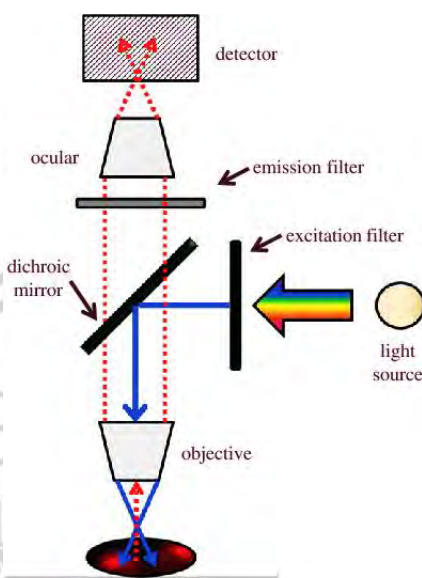


รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงการถ่ายโอนของวัสดุสองมิติ ด้วยวิธีการถ่ายโอนแบบแห้ง [54]

## 2.8 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ และมีการส่องไปที่วัตถุ ก่อนที่แสงจะส่องผ่านเข้าสู่สายตาเรา ซึ่งแสงที่อยู่ภายในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราจะทำให้เราเห็นภาพได้ โดยการมองผ่านเลนส์กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีความสามารถในการดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบสองมิติ โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์แสดงดังรูปที่ 2.27 กล้องจุลทรรศน์อย่างง่ายนั้นประกอบไปด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective) เลนส์ใกล้ตา (The eyepiece) และไฟส่องสว่าง (Illuminator part) เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) จะติดอยู่กับจานหมุน (Revolving nose piece) ซึ่งจานหมุนนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ตามปกติเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยาย 3-4 ระดับ คือ 5x 10x 40x 100x ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ เลนส์ใกล้ตา (Eye piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปมี

กำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ [55]

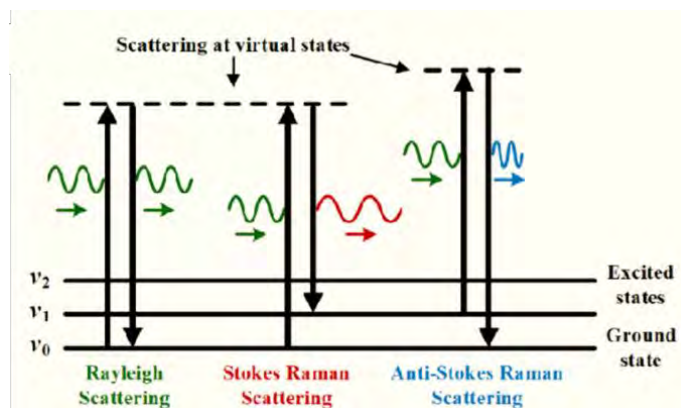


รูปที่ 2.27 แผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [55]

## 2.9 หลักการทำงานของรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลและวิเคราะห์การกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันของสาร เทคนิครามาน เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการกระเจิงของอนุภาคแสงที่เกิดการชนกับโมเลกุลของสาร โดยที่อนุภาคแสงที่เกิดการกระเจิงจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคหลังการชน อนุภาคแสงที่วัดกลับในรูปของการกระเจิงจะมีรูปแบบต่างกัน การชนแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคแสงและโมเลกุลแบบให้พลังงานน้อยกว่าเรียกว่า Stokes scattering และการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคแสงกับโมเลกุลของสารแบบให้พลังงานมากกว่าเรียกว่า Anti-stroke scattering และ พลังงาน ของอนุภาคแสงหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลง เป็นการชนแบบยืดหยุ่น ที่เรียกว่า rayleigh scattering แสดงดังรูป 2.28 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่เหมาะสม ในการศึกษาวัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สได้ ซึ่งการฉายแสงที่เป็นโฟตอนลงไปยังวัสดุ และไม่ทำลายตัวอย่าง อีกทั้งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องเตรียมสารตัวอย่าง ไม่ต้องวัด ค่าสเปกตรัมอ้างอิง และสามารถวัดสารตัวอย่างที่ไม่สามารถวัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy) ได้อีกด้วย [56]

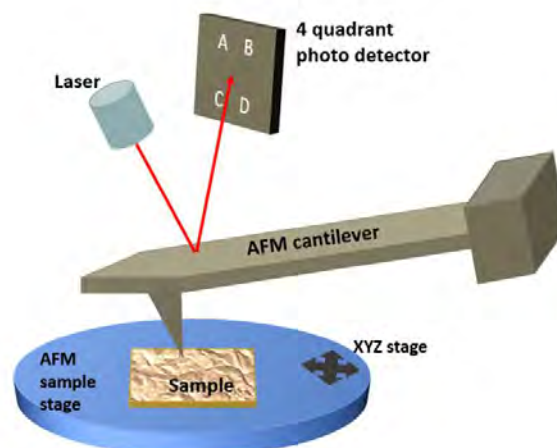
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงหลักการทำงานของ Raman spectroscopy

## 2.10 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope)

Atomic Force Microscope (AFM) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับตรวจสอบสภาพพื้นผิวของวัสดุทั้งความเรียบและความหนาของวัสดุ สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวโดยการใช้หัวอ่านซึ่งเป็นเข็มขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร วัดแรงผลักรวมและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัสดุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของชิ้นนั้นได้ โดยอุปกรณ์ประกอบด้วย เลเซอร์ โพรบ ชั่งงาน สแกนเนอร์และดีเทคเตอร์ แสดงดังรูป 2.29 ในกระบวนการทำงานเมื่อกดหัวอ่านตกลงบนพื้นผิวบริเวณที่จะตรวจวัด จะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโพรบกับผิวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนๆ ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับพื้นผิวชิ้นขณะสแกนชิ้นงาน หัวอ่านจะเอียงด้วยมุมต่างๆ กันตามความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปยังหัวอ่าน จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวและข้อมูลตัวเลขที่ต้องการตรวจสอบได้ โดย AFM มีความสามารถพิเศษคือสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายทั้งที่เป็นฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้ และมีระดับความสูงต่ำไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และขนาดภาพสแกนไม่เกิน 100 ไมโครเมตร [57]



รูปที่ 2.29 แสดงกระบวนการการทำงานของ AFM

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่องานวิจัย : Reliable Exfoliation of Large-Area High-Quality Flakes of Graphene and Other Two-Dimensional Materials

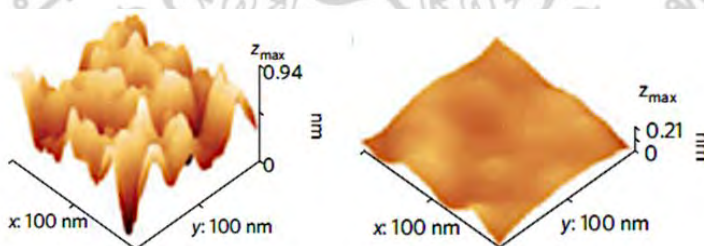
นักวิจัยศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนงานวิจัยนี้มีการปรับเปลี่ยนเทคนิคในการสังเคราะห์กราฟีน เนื่องจากวิธีการสังเคราะห์กราฟีนที่ใช้กันโดยทั่วไป (standard method) นั้นสามารถสังเคราะห์กราฟีนค่อนข้างเล็กงานวิจัยนี้จึงปรับเปลี่ยนวิธีการสังเคราะห์กราฟีน (modified method) เป็นวิธีที่สามารถผลิตกราฟีนให้มีขนาดใหญ่ถึง 100 ไมครอน นักวิจัยรายงานวิธีและขั้นตอนกระบวนการสองขั้นตอนที่ปรับเปลี่ยน ก่อนการขัดผิว ตัวดูดซับโดยรอบจะถูกลบออกจากพื้นผิวอย่างมีประสิทธิภาพด้วยการทำความสะอาดด้วยออกซิเจนพลาสมา และให้ความร้อนเพิ่มเติมจะเพิ่มพื้นที่สัมผัสที่สม่ำเสมอที่สุด ระหว่างผลึกกราฟีนกับสารตั้งต้น อุปกรณ์กราฟีนที่ถูกประดิษฐ์และวัดด้วย back-gating และ top-gating ของสารละลาย โดยให้ความสามารถในการเคลื่อนที่  $\sim 4000$  และ  $12\,000\text{ cm}^2/(\text{V s})$  ตามลำดับ และด้วยเหตุนี้จึงแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม การทดลองกับผลึกชั้นอื่นๆ เช่น ตัวนำยิ่งยวดบิสมาทสตรอนเทียม แคลเซียม คอปเปอร์ ออกไซด์ (BSCCO) แสดงให้เห็นการปรับปรุงในด้านผลการผลิตเซลล์ผิวและพื้นที่เคลือบที่คล้ายกับของกราฟีน แสดงให้เห็นว่าวิธีการผลิตเซลล์ผิวที่ได้รับการดัดแปลงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มี ผลึกที่มีคุณภาพของวัสดุ 2D ที่หลากหลาย

ชื่องานวิจัย : The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรโรของ van der Waals แบบรวดเร็วซึ่งวิธีนี้แสดงให้เห็นโดยการควบคุมการการก่อสร้างโครงสร้างเฮเทอโรโรของสแต็กกราฟีนแบบโมนอไบและไตรเลเยอร์ที่ห่อหุ้มด้วยเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ให้ผลผลิตโครงสร้างเฮเทอโรโรเกือบ 100% สำหรับอุปกรณ์โมนอเลเยอร์เราพบเส้นทางที่ไม่มีค่าเฉลี่ยกึ่งกลางถึง 0.9 มม. โดยตัวอย่างที่แคบที่สุดแสดงข้อบ่งชี้ที่ชัดเจนของการขนส่งที่ได้รับผลกระทบจากการกระจายขอบเขต วิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปสู่การประดิษฐ์โครงสร้างต่าง ๆ ของแวนเดอร์วาลส์ได้อย่างง่ายดายทั้งในบรรยากาศโดยรอบและบรรยากาศที่มีการควบคุม

ชื่องานวิจัย : Scanning tunnelling microscopy and spectroscopy of ultra-flat graphene on hexagonal boron nitride

งานวิจัยฉบับนี้รายงานว่าคุณสมบัติความเรียบของพื้นผิวส่งผลต่อกราฟีน จากรูป 2.30 กราฟีนที่อยู่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์กับกราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์แตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยที่กราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เรียกว่ากราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ ค่าการกระจายตัวของพลังงานจุด Dirac สามารถคำนวณค่าความผันผวนของอิเล็กตรอน เนื่องจากการกระจายตัวของพลังงานของกราฟีนบนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์กระจายตัวมากกว่าค่าการกระจายตัวของพลังงาน จุด Dirac ของเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์และพบว่าที่จุด Dirac ค่าความผันผวนของอิเล็กตรอนของกราฟีนบนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ มีค่ามากกว่าค่าความผันผวนของอิเล็กตรอนของกราฟีนที่อยู่บนเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์



รูปที่ 2.30 แสดงภาพจาก STM ของค่าความเรียบพื้นผิวกราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ (ซ้าย) และกราฟีนที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (ขวา)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การสังเคราะห์วัสดุสองมิติ

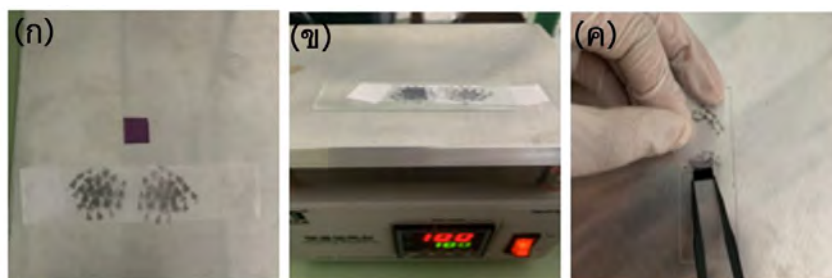
##### 3.1.1 การเตรียมพื้นผิววัสดุฐานรอง

ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุฐานรอง Si/SiO<sub>2</sub> (Si/300 nm SiO<sub>2</sub> wafers) ในการสังเคราะห์วัสดุสองมิติ พื้นผิววัสดุฐานรอง มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการสังเคราะห์กราฟีนและวัสดุสองมิติชนิดอื่น การทำความสะอาดพื้นผิววัสดุฐานรอง พื้นผิวที่สกปรกจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการสังเคราะห์กราฟีน ขั้นตอนแรกตัดวัสดุฐานรอง ขนาด 1 × 1 cm ตัดโดยใช้ปากกาหัวเพชร ทำความสะอาดพื้นผิววัสดุฐานรองด้วยสารละลายในสารละลายอะซิโตน acetone) เมทานอล (methanol) ล้างอย่างละ 2 นาที ตามลำดับ อะซิโตนเป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติในการชำระล้างฝุ่นไขมันต่างๆโดยไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิว และเป่าให้แห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจนเพื่อกำจัดคาบของน้ำที่ติดบนพื้นผิว

##### 3.1.2 การสังเคราะห์กราฟีน

โดยงานวิจัยนี้สังเคราะห์กราฟีนจาก kish graphite ซึ่งกราฟีนที่เตรียมได้จากกราฟไฟท์ชนิดนี้จะมีความบริสุทธิ์สูง วิธีแรกที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟีนจะเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปคือ standard exfoliation เริ่มจากการตัดเทปขนาด ~15 เซนติเมตร (3M scotch Premium) ติดผลึกกราฟไฟท์ (kish graphite) กับเทปกาวด้านเดียว พับเทปติดกับผลึกกราฟไฟท์เพื่อประกบระหว่างด้านที่เหนียวของเทปกดลงแล้วลอกเทปออกจากกันอย่างช้าๆเพื่อให้กราฟไฟท์เกาะติดกันเป็นสองส่วน ทำซ้ำจนกระทั่งกราฟไฟท์มีกระจายไปทั่วเทป จะสังเกตเห็นว่าสีของกราฟไฟท์นั้นบางลง จากนั้นนำวัสดุฐานรองที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วจากขั้นตอน 3.1.1 ไปให้ความร้อนบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 1 นาที นำสก็อตเทปที่ลอกไว้มาทาบบนวัสดุฐานรองที่ผ่านการให้ความร้อนและจะทาบบนวัสดุฐานรองประมาณ 1 นาที จากนั้นลอกเทปออก และนำวัสดุฐานรองตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ในการหากราฟีน เมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสังเคราะห์กราฟีนด้วยเทคนิคการลอกได้มีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนของวิธี standard exfoliation เป็นวิธี modified exfoliation ซึ่งสามารถผลิตกราฟีนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีนี้สังเคราะห์กราฟีนจาก kish graphite เช่นกัน ขั้นตอนแรกนำกราฟไฟท์ทาบบนเทป (3M scotch Premium) แล้วลอกออก จะลอกกราฟไฟท์จากสก็อตเทปประมาณ 6-7 ครั้ง จากนั้นนำวัสดุฐานรองจากขั้นตอน 3.1.1 ที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาวางบนกระจกสไลด์นำสก็อตเทปที่ลอกกราฟไฟท์ มาทาบบนวัสดุฐานรองที่วางอยู่บนกระจกสไลด์และให้ความร้อนบน hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะใช้เวลา 1 นาที จากนั้นนำวัสดุฐานรองที่ทาบบน สก็อตเทปที่วางบน

กระจกสไลด์มาให้ความเย็นโดยวางบนโลหะประมาณ 10-30 วินาที เพื่อช่วยคายความร้อนออกจากวัสดุฐานรองและช่วยลดปริมาณการแตกหักจากเทปที่จะติดมากับวัสดุฐานรอง จากนั้นลอกเทปออก และนำวัสดุฐานรองตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์เพื่อหาคาแฟฟีน รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนวิธี Modified exfoliation



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนวิธี modified exfoliation (ก) ลอกกราฟีนจากกราฟไฟท์ด้วยเทป (ข) ทาบเทปลงบนวัสดุฐานรองวางบนกระจกสไลด์และนำไปให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส 1 นาที (ค) ลอกเทปออกจากวัสดุฐานรอง

### 3.1.3 การสังเคราะห์เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

การสังเคราะห์เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ใช้กระบวนการเดียวกันกับการแยกกราฟีนออกจากผลึกกราฟไฟท์โดยใช้วิธี standard exfoliation ตัดเทปให้มีขนาด  $\sim 15$  เซนติเมตร ติดผลึกเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับเทปกาว พับเทปติดกับผลึกเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เพื่อประกบระหว่างด้านที่เหนียวของเทป กดลงแล้วลอกเทปออกจากกัน ทำซ้ำจนกระทั่งผลึกเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กระจายไปทั่วเทป นำวัสดุฐานรองที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วให้ความร้อนบน hot plate 100 องศาเซลเซียส 5 นาที นำออกจาก hot plate จากนั้นนำเทปที่ลอก hBN ทาบลงบนวัสดุฐานรองประมาณ 1-2 นาที ลอกเทปออก และนำวัสดุฐานรองตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์เพื่อหา hBN

### 3.1.4 การสังเคราะห์ฟอสฟอรัสดำ

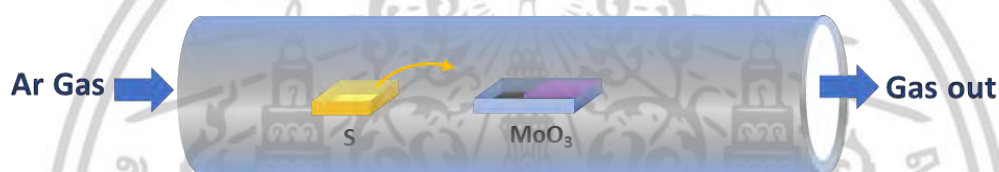
การสังเคราะห์ฟอสฟอรัสดำใช้วิธีการลอกเช่นเดียวกับการสังเคราะห์กราฟีนจากวิธีการแยกกราฟีนออกจากผลึกกราฟไฟท์ ตัดเทปขนาด  $\sim 15$  เซนติเมตร เนื่องจากผลึกของฟอสฟอรัสดำจะเป็นของแข็งขนาดใหญ่จึงหักผลึกให้มีขนาดเล็กลงจากนั้นติดผลึกฟอสฟอรัสดำกับเทปกาว พับเทปติดกับผลึกฟอสฟอรัสดำเพื่อประกบระหว่างด้านที่เหนียวของเทป กดลงแล้วลอกเทปออกจากกัน ทำซ้ำจนกระทั่งผลึกฟอสฟอรัสดำกระจายไปทั่วเทป นำวัสดุฐานรองที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วให้ความร้อนบน hot plate 100 องศาเซลเซียส 1 นาที จากนั้นนำเทปที่ลอกฟอสฟอรัสดำ ทาบลงบนวัสดุฐานรองและลอกเทปออก และนำวัสดุฐานรองตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์เพื่อหาฟอสฟอรัสดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากฟอสฟอรัสดำเป็นวัสดุสองมิติ ที่ไม่เสถียรทางอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่นจึงต้องสังเคราะห์ BP ภายใน glovebox ที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นต่ำ

### 3.1.5 การสังเคราะห์โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์

การสังเคราะห์โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์งานวิจัยนี้สังเคราะห์โดยเทคนิค CVD วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถผลิตฟิล์มบางมีขนาดใหญ่ ในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  จะใช้สารตั้งต้น 2 ชนิด คือ  $\text{MoO}_3$  ปริมาณ 3 mg กำมะถัน (Sulfur) ปริมาณ 300 mg ใส่ภาชนะแยกกัน วางวัสดุฐานรองใกล้แหล่งกำเนิด Mo แสดงดังรูป 3.2 เมื่อสารตั้งต้นถูกทำให้ระเหยที่อุณหภูมิ 760 °C และ 180 °C เป็นเวลา 1 นาที ตามลำดับภายใต้การไหลของแก๊สอาร์กอน หลังจากสารตั้งต้นระเหยและทำปฏิกิริยาระหว่างสารทั้ง 2 ชนิด จะเกิดขึ้น  $\text{MoS}_2$  บนพื้นผิววัสดุฐานรอง

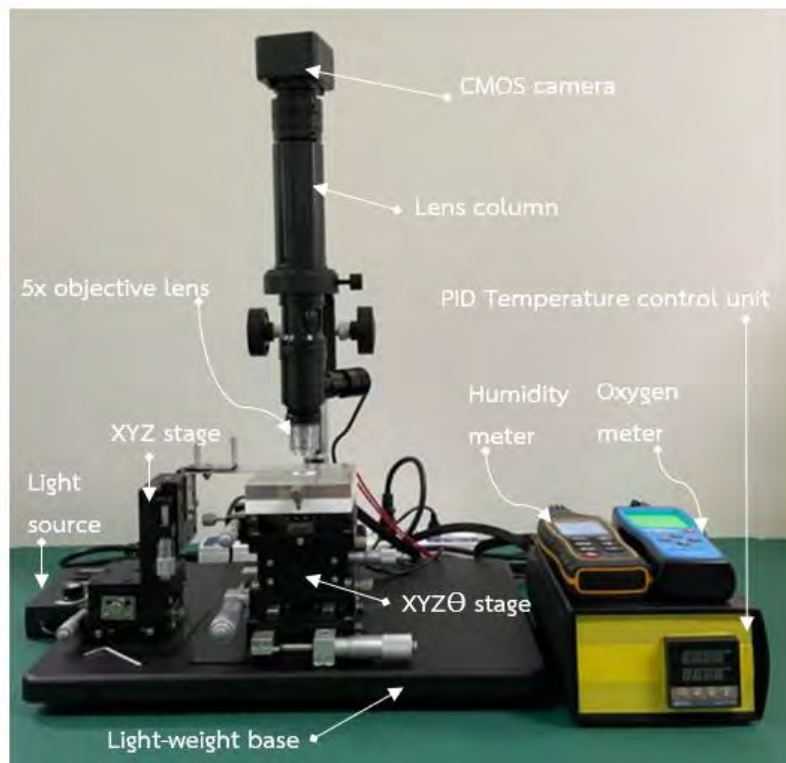


รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งภายในของ CVD สำหรับการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$

## 3.2 การเตรียมชุดเครื่องมือสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ

การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุ 2 มิตินั้นจะต้องอาศัยชุดเครื่องมือใช้ในการย้ายและจัดวางซ้อนทับกันของวัสดุสองมิติ (transfer system) ที่มีราคาสูงและเข้าถึงได้ยาก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ เป็นระบบที่ใช้ต้นทุนต่ำ มีลักษณะเป็น all-in-one ขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาได้ง่าย และสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติที่มีประสิทธิภาพ และสำหรับวัสดุสองมิติ บางชนิดที่ไม่เสถียรทางอากาศเกิดการออกซิเดชันในงานในสภาวะแวดล้อมปกติ งานวิจัยนี้จึงแก้ไขข้อบกพร่องข้างต้น ด้วยการสร้างชุดอุปกรณ์ที่สามารถทำได้ด้วยตนเอง สำหรับสร้างโครงสร้างของวัสดุสองมิติ ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นหรือที่เรียกว่า glovebox ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์และถ่ายโอนวัสดุสองมิติ ที่มีความละเอียดอ่อนเป็นอย่างมาก

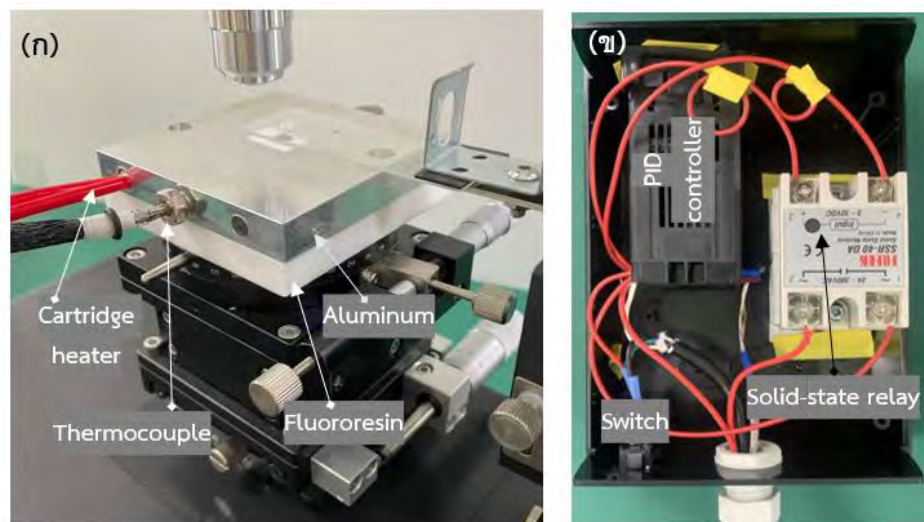
การเตรียมชุดเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์หลักๆ ประกอบด้วย ตัวควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิววัสดุฐานรอง Micromanipulator และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงชุดเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างเฮเทอของวัสดุสองมิติ

### 3.2.1 ตัวควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิววัสดุฐานรอง

ตัวควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิววัสดุฐานรอง หรือ ฐาน XYZ $\theta$  สำหรับการจัดตำแหน่งของวัสดุฐานรองสามารถปรับความสูงและช่วยในการปรับความคมชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบสเกลละเอียด แทนการปรับจากกล้องจุลทรรศน์ที่เป็นสเกลหยาบ ฐานที่ใช้รองวัสดุฐานรองอะลูมิเนียมที่ทนความร้อนสูง จะเจาะรูแผ่นอะลูมิเนียมสำหรับใส่ ตัวทำความร้อน (heater), เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ (thermocouple) และ ที่ดูดสูญญากาศ (vacuum fixation) สำหรับตรึงวัสดุฐานรอง ด้านล่างแผ่นอะลูมิเนียมจะเป็น พีทีเอฟอี/เทฟลอน (PTFE) ขนาด 80 x 80 mm มีความหนา 12 mm ซึ่งวางระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมกับฐาน XYZ $\theta$  เนื่องจาก PTFE เป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อกันความร้อนจากอะลูมิเนียมสู่ฐาน XYZ $\theta$  แสดงดังรูป 3.4 (ก) ซึ่งตัวควบคุมอุณหภูมิการให้ความร้อนภายในประกอบด้วย PID controller, Solid-state relay และ Switch แสดงดังรูป 3.4 (ข) การให้ความร้อนแก่พื้นผิววัสดุฐานรองสามารถช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุสองมิติ กับพื้นผิววัสดุฐานรอง ได้จึงทำให้เราสามารถแยกวัสดุสองมิติจากพื้นผิวได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

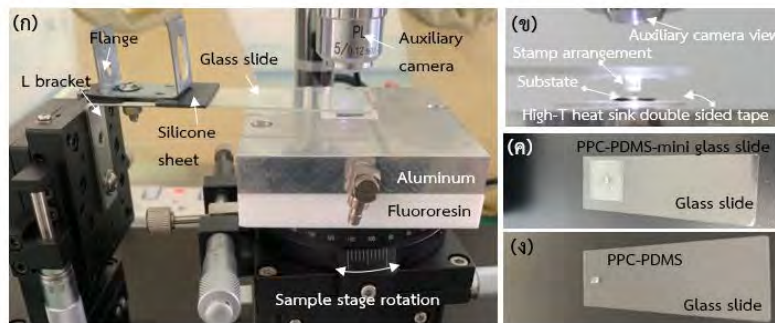


รูปที่ 3.4 แสดงชุดเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างเซทเทอของวัสดุสองมิติ (ก) แสดงเครื่องมือของตัวควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิววัสดุฐานรอง ที่สร้างจากอะลูมิเนียม (สำหรับวางวัสดุฐานรอง) (ข) ส่วนประกอบของภายในตัวควบคุมอุณหภูมิพื้นผิว

### 3.2.2 Micromanipulator

Micromanipulator หรือ ฐาน xyz สำหรับการจัดเรียงตำแหน่งของวัสดุสองมิติ ใช้วาง แสตมป์ของกระจกสไลด์ เนื่องจากแสตมป์จะต้องอยู่ในแนวระนาบสำหรับดึงและถ่ายโอนวัสดุสองมิติ จึงเพิ่มขายึดตัวแอลเนกประสงค์ยึดติดกับฐาน xyz ด้วยสกรูและการวางกระจกสไลด์บนขายึดตัวแอลเนก ประสงค์ที่เป็นโลหะเราจะวางแผ่นซิลิโคน (silicone sheet) เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกของกระจกสไลด์ แสดงดังรูป 3.5 (ก) ซึ่งการจัดเรียงตำแหน่งของวัสดุสองมิตินั้นจะต้องมีความแม่นยำในระดับไมโคร-สเกล Micromanipulator จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง รูป 3.5 (ข) ภาพด้านข้างของแสดงระยะห่างระหว่าง แสตมป์กับวัสดุฐานรอง รูป 3.5 (ค) และ (ง) แสดงภาพของแสตมป์ PPC สำหรับการสร้างโครงสร้างเซทเทอโรด้านนอกและด้านใน glovebox ตามลำดับ

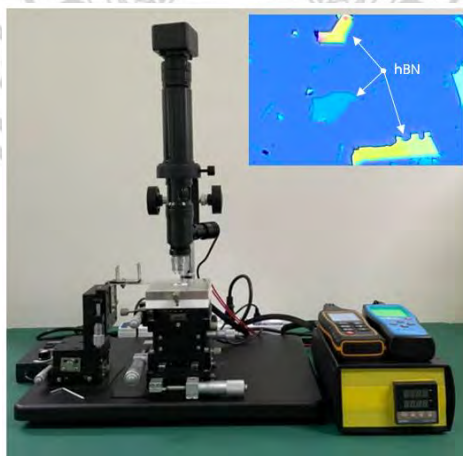
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงชุดเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างเฮเทอของวัสดุสองมิติ (ก) แสดงเครื่องมือ Micromanipulator (ข) แสดงภาพด้านข้างของแสดงระยะห่างระหว่างแสดมภ์กับวัสดุฐานรอง (ค) แสดงภาพของแสดมภ์ PPC สำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้านนอก (ง) แสดงภาพของแสดมภ์ PPC สำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้านใน glovebox

### 3.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงซึ่งใช้สำหรับดำเนินการในการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรภายใต้กล้องและใช้สำหรับตรวจสอบตำแหน่งของวัสดุสองมิติ ประกอบด้วยชุดเลนส์ซูมเดี่ยวที่มีเลนส์ใกล้วัตถุหลัก มีกำลังขยาย 0.63–3.5 เท่า ไฟส่องสว่าง เลนส์ C-mount สำหรับเชื่อมต่อกล้อง และฐานติดตั้งที่มีน้ำหนักเบา และเพิ่มเลนส์ใกล้วัตถุเสริมที่มีกำลังขยาย 5 เท่า ซึ่งซื้อเพิ่มเติมเพื่อช่วยเพิ่มกำลังขยายให้กับเลนส์หลักโดยจะติดตั้งกับเลนส์หลัก เนื่องจากวัสดุสองมิตินั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เราจึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ตลอดการทดลอง กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้สำหรับการทดลองนี้แสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์จะมีคุณภาพความคมชัดไม่สูงมากนัก แสดงดังรูป 3.6 แต่ไม่มีผลกระทบต่อ การทดลอง อีกทั้งยังสามารถทำการทดลองได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องมือสำหรับถ่ายโอนวัสดุสองมิติให้เป็นโครงสร้างเฮเทอโร กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและภาพถ่ายของผลึก hBN ที่แสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

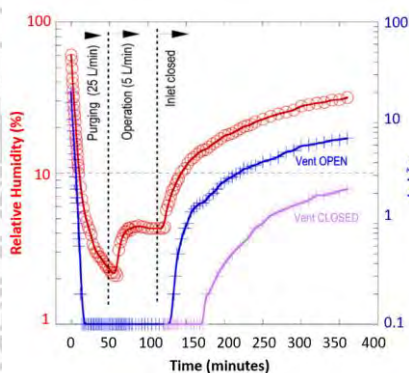
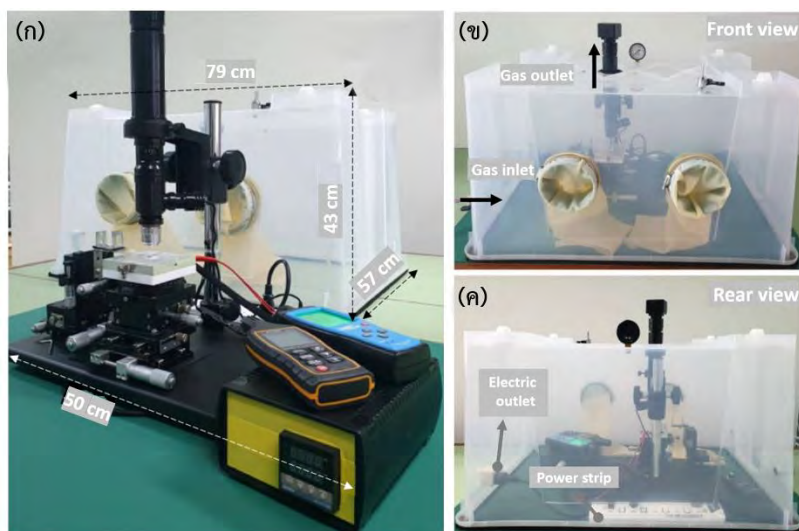
### 3.3 การเตรียมชุดอุปกรณ์ DIY สำหรับสร้างโครงสร้างของวัสดุสองมิติ ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

วัสดุสองมิติบางชนิดมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกได้อย่างรวดเร็ว เช่น ฟอสฟอรัสดำ ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนและความชื้นทำให้เกิดความเสียหายต่อผลึก ฟอสฟอรัส งานวิจัยนี้จึงออกแบบขั้นตอนการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรโรให้อยู่ภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น โดยใช้ glovebox ที่มีลักษณะเรียบง่ายและสามารถทำได้ด้วยตนเอง (DIY) โดยหลักการของ glovebox คือแปลงอากาศภายในให้กลายเป็นบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียม Glovebox สำหรับสร้างโครงสร้างของวัสดุสองมิติ

เตรียมกล่องเอกประสงค์ ที่มีขนาด 79x57x43 cm (กว้างxยาวxสูง) แสดงดังรูป 3.7 (ก) นำมาดัดแปลงให้ เหมาะกับการใช้งานสำหรับงานวิจัยนี้ ขั้นแรก เจาะรูกล่องสำหรับใส่ถุงมือเพื่อการดำเนินการภายใน เจาะรูให้มีขนาดเหมาะสมกับผู้ใช้ปฏิบัติงาน และรูสำหรับแก๊สเข้า (gas inlet) และแก๊สออก (gas outlet) รูสำหรับแก๊สออกจะอยู่ด้านบนซึ่งใช้ร่วมกับเลนส์ไมโครสโคปผ่านกล่องทะลุไปได้ใช้ โฟม (ethylene propylene diene rubber) ปิดช่องว่างตามเส้นรอบวงของรู โดยเหลือเพียงช่องว่างเล็กๆ ระหว่างโฟมและเลนส์สำหรับการปรับความชัดของกล้องขณะเลื่อนขึ้น-ลง แสดงดังรูป 3.7 (ข) ใช้ โฟม EPDM ตัดบริเวณที่อากาศภายนอกแทรกซึมเข้าไปภายในกล่องขณะที่อยู่กำลังดำเนินการ เส้นรอบวงของรู โดยเหลือเพียงช่องว่างเล็กๆ ระหว่างโฟมและเลนส์สำหรับการปรับความชัดของกล้องขณะเลื่อน ภายในกล่องจะมีปลั๊กต่อสำหรับให้ความร้อนที่ต่อกับเต้าสำหรับเสียบปลั๊กไฟฟ้า (electric outlet) ที่ต่อมาด้านนอกอีกที

สำหรับการแปลงอากาศภายใน glovebox ให้มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นต่ำจะใช้ แก๊สไนโตรเจนที่เป็นแก๊สเฉื่อย ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สภายใน glovebox ขณะเริ่มต้นจะใช้ที่ปริมาณ 25 L/min จนกระทั่งค่าความชื้นต่ำลงน้อยกว่า 3 % จึงปรับอัตราการไหลของแก๊สเหลือ 5 L/min ค่าความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีประมาณ 4-5 % เริ่มทำการทดลองภายใน glovebox แสดงดังกราฟ 3.7 (ง)



รูปที่ 3.7 (ก) แสดงภาพขนาดของกล่อง DIY ของระบบถ่ายไอออนวัสดุสองมิติ (ข) ภาพด้านหน้าและ (ค) มุมมองด้านหลังระบบถ่ายไอออนวัสดุสองมิติของกล่อง DIY (ง) กราฟแสดงอัตราการลดลงของความชื้นและออกซิเจน

### 3.4 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายไอออนแบบแห้ง (Dry method)

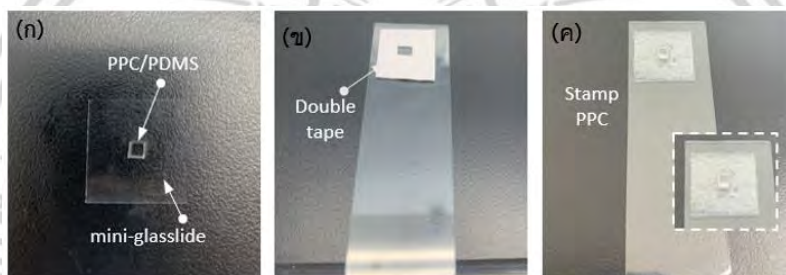
#### 3.4.1 การเตรียมชั้นพอลิเมอร์ (แอสมพ์ PPC)

การเตรียมแอสมพ์สำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของเทคนิคการถ่ายไอออนแบบแห้ง ประกอบด้วย PDMS, PPC, กระจกสไลด์อันเล็ก (mini glassslide) และ กระจกสไลด์ (glassslide) ในส่วนของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane (PDMS)) เตรียมจากสารสองชนิดคือ Pre-polymer (SYLGARD® 184) และ curing agent ในอัตราส่วน 10:1 ซึ่งในการทดลองนี้เราใช้ 3 g ของ Pre-polymer (SYLGARD® 184) ผสมกับ curing agent 0.3 g ทำการคนสารที่ได้ให้เข้ากันและเทใส่จานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm เพื่อที่จะได้ชั้น PDMS ที่มีความหนาประมาณ 1.5 mm นำ PDMS ไปปิ้งอากาศที่อยู่ในชั้น PDMS ออกเพื่อ กำจัดฟองอากาศ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จน PDMS แห้ง โดย PDMS นั้นจะต้องมีความใส ไม่มีฟองอากาศจากนั้น ทำการตัดให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  สำหรับทำแอสมบลี PPC ในส่วนของการเตรียมสารละลายโพรพิลีนคาร์บอเนต (polypropylene carbonate (PPC)) ใช้ PPC ในตัวทำละลาย Anisole ซึ่งเมื่อคำนวณความเข้มข้นแล้วจะได้เท่ากับ PPC 15 % ใน Anisole ผสมเข้าด้วยกันทิ้งไว้ 1 คืนจนกลายเป็นสารละลาย

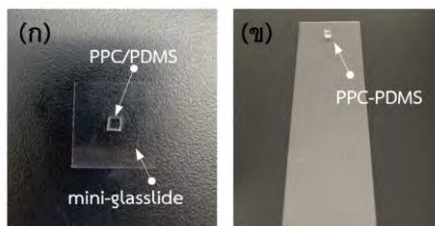
ขั้นตอนการประกอบแอสมบลี PPC นำ PDMS ขนาด  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  วางบน mini glassslide ทำการปลูกฟิล์ม PPC ลงบน PDMS ที่เตรียมไว้ปลูกฟิล์มโดยใช้การเคลือบผิวด้วยการหมุนเหวี่ยง (spin coating) หยด PPC ลงบน PDMS และปั่นเคลือบด้วยความเร็ว 2000 rpm แสดงดังรูป 3.8 (ก) ติดกาวสองหน้า (double sided tape) บน glass slide เจาะรูตรงกลางให้มีขนาดใหญ่กว่า PDMS แสดงดังรูป 3.8 (ข) จากนั้นนำ PDMS ที่เคลือบ PPC ติดบน glass slide พร้อมกับ mini glassslide จากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อทำให้ชั้น PPC แห้ง ด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 10 นาที แสดงดังรูป 3.8 (ค)



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการสร้างชั้นแอสมบลี PPC (ก) เคลือบ PPC ลงบน PDMS (ข) ติดกาวสองหน้า (double tape) ลงบนกระจกสไลด์ (ค) ชั้นแอสมบลี PPC

สำหรับโครงสร้างเอเทอโรที่สร้างภายใน glovebox ที่ควบคุมความชื้นและปริมาณออกซิเจนจะใช้แอสมบลี PPC ที่ต่างกัน จะไม่วาง PPC/PDMS บน double sided tape และ mini-glassslide เนื่องจากขณะดำเนินการไม่สามารถนำแอสมบลี ออกมาภายนอกได้ การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ความละเอียดต่ำจึงทำได้ยากสำหรับวัสดุสองมิติ ที่บางและมีขนาดเพียงไม่กี่ไมครอนจึงต้องลดชั้นความหนาแอสมบลีที่มี double sided tape และ mini-glassslide เพื่อการมองเห็นของกล้องจุลทรรศน์ความละเอียดต่ำ

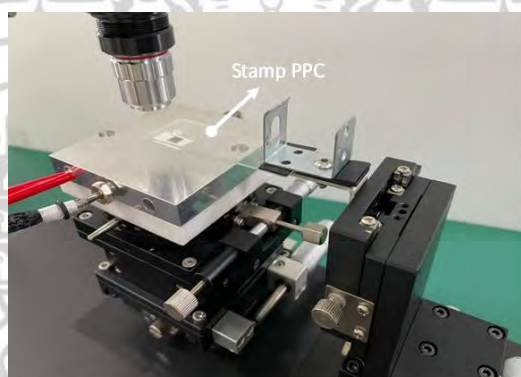
นำ PDMS ขนาด  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  วางบน mini-glassslide ทำการปลูกฟิล์ม PPC ลงบน PDMS ที่เตรียมไว้ปลูกฟิล์มโดยใช้การ Spin coating หยด PPC ลงบน PDMS และปั่นเคลือบด้วยความเร็ว 2000 rpm แสดงดังรูป 3.9 (ก) จากนั้นแยก PPC/PDMS ออกจาก mini-glassslide และนำไปวางบน glassslide ทันทีหลังจากปั่นเคลือบ PPC บน PDMS แสดงดังรูป 3.9 (ข)



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการสร้างชั้นแสดมภ์ PPC (ก) เคลือบ PPC ลงบน PDMS (ข) ชั้นแสดมภ์ PPC

### 3.4.2 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ

นำชั้นแสดมภ์ PPC ที่เตรียมไว้ ไปประกอบเข้ากับ Micromanipulator หรือ ฐาน xyz และจัดตำแหน่งชั้นแสดมภ์กับวัสดุฐานรองให้มีตำแหน่งที่ตรงกัน แสดงดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 ชั้นพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ประกอบให้เข้ากันกับ Micromanipulator

ลำดับแรกจะทำการดึงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นแรกที่อยู่บน Si/SiO<sub>2</sub> ซึ่ง ชั้นพอลิเมอร์จะต้องแนบติดกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นแรกโดยพื้นผิว มีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น 1 นาที จึงทำการดึงชั้นพอลิเมอร์ขึ้นอย่าง ช้า ๆ โดยที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ นั้นมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ จึงทำให้เราสามารถดึงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นแรกมาได้ แสดงดังรูป 3.11 (ก)

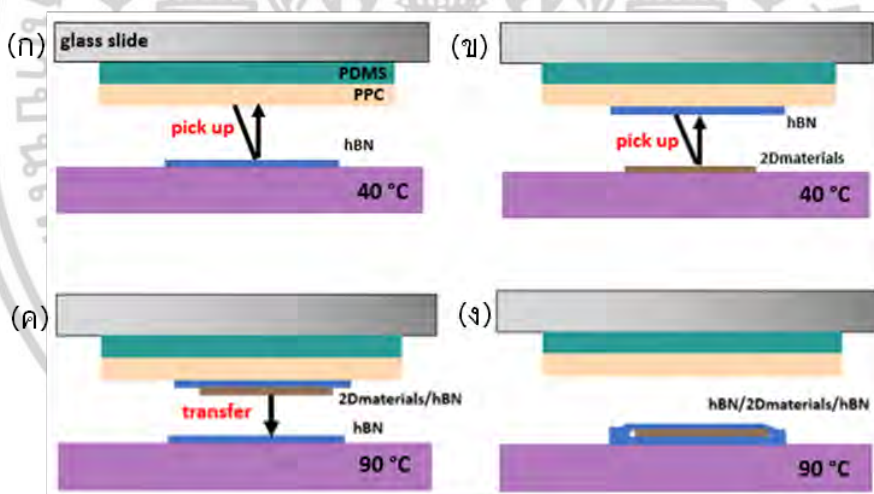
ทำการดึงวัสดุสองมิติ (กราฟีน, MoS<sub>2</sub> และ BP) ขึ้นโดยนำชั้นพอลิเมอร์ที่ดึงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นแรกได้สำเร็จแล้วในขั้นตอนที่สองนั้น ทำการดึงวัสดุสองมิติ ที่เราได้เตรียมไว้ซึ่งตำแหน่งของเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่ถูกดึงไว้แล้วนั้นจะต้องมีตำแหน่งที่ตรงกันกับตำแหน่งของวัสดุสองมิติ ดังนั้นเราจึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและ micromanipulator เพื่อควบคุมตำแหน่งของเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ให้ตรงกัน กับวัสดุสองมิติ หลังจากนั้นทำการควบคุมให้ชั้นพอลิเมอร์เคลื่อนที่ลงอย่างช้า ๆ โดยมีอุณหภูมิพื้นผิว 40 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นดึงชั้นพอลิเมอร์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างช้า ๆ ควบคุมโดย micromanipulator ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับวัสดุสองมิตินั้นมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุสองมิติ กับพื้นผิววัสดุฐานรอง จึงทำให้เราสามารถดึงวัสดุ สองมิติขึ้นมาได้ แสดงดังรูป 3.11 (ข)

ทำการถ่ายโอน วัสดุสองมิติ/hBN ลงบนเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นที่สอง โดยใช้ micromanipulator จัดเรียงตำแหน่งของ วัสดุสองมิติ/hBN ให้ตรงกันกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นที่สอง หลังจากนั้นทำการเลื่อนชั้นพอลิเมอร์ที่มี วัสดุสองมิติ/hBN ลงอย่างช้าๆ ให้แนบติดกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ชั้นที่สอง ที่มีอุณหภูมิพื้นผิว 90 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.11 (ค)

ทำการดึงชั้นพอลิเมอร์ขึ้นอย่างช้าๆ ที่ควบคุมโดย micromanipulator พบว่าชั้นของ วัสดุสองมิติ/hBN หลุดออกจากชั้นพอลิเมอร์ซึ่งบริเวณบนพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์จะเกิดเป็นชั้น hBN/วัสดุสองมิติ/hBN จากนั้น ต้องทำการล้างฟิล์ม PPC ออก ที่อาจติดมากับผลึก hBN ด้วยการแช่ใน anisole เป็นเวลา 30 นาที และ ตามด้วย acetone และ IPA ตามลำดับ จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แสดงดังรูป 3.11 (ง) สำหรับ BP เป็นวัสดุที่ไวต่ออากาศจะต้องดำเนินการภายใน glovebox โดยใช้ขั้นตอนเดียวกันกับวัสดุสองมิติ ชนิดอื่น



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการถ่ายโอนวัสดุสองมิติให้เป็นโครงสร้างแบบเฮเทอโร (hBN/graphene/hBN, hBN-MoS<sub>2</sub>-hBN และ hBN/BP/hBN) ด้วยเทคนิค การถ่ายโอนแบบแห้ง

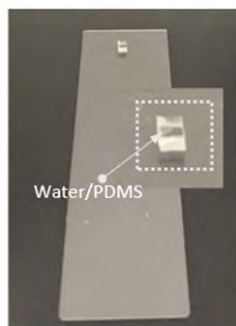
### 3.5 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (Wetting method)

#### 3.5.1 การเตรียมชั้นพอลิเมอร์ (แอสมปี PDMS)

การเตรียมแอสมปีสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของเทคนิคการถ่ายโอนแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปียกประกอบด้วย PDMS, น้ำ และ glassslide ซึ่ง PDMS นั้นจะเตรียมเช่นเดียวกับเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง ตัด PDMS ขนาด  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  วางบนปลาย glass slide จากนั้นหยดน้ำ 1 หยดลงบน PDMS หยดน้ำที่หยดจะมีปริมาณน้อยมาก แสดงดังรูป 3.12 เทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกนั้นจะต้องทำให้วัสดุฐานรองมีความชอบน้ำโดยนำวัสดุฐานรองไปทำความสะอาดด้วยเทคนิค  $\text{O}_2$  plasma ใช้เวลา 30 วินาที



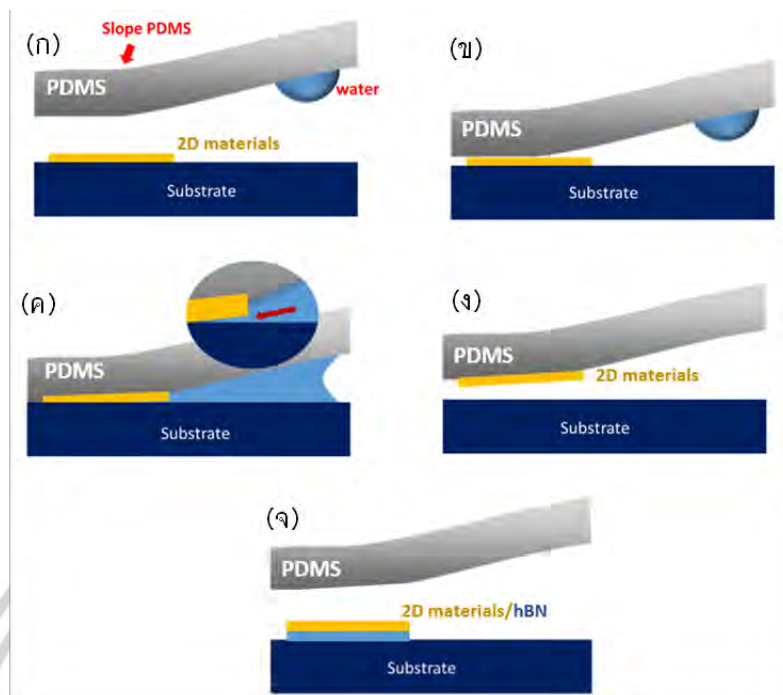
รูปที่ 3.12 แสดงขั้นแสดมภ์ PDMS ของเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก

### 3.5.2 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ

นำชั้นพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ ที่ประกอบไปด้วย หยดน้ำ และ PDMS ที่อยู่บน glassslide ไปประกอบให้เข้ากันกับ Micromanipulator

ลำดับแรกจะทำการดึงวัสดุสองมิติ (กราฟีน และ  $\text{MoS}_2$ ) วัสดุสองมิติที่อยู่บนวัสดุฐานรองน้ำจะทำหน้าที่ในการลดแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุสองมิติ กับ วัสดุฐานรอง ดังรูป 3.13 (ก-ง) การใช้น้ำในการลดแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุสองมิติ และ วัสดุฐานรอง จะต้องควบคุม PDMS ให้สัมผัสวัสดุสองมิติ ก่อนที่น้ำจะมาสัมผัสวัสดุสองมิติเนื่องจาก PDMS จะทำหน้าที่รับวัสดุสองมิติและปกป้องไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ตัววัสดุสองมิติ เทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกนี้จะไม่มีการให้ความร้อนกับพื้นผิววัสดุฐานรอง เมื่อวัสดุสองมิติหลุดจากวัสดุฐานรอง จะได้วัสดุสองมิติติดอยู่ด้านบน PDMS

การถ่ายโอนวัสดุสองมิติ ลงบนเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่อยู่บน วัสดุฐานรอง โดย ใช้ micromanipulator จัดเรียงตำแหน่งของวัสดุสองมิติที่อยู่บน PDMS ให้ตรงกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เลื่อนวัสดุสองมิติลงอย่างช้าๆ ให้แนบติดกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ จากนั้นดึง PDMS ที่ควบคุมโดย micromanipulator ขึ้นจากวัสดุฐานรอง จะพบว่าวัสดุสองมิติหลุดออกจาก PDMS ไปติดบน เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เกิดเป็นโครงสร้าง วัสดุสองมิติ/hBN แสดงดังรูป 3.13 (จ)



รูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนการถ่ายโอนวัสดุสองมิติให้เป็นโครงสร้างแบบเฮเทอโร ด้วยเทคนิค การถ่ายโอนแบบเปียก

### 3.5.3 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ แบบบิดมุม ของ $\text{MoS}_2$

ลำดับแรกจะทำดึง  $\text{MoS}_2$  ชั้นที่หนึ่งที่อยู่บนวัสดุฐานรอง ใช้น้ำในการลดแรงยึดเกาะระหว่าง  $\text{MoS}_2$  และ วัสดุฐานรอง วิธีนี้จะใช้เทคนิคการควบคุมน้ำให้ปลดแรงยึดเกาะระหว่าง  $\text{MoS}_2$  และ วัสดุฐานรอง เมื่อ  $\text{MoS}_2$  หลุดจากวัสดุฐานรอง PDMS จะทำหน้าที่รับ  $\text{MoS}_2$  ก็จะได้  $\text{MoS}_2$  บน PDMS ตามขั้นตอนที่ของเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก

การถ่ายโอน  $\text{MoS}_2$  ชั้นที่หนึ่งลงบน  $\text{MoS}_2$  ชั้นที่สองที่อยู่บนวัสดุฐานรองเพื่อบิดมุม โดยใช้ micromanipulator จัดเรียงตำแหน่งของ  $\text{MoS}_2$  ที่อยู่บน PDMS ให้ตรงกับ  $\text{MoS}_2$  ชั้นที่สองที่อยู่ด้านล่าง โดยจัดมุมของสามเหลี่ยมชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สองให้ตรงกัน จากนั้นบิดมุมของ  $\text{MoS}_2$  ชั้นที่สองที่อยู่ด้านล่าง เลื่อน  $\text{MoS}_2$  ด้านบนลงอย่างช้าๆ ให้แนบ  $\text{MoS}_2$  ชั้นที่สองที่อยู่ด้านล่างที่ทำการบิดมุมไว้ เมื่อ  $\text{MoS}_2$  ด้านบนและด้านล่างติดกัน ดึง PDMS ที่ควบคุมโดย micro-manipulator ขึ้นจากวัสดุฐานรอง จะพบว่า  $\text{MoS}_2$  หลุดออกจาก PDMS ไปติดบน  $\text{MoS}_2$  เกิดเป็นโครงสร้าง twisted  $\text{MoS}_2$  on  $\text{Si/SiO}_2$

### 3.6 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง รวมกับ การถ่ายโอนแบบเปียก (Dry + Wetting method)

#### 3.6.1 การเตรียมแอสมบลี PDMS

การเตรียมแอสมบลีสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง รวมกับแบบเปียก จะใช้แอสมบลีสองแบบคือแบบแห้งและแบบเปียก

#### 3.6.2 การสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุสองมิติ

ลำดับแรกจะทำการดึงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่อยู่บน Si/SiO<sub>2</sub> ซึ่ง ชั้นพอลิเมอร์จะต้องแนบติดกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์โดยพื้นผิว มีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น 2 นาที จึงทำการดึงชั้นพอลิเมอร์ขึ้นอย่าง ช้า ๆ เมื่อดึงเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ขึ้นมาได้ ถ่ายโอนเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ลงบนกราฟีนที่อยู่บนวัสดุฐานรอง (Si/SiO<sub>2</sub>) โดยใช้ micro-manipulator จัดเรียงตำแหน่งของ เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ ให้ตรงกันกับกราฟีน หลังจากนั้นทำการเลื่อน เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ลงอย่างช้าๆ ให้แนบติดกับกราฟีน ที่มีอุณหภูมิพื้นผิว 90 องศาเซลเซียส ดึงชั้นพอลิเมอร์ขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ควบคุมโดย micro-manipulator เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ หลุดออกจากชั้นพอลิเมอร์บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์จะเกิดเป็นโครงสร้าง hBN/Graphene จากนั้น ต้องทำการล้างฟิล์ม PPC ที่ติดมากับผลึก hBN ด้านบนด้วยการแช่ใน anisole เป็นเวลา 30 นาที และ ตามด้วย acetone และ IPA ตามลำดับ จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

ดึง MoS<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก เมื่อ MoS<sub>2</sub> หลุดจากวัสดุฐานรอง PDMS จะทำหน้าที่รับ MoS<sub>2</sub> จะได้ MoS<sub>2</sub> บน PDMS ถ่ายโอน MoS<sub>2</sub> ลงบนเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่อยู่บนกราฟีน โดยใช้ micromanipulator จัดเรียงตำแหน่งของ MoS<sub>2</sub> ที่อยู่บน PDMS ให้ตรงกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เลื่อน MoS<sub>2</sub> ลงอย่างช้าๆ ให้แนบติดกับเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ จากนั้นดึง PDMS ที่ควบคุมโดย micromanipulator ขึ้นจากวัสดุฐานรอง MoS<sub>2</sub> หลุดออกจาก PDMS ไปติดบนเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เกิดเป็นโครงสร้าง MoS<sub>2</sub>/hBN/ Graphene

### 3.7 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์จำนวนชั้นวัสดุสองมิติ

#### 3.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy)

ในงานวิจัยนี้ตรวจสอบผลึกของวัสดุสองมิติและจำนวนชั้นของกราฟีนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งเป็นเพียงการตรวจสอบชั้นที่ไม่แม่นยำมากนัก เนื่องจากเห็นเพียงความเข้มแล้วความโปร่งแสงของกราฟีนจึงต้องอาศัยเทคนิครามานในการวิเคราะห์จำนวนชั้นกราฟีนร่วมด้วย

### 3.7.2 รามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy)

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบ สำหรับศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของสาร วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันในตัวอย่าง Raman Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายวัสดุตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง Raman spectroscopy ที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เพื่อตรวจสอบจำนวนชั้นของวัสดุสองมิติ กราฟีน

### 3.7.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) หรือ AFM เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด AFM มีความสามารถพิเศษ คือสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายทั้งพื้นผิวที่เป็นเป็นฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้า มีขนาดภาพสแกนใหญ่ที่สุดไม่เกิน 100  $\mu\text{m}$  และมีระดับความสูงต่ำ (roughness) ไม่เกิน 4  $\mu\text{m}$

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง AFM ที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เพื่อถ่ายภาพพื้นผิวความสูงและจำนวนชั้นของวัสดุสองมิติ hBN และฟอสฟอรัสดำ

ตารางที่ 3.1 รายการชิ้นส่วนทั้งหมดที่จำเป็น สำหรับการสร้างเครื่องมือระบบต้นทุนต่ำ

รายการหลัก	รายการ (คำอธิบาย)	ราคา (\$)
imaging system (~\$ 370)	● 1000× inspection zoom monocular C-mount lens + coaxial light + stereo stand	226
	● auxiliary 5× objective lens	50
	● 5MP CMOS USB microscope camera	35
	● auxiliary camera	10
	● monitor	52
stages (~\$ 390)	● XYZR linear stage	267
	● XYZ linear stage	127
substrate heating (~\$ 70)	● configurable aluminum/A6061P plate	24
	● fluoro-resin plates (80 × 80 × 10 mm)	15
	● 0–1300 degree digital PID kit	15
	● 6 × 60 mm, 90 W, 220 V cartridge heater	6
	● electronic enclosure box	8
	● high-temperature (up to 120°) double-sided PCB heat sink tape for securing the substrate	1.6
vibration isolation	● vibration damping rubber feet	18
		9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(~\$ 43)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● vibration damping rubber mat</li> <li>● general purpose cutting mat (silicone sheet)</li> </ul>	16
DIY glovebox setup (~\$ 170)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● enclosure (storage box) 16</li> <li>● portable humidity meter 23</li> <li>● portable oxygen meter 86</li> <li>● large hose clamps (for securing gloves) 3.5</li> <li>● laboratory-resistant anaerobic gloves 15</li> <li>● EPDM foam seal (4 m) 9</li> <li>● compact ball valves (for inert gas inlet and outlet) 22</li> </ul>	
2D materials (bulk)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● KISH graphite (1 g) 150</li> <li>● hBN flakes Gratis</li> <li>● black phosphorus crystals 430</li> </ul>	
CVD precursors for MoS <sub>2</sub> growth	<ul style="list-style-type: none"> <li>● molybdenum dioxide powder (10g) 50</li> <li>● sulfur powder (10 g) 59</li> </ul>	
substrate	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 4 in. Si/300 nm SiO<sub>2</sub> wafers 36</li> <li>● prefabricated Pt test chips 112</li> </ul>	
exfoliation	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 3M magic tape 1.8</li> </ul>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDMS/PPC stamp creation	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PDMS (Corning sylgard 184: base and curing agent)</li> <li>● PPC</li> <li>● Anisole</li> </ul>	126  131  107
-------------------------------	---	---------------------------



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

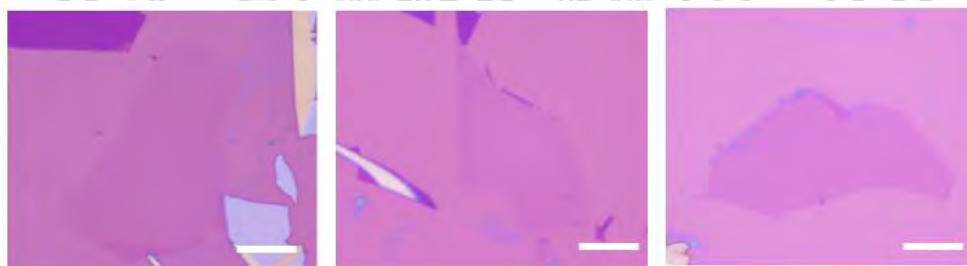
#### 4.1 ผลการสังเคราะห์วัสดุสองมิติ

##### 4.1.1 ผลการสังเคราะห์กราฟีน

จากผลการทดลองการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี standard exfoliation กราฟีนที่ได้มีขนาดเล็กเพียงไม่กี่ไมครอน แสดงดังรูป 4.1 เมื่อมีการปรับขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน modified exfoliation แสดงดังรูป 4.2 กราฟีนมีขนาดใหญ่ถึง 60 ไมครอน เป็นผลจากความเข้มข้นของการให้ความร้อนของวัสดุฐานรองก่อน-หลังของการถ่ายโอนเทป



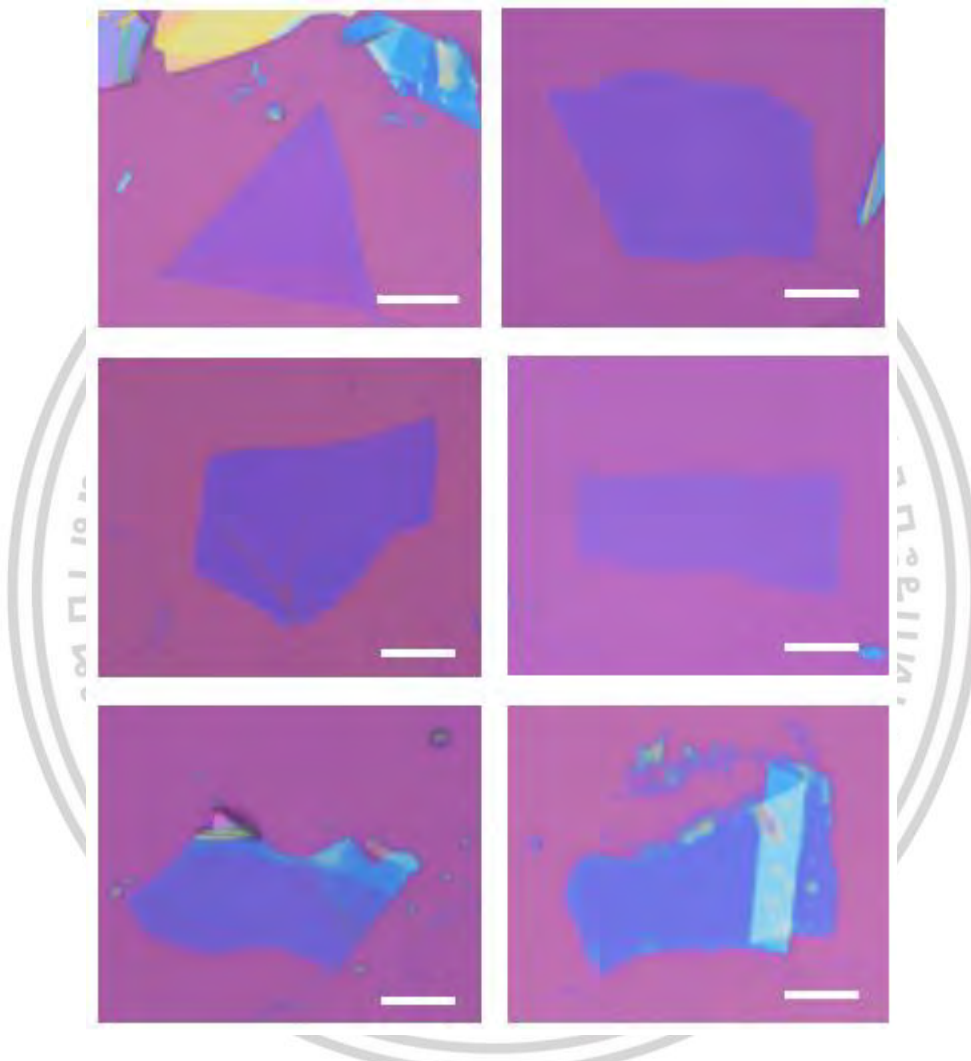
รูปที่ 4.1 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์จากวิธี Standard exfoliation สเกลบาร์ 10 ไมครอน



รูปที่ 4.2 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์จากวิธี Modified exfoliation สเกลบาร์ 10 ไมครอน

#### 4.1.2 ผลการสังเคราะห์เฮกซะโบรอนไนไตรด์

แสดงตัวอย่างผลการทดลองการสังเคราะห์ hBN ที่อยู่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ hBN สามารถผลิตโดยใช้วิธี standard exfoliation หรือ modified exfoliation เนื่องจากความหนาของ hBN ที่ต้องการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรไม่ต้องการ hBN ที่บางเกินไป แสดงดังรูป 4.3

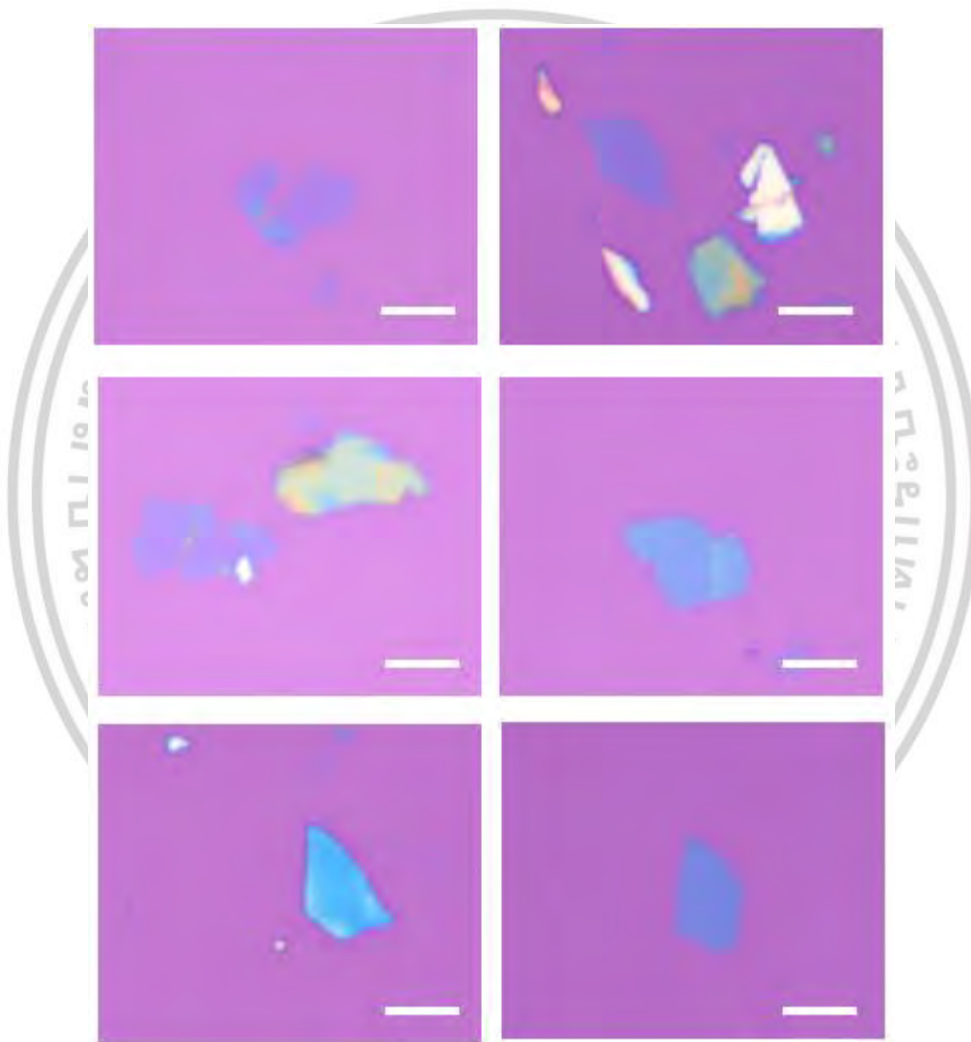


รูปที่ 4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของ hBN ที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ สเกลบาร์ 10 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลการสังเคราะห์ฟอสฟอรัสดำ

แสดงตัวอย่างผลการทดลองการสังเคราะห์ฟอสฟอรัสดำที่อยู่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใน glovebox แสดงดังรูป 4.4 ในการหาฟอสฟอรัสดำภายใต้กล้องจุลทรรศน์ความละเอียดต่ำที่ไซภายในกล่อง DIY ทำได้ยากซึ่งฟอสฟอรัสดำมีขนาดค่อนข้างเล็กเราจึงนำออกมาหาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ความละเอียดสูงในการหาฟอสฟอรัสดำจะต้องหาด้วยความเร็วที่เร็วกว่าวัสดุสองมิติ ชนิดอื่นเนื่องจากฟอสฟอรัสดำเป็นวัสดุที่ไม่เสถียรทางอากาศ

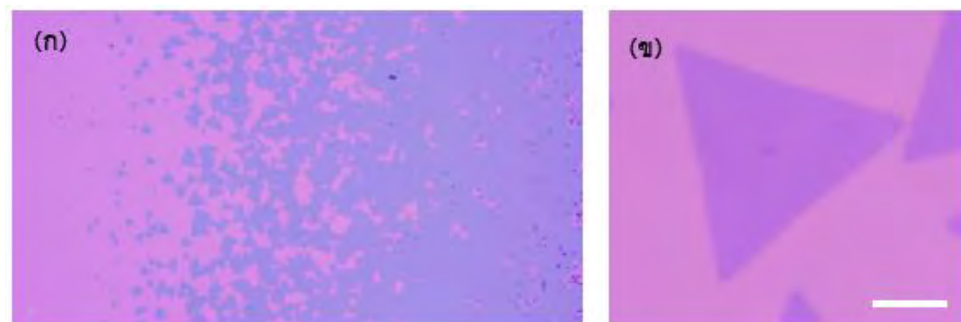


รูปที่ 4.4 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของฟอสฟอรัสดำที่บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ สเกลบาร์ 10 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลการสังเคราะห์โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์

แสดงตัวอย่างผลของ MoS<sub>2</sub> บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากการด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมี ดังรูป 4.5 จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD เราสามารถกำหนดขนาดของ MoS<sub>2</sub> ให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.5 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของ MoS<sub>2</sub> บนพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ (ก) ภาพกำลังขยาย 20 เท่า (ข) ภาพกำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน

## 4.2 ผลการรวมวัสดุสองมิติเข้าด้วยกัน

### 4.2.1 ผลจากเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง (Dry transfer)

#### 4.2.1.1 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN

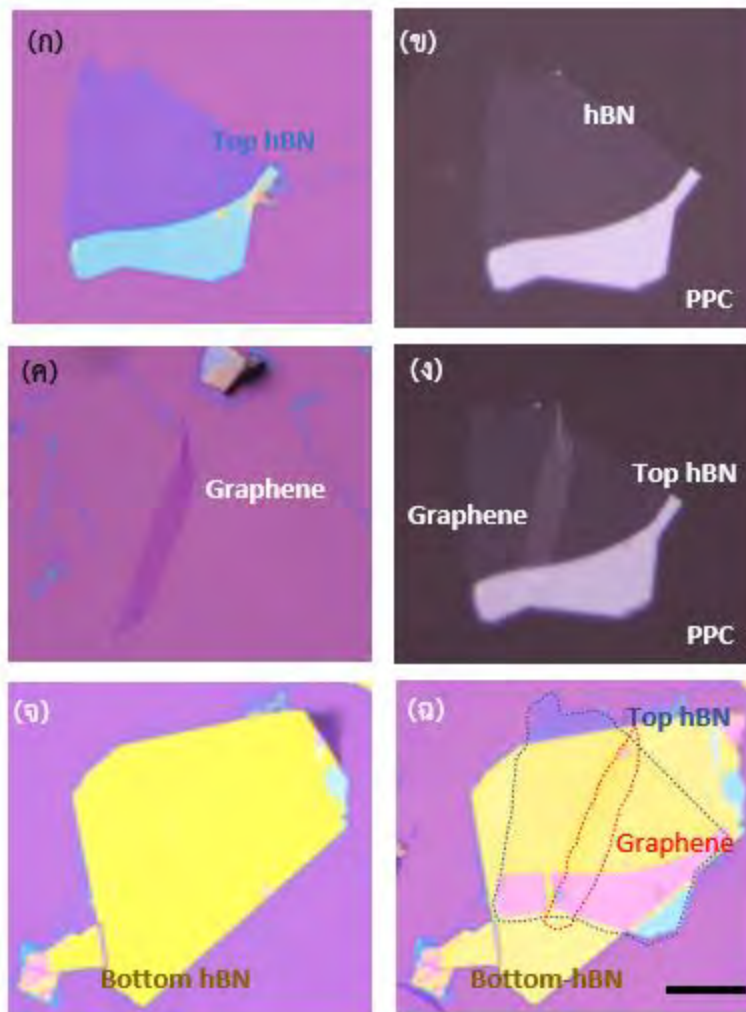
เตรียม hBN แสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8 (ก) ขั้นตอนแรกดึง hBN ชั้นแรกโดยใช้แอสมป์ PPC ที่เตรียมไว้ แสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8 (ข) จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะสามารถดึง hBN ชั้นได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำ hBN ที่ติดกับชั้นแอสมป์ PPC ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ความละเอียดสูงดูความสมบูรณ์ระหว่างก่อนและหลัง พบว่า hBN ที่ดึงขึ้นมาชั้นมีความเรียบที่สมบูรณ์ สามารถใช้การได้ในการดึงกราฟีนในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่สองดึงกราฟีนที่เตรียมไว้ แสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8 (ค) โดยการนำชั้นแอสมป์ PPC ที่ดึง hBN ชั้นแรก เราจะเลือกกราฟีนที่มีขนาดเหมาะสมกับ hBN ที่ได้จากขั้นตอนแรก จากนั้นทำการดึงกราฟีนโดยการนำชั้นแอสมป์ PPC ที่ดึง hBN ในขั้นตอนแรกนั้นมาดึงกราฟีนที่เตรียมไว้ ซึ่งตำแหน่งของ hBN ที่อยู่บน แอสมป์ PPC กับ กราฟีน นั้นจะต้องมีตำแหน่งตรงกันดังนั้นเราจึงต้องใช้ micromanipulator และกล้องจุลทรรศน์เพื่อควบคุม hBN ให้มีตำแหน่งที่ตรงกันกับกราฟีนที่เตรียมไว้ เมื่อตำแหน่งกราฟีนและ hBN ตรงกัน จะให้ความร้อนบนฐาน XYZθ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นดึงกราฟีนด้วย hBN พบว่าสามารถดึงกราฟีนขึ้นมาได้สำเร็จ แสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8

(ง) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้กราฟีนเสียหายและสามารถลดแรงระหว่างกราฟีนกับวัสดุฐานรองได้

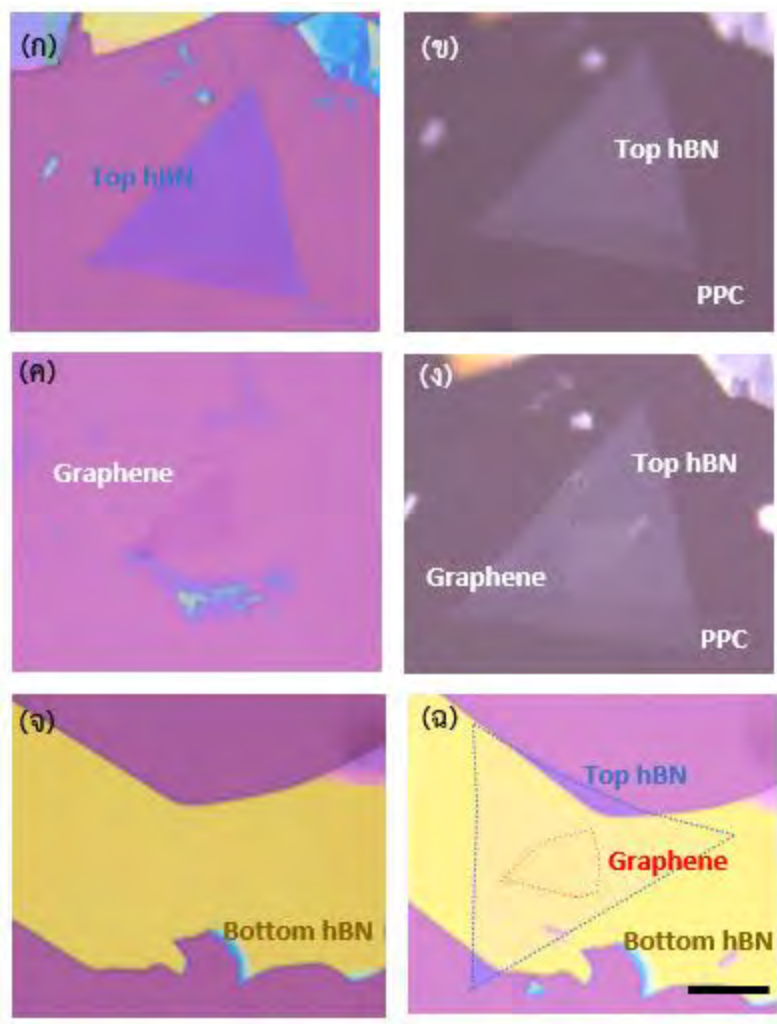
ขั้นตอนที่สามถ่ายโอน Graphene/hBN ลงบน hBN ชั้นที่สองแสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8 (จ) โครงสร้างเฮเทอโรของ hBN/graphene/hBN ระหว่างการถ่ายโอนอุณหภูมิที่สามารถละลาย PPC ให้หลุดออกและไม่ทำให้โครงสร้างเฮเทอโรเกิดฟองอากาศระหว่างชั้นของวัสดุสองมิติอุณหภูมิจะอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส ขณะที่ถ่ายโอน Graphene/hBN ลงบน hBN ชั้นที่สอง จะต้องไล่ฟองอากาศซ้ำๆ โดยค่อยๆปล่อย Graphene/hBN จากฝั่งใดฝั่งหนึ่ง ลงบน hBN ชั้นที่สอง แสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8 (ฉ) จากผลการทดลองเมื่อสร้างโครงสร้างเสร็จแสดงดังรูป 4.6 และ 4.7 (ค) โครงสร้างเฮเทอโร hBN/graphene/hBN จะสามารถมองเห็นกราฟีนได้ค่อนข้างยากเนื่องจาก hBN ชั้นล่างมีความหนาส่งผลต่อกราฟีนที่มีความโปร่งแสง ซึ่งต่างจาก ผลการทดลองที่แสดงดังรูป 4.8 (ง) ที่สามารถมองเห็นกราฟีนที่อยู่ระหว่างชั้นของ hBN ได้ชัดเจนเนื่องจาก hBN ทั้งชั้นบนและชั้นล่างมีความบางและมองเห็นฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของ hBN ที่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายโอน

ในงานวิจัยนี้สร้างโครงสร้างเฮเทอโร hBN/graphene/hBN ที่สร้างภายใน glove box เพื่อป้องกันการออกซิเดชันของกราฟีนและเปรียบเทียบปริมาณการเกิดฟองอากาศของโครงสร้าง hBN/graphene/hBN ที่สร้างภายในและภายนอก glovebox จากผลการทดลองแสดงดังรูป 4.9 แสดงให้เห็นว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น hBN และกราฟีน นั้นมีฟองอากาศเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับโครงสร้าง hBN/graphene/hBN ที่สร้างภายนอก glovebox เนื่องมาจากการสร้างภายใน glovebox มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น



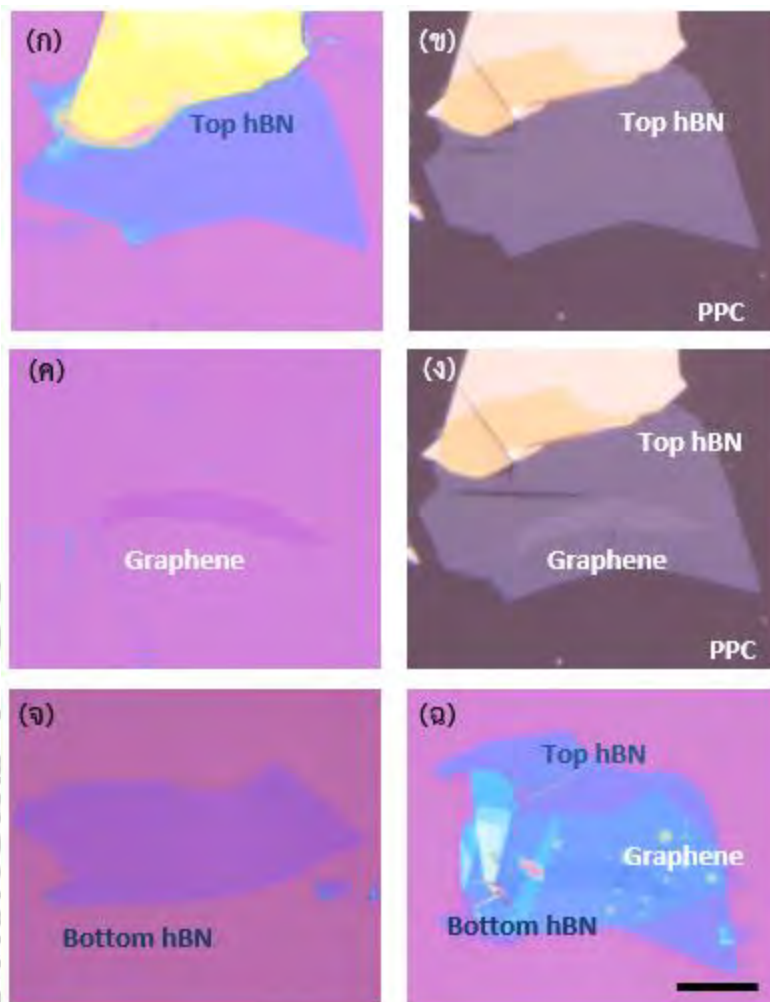
รูปที่ 4.6 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



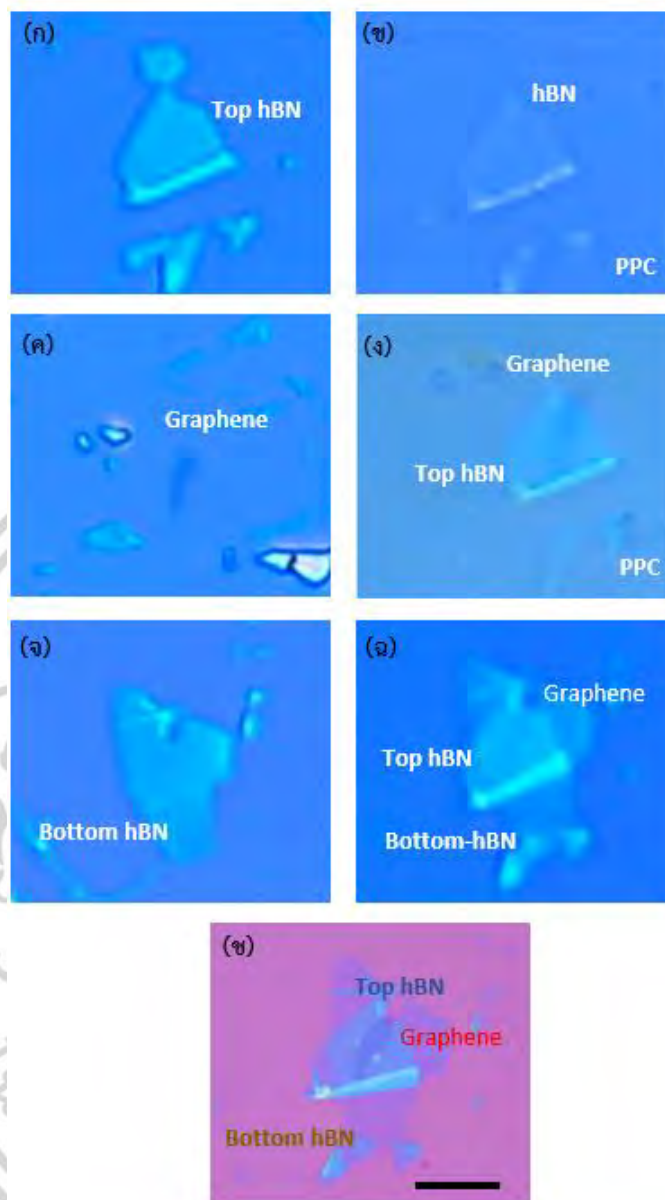
รูปที่ 4.7 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN ที่สร้างภายใต้การควบคุมความชื้นและปริมาณออกซิเจน (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ Graphene/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/graphene/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ช) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 20 ไมครอน

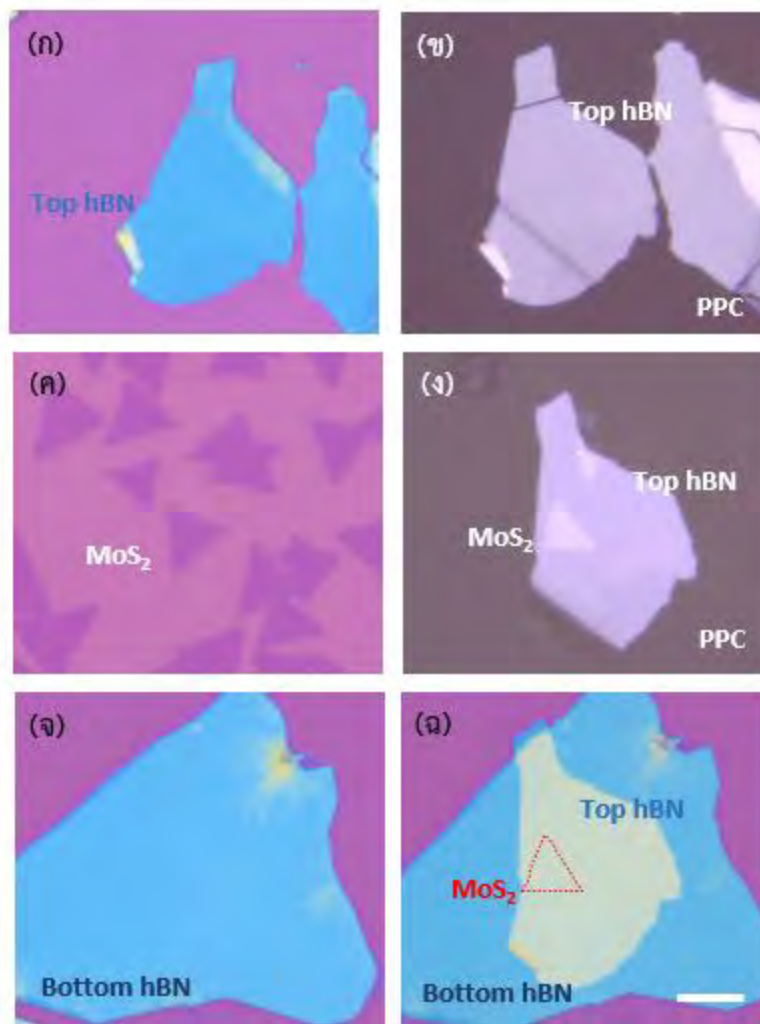
#### 4.2.1.2 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/MoS<sub>2</sub>/hBN

ขั้นตอนแรกคือ hBN ชั้นแรก แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11 (ก) โดยใช้แอสตมพ์ PPC แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11 (ข) ใช้วิธีเดียวกับการดึง hBN ของโครงสร้างแบบ hBN/graphene/hBN

ขั้นตอนที่สองคือ MoS<sub>2</sub> แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11 (ค) โดยการนำชั้นแอสตมพ์ PPC ที่ดึง hBN ชั้นแรกได้สำเร็จแล้ว MoS<sub>2</sub> ที่ใช้ในการทดลองมาจากเทคนิค CVD จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของ MoS<sub>2</sub> กับวัสดุฐานรองมีความหนาแน่นมาก จึงทำการให้ความร้อน MoS<sub>2</sub> ก่อนขั้นตอนการดึง MoS<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 30 นาที จากนั้นนำชั้นแอสตมพ์ PPC ที่ดึง hBN ในขั้นตอนแรกนั้นมาทำการดึง MoS<sub>2</sub> จัดตำแหน่งของ hBN ที่อยู่บนแอสตมพ์ PPC กับ MoS<sub>2</sub> ให้ตำแหน่งตรงกัน จากนั้นให้ความร้อนฐานรองเหลืออุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อ hBN นั้นลงไปสัมผัสกับ MoS<sub>2</sub> แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 5 นาทีหลังจากนั้นก็ทำการดึงขึ้นอย่างรวดเร็ว พบว่าสามารถดึง MoS<sub>2</sub> ขึ้นมาได้สำเร็จ แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11 (ง)

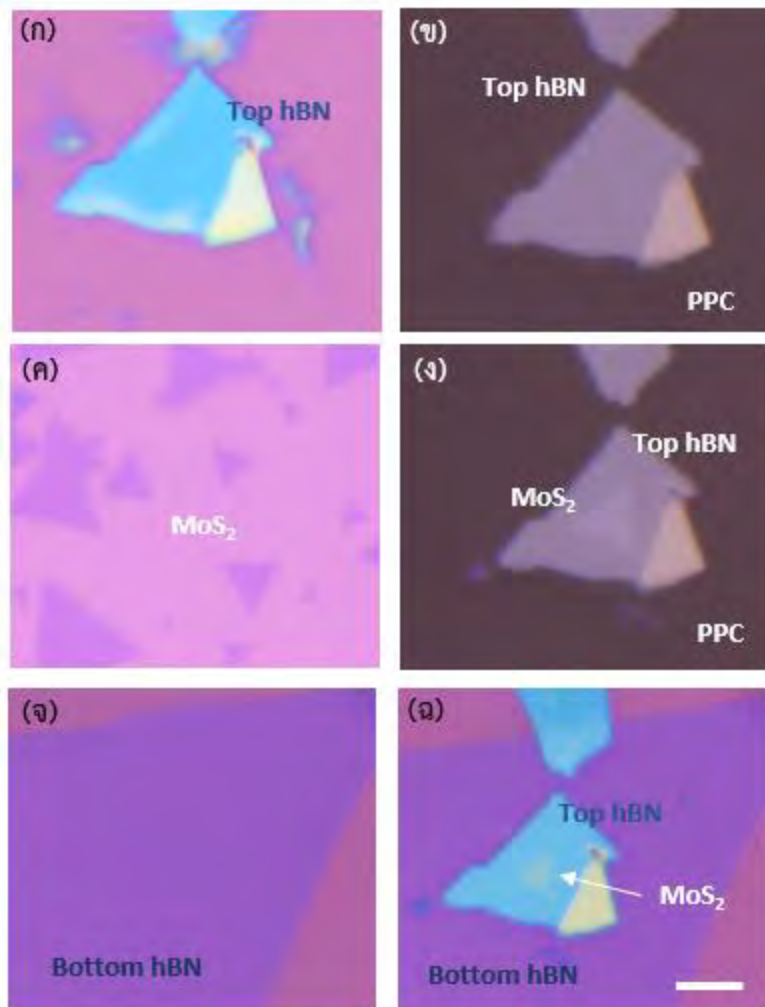
ขั้นตอนที่สามคือ MoS<sub>2</sub>/hBN ลงบน hBN ชั้นที่สอง แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11 (จ) ระหว่างการถ่ายโอนอุณหภูมิที่สามารถละลาย PPC ให้หลุดออกและไม่ทำให้โครงสร้างเฮเทอโรเกิดฟองอากาศระหว่างชั้นของวัสดุสองมิติอุณหภูมิจะอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส ขณะที่ถ่ายโอน MoS<sub>2</sub>/hBN ลงบน hBN ชั้นที่สอง จะต้องไล่ฟองอากาศต่างๆโดยค่อยๆปล่อย MoS<sub>2</sub>-hBN จากฝั่งใดฝั่งหนึ่ง ลงบน hBN แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11 (ฉ)

จากการทดลองพบว่า hBN ที่สามารถดึง MoS<sub>2</sub> ที่ได้จากเทคนิค CVD ความหนาของผลึก hBN นั้นมีผลต่อการดึง MoS<sub>2</sub> ซึ่งผลึก hBN ที่นำมาดึง MoS<sub>2</sub> ควรมีความหนามากกว่า 10 ชั้นจึงจะสามารถดึง MoS<sub>2</sub> ขึ้นมาได้มากกว่า hBN ที่มีความบางเพียงไม่กี่ชั้นเนื่องจาก hBN หลายชั้นนั้นมีแรงระหว่างชั้นค่อนข้างมากจึงสามารถดึง MoS<sub>2</sub> บางผลึกได้



รูปที่ 4.10 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/MoS<sub>2</sub>/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub>-hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/ MoS<sub>2</sub>/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

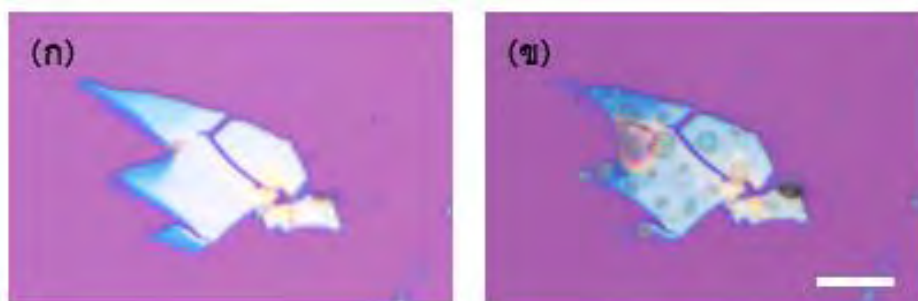


รูปที่ 4.11 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/MoS<sub>2</sub>/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub>/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/ MoS<sub>2</sub>/hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน

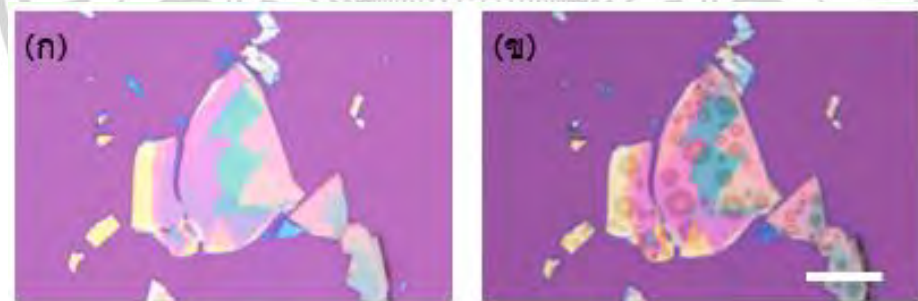
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.1.3 โครงสร้างเฮทเทอโรแบบ hBN/BP/hBN

โครงสร้างเฮทเทอโรแบบ hBN/BP/hBN จะดำเนินการภายใน glovebox เนื่องจาก BP เป็นวัสดุที่ไม่เสถียรทางอากาศมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิดेशनทำให้ผลึก BP เกิดความเสียหาย งานวิจัยนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ glovebox โดยการสังเคราะห์ BP จากเทคนิคการลอกภายในและภายนอก glovebox สำหรับผลึก BP ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการลอกโดยลอกภายใต้สภาวะแวดล้อมด้านนอก glovebox จากตัวอย่างที่ 1 และ 2 แสดงดังรูป 4.12 และ 4.13 (ก) พบว่าผลึก BP เกิดความเสียหายรุนแรง หลังจากสัมผัสอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังรูป 4.12 และ 4.13 (ข)

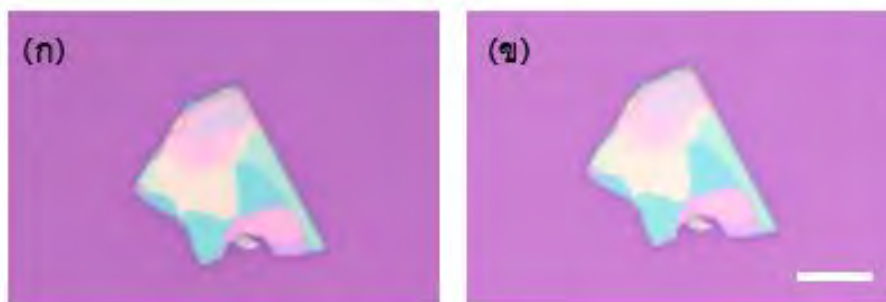


รูปที่ 4.12 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ก) ผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ข) ผลึก BP ที่ได้รับความเสียหายหลังจากสัมผัสอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน

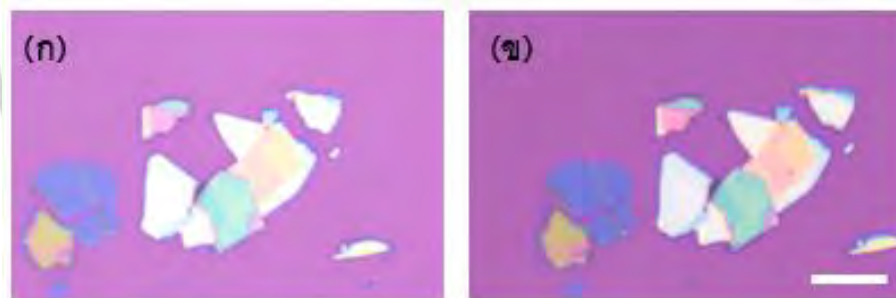


รูปที่ 4.13 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ก) ผลึก BP ลอกภายใต้สภาวะแวดล้อม (ข) ผลึก BP ที่ได้รับความเสียหายหลังจากสัมผัสอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน

ในทางกลับกัน เมื่อทำการลอกภายใน glovebox ภายใต้การควบคุมความชื้นและออกซิเจนแสดงดังรูป 4.14 และ 4.15 (ก) เมื่อตัวอย่างถูกทิ้งไว้ภายใน glovebox หลังการทำงานไม่มีความเสียหายที่มองเห็นได้บนผลึก BP เมื่อตรวจสอบในเวลาต่อมา (24 ชั่วโมง) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ความละเอียดสูง แสดงดังรูป 4.14 และ 4.15 (ข) ตัวอย่าง BP ได้รับการปกป้องอย่างดีภายใน glovebox ถึงแม้ว่าการไหลของแก๊สที่ไหลเข้าถูกปิดแล้วก็ตามซึ่งแสดงให้เห็นว่า glovebox มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุที่ไม่เสถียรทางอากาศ



รูปที่ 4.14 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใน glovebox ที่ควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น (ก) ผลึก BP ลอกภายใน glovebox (ข) ผลึก BP หลังจากเก็บภายใน glovebox เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน

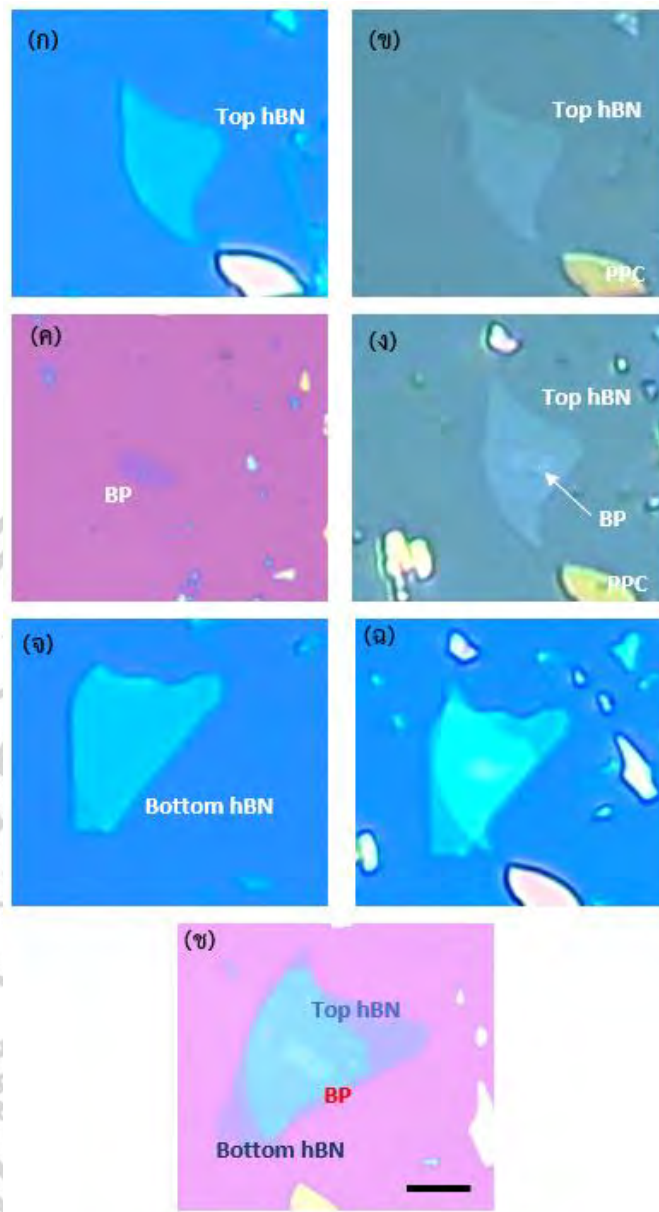


รูปที่ 4.15 แสดงภาพผลึก BP ลอกภายใน glovebox ที่ควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น (ก) ผลึก BP ลอกภายใน glovebox (ข) ผลึก BP หลังจากเก็บภายใน glovebox เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สเกลบาร์ 10 ไมครอน

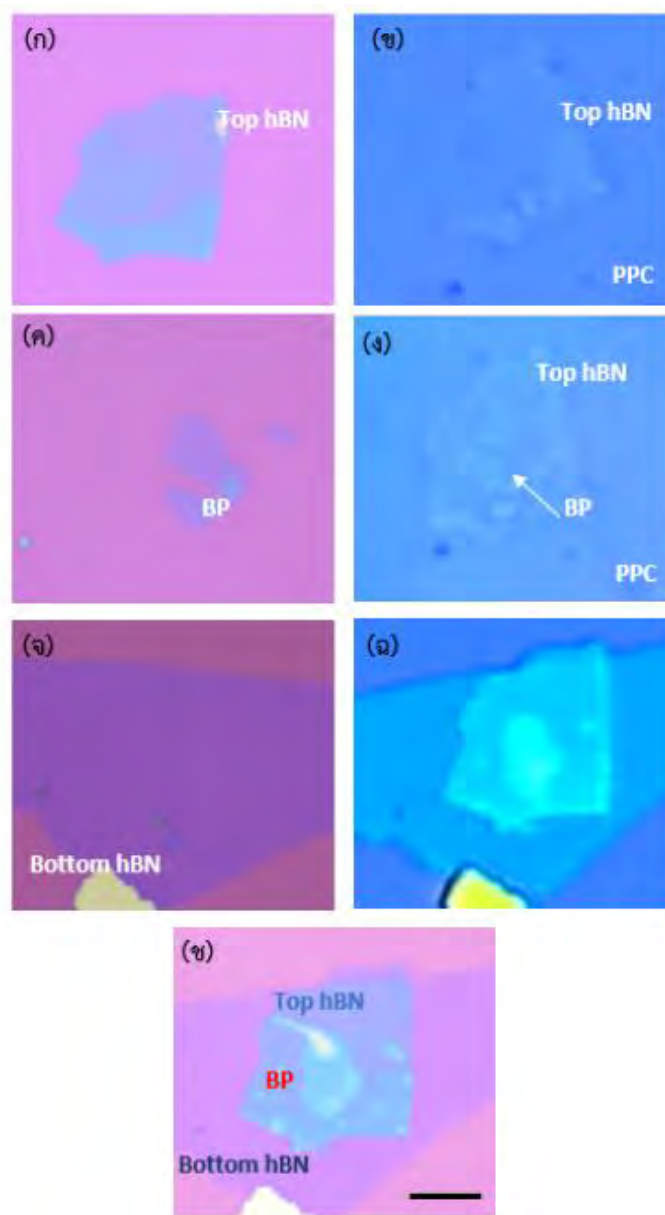
สำหรับการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ชั้นตอนแรกเตรียม hBN ชั้นแรก แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (ก) และดึง hBN โดยใช้แอสมพ์ PPC อุณหภูมิที่ใช้ดึง เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการดำเนินการภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่บรรยากาศภายในมีอุณหภูมิต่ำ แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (ข) การสร้างเฮเทอโรภายใน glovebox นั้นจะไม่สามารถนำแอสมพ์ หลังจากการดึงวัสดุสองมิติออกมาตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุสองมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง ความละเอียดสูงได้จึงใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำในการตรวจสอบ

ชั้นตอนที่สองดึง BP แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (ค) โดยการนำชั้นแอสมพ์ PPC ที่ดึง hBN ชั้นแรก เลือก BP ที่มีความหนา 1-2 ชั้น ดึง BP โดยการนำชั้นแอสมพ์ PPC ที่ดึง hBN ในชั้นตอนแรกนั้นมาทำการดึง BP เตรียมไว้ แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (ง) จัดตำแหน่งของ hBN ที่อยู่บน แอสมพ์ PPC กับ BP นั้นจะต้องมีตำแหน่งตรงกัน

ชั้นตอนที่สามถ่ายโอน BP/hBN ลงบน hBN ชั้นที่สอง แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (จ) ขณะที่ถ่ายโอน BP/hBN ลงบน hBN ชั้นที่สองจะต้องไลฟองอากาศต่างๆโดยค่อยๆปล่อย BP/hBN จากฝั่งใดฝั่งหนึ่ง ลงบน hBN ชั้นที่สอง อุณหภูมิที่ใช้ถ่ายโอนขณะดำเนินการภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นจะใช้อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (ฉ) เมื่อสร้างโครงสร้างภายใน glovebox สำเร็จสามารถนำโครงสร้างมาตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ความละเอียดสูง แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 (ซ) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ดึงและถ่ายโอนขณะดำเนินการภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นเท่ากับ 60 และ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากบรรยากาศภายใน glovebox นั้นมีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.16 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ช) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 20 ไมครอน



รูปที่ 4.17 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ฉ) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ช) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 20 ไมครอน

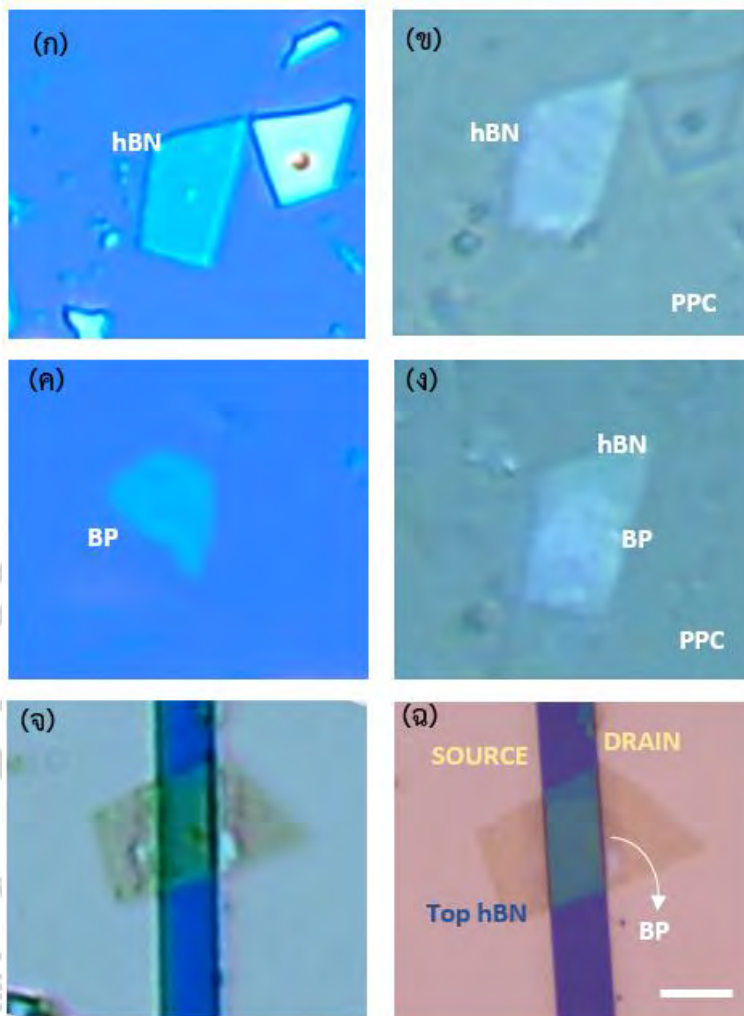
#### 4.2.1.3 โครงสร้างเฮทเทอโรแบบ hBN/BP/contact

ชั้นตอนแรกตั้ง hBN ชั้นแรก แสดงดังรูป 4.18 และ 4.19 (ก) ตั้งโดยใช้แอสตมป์ PPC แสดงดังรูป 4.18 และ 4.19 (ข) ดำเนินการเช่นเดียวกับ โครงสร้างเฮทเทอโรแบบ hBN/BP/hBN

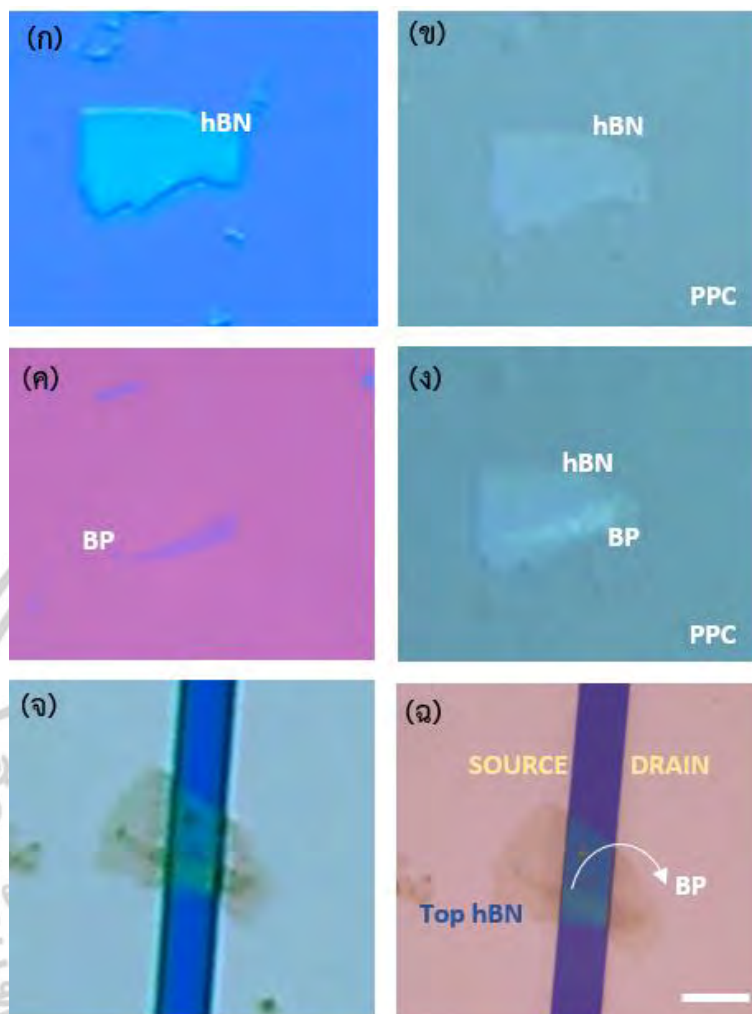
ชั้นตอนที่สองตั้ง BP แสดงดังรูป 4.18 และ 4.19 (ค) โดยการนำชั้นแอสตมป์ PPC ที่ตั้ง hBN ชั้นแรก เลือกลง BP ที่มีความหนา 1-2 ชั้น ตั้ง BP โดยการนำชั้นแอสตมป์ PPC ที่ตั้ง hBN ในชั้นตอนแรกนั้นมาทำการตั้ง BP เติร์ยมไว้ แสดงดังรูป 4.18 และ 4.19 (ง) จัดตำแหน่งของ hBN ที่อยู่บน แอสตมป์ PPC กับ BP นั้นจะต้องมีตำแหน่งตรงกัน ชั้นตอนแรกและชั้นตอนที่สองดำเนินการเช่นเดียวกับ โครงสร้างเฮทเทอโรแบบ hBN/BP/hBN

ชั้นตอนที่สามถ่ายโอน hBN/BP ลงบน contact ในระหว่างการถ่ายโอนอุณหภูมิที่เหมาะสมและทำให้โครงสร้างเฮทเทอโรเกิดความสมบูรณ์ไม่เกิดฟองอากาศระหว่างรอยต่อ contact จะใช้อุณหภูมิถ่ายโอน 100 องศาเซลเซียส ขณะที่ถ่ายโอน hBN-BP ลงบน ขั้วไฟฟ้า (contact) จะต้องไล่ฟองอากาศช้าๆโดยค่อยๆปล่อย hBN/BP จากฝั่งใดฝั่งหนึ่ง ลงบน contact แสดงดังรูป 4.18 และ 4.19 (จ-ฉ) ซึ่ง contact ที่ใช้สำหรับวาง hBN/BP มีระยะห่าง 10 ไมครอน

โครงสร้างเฮทเทอโร hBN/BP เมื่อนำไปวางบนขั้วไฟฟ้าโครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่สร้างมาเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า (electrical device) เมื่อนำ hBN มาวางด้านบนของ BP ซึ่ง hBN ที่วางด้านบนนั้นจะต้องปกคลุมผลึก BP ทั้งผลึกเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ BP เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับผลึก BP



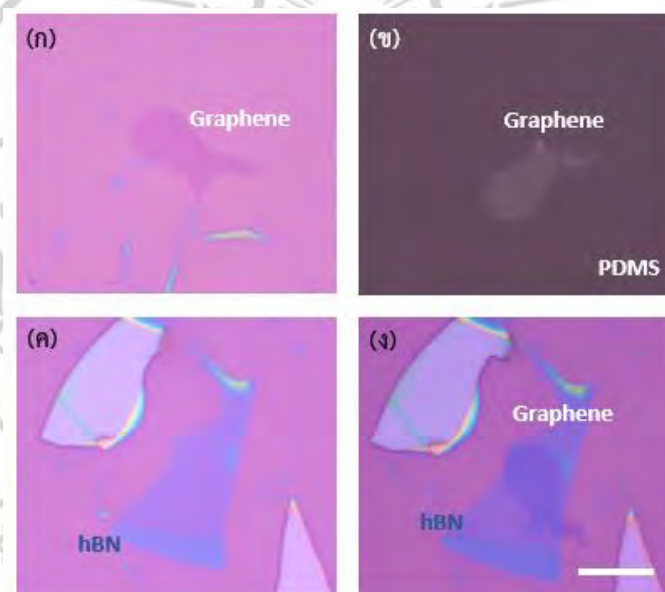
รูปที่ 4.18 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ โครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (ค) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง



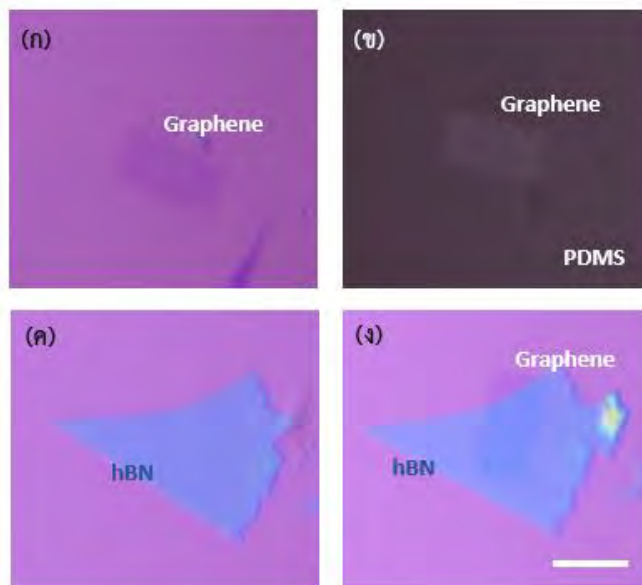
รูปที่ 4.19 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact (ก) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on แสตมป์ PPC (ค) แสดงภาพ BP on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ BP/hBN on แสตมป์ PPC (จ) แสดงภาพ โครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดต่ำ (C) แสดงภาพโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/ contact จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงความละเอียดสูง สเกลบาร์ 10 ไมครอน

#### 4.2.2.1 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ Graphene/hBN

โครงสร้างเฮเทอโรแบบ Graphene/hBN จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกวิธีนี้จะต้องทำให้วัสดุฐานรองมีคุณสมบัติความน้ำ ก่อนที่จะลอกกราฟีน โดยการนำวัสดุฐานรองผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา แสดงดังรูป 4.20 และ 4.21 (ก) จากนั้นดึงกราฟีนโดยใช้ PDMS และน้ำ จากนั้นจะได้กราฟีนที่อยู่บน PDMS แสดงดังรูป 4.20 และ 4.21 (ข) ทำตามขั้นตอนการถ่ายโอนแบบเปียก ต่อมานำกราฟีนที่อยู่บน PDMS ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนถ่ายโอน เพื่อให้ความชื้นจากน้ำที่ติดมากับกราฟีนแห้งก่อนมาจึงจะนำมาถ่ายโอนลงบน hBN ที่เตรียมไว้โดยผลึกของ hBN แสดงดังรูป 4.20 และ 4.21 (ค) ถ่ายโอนกราฟีนลงบน hBN โดยจัดตำแหน่งของ กราฟีน และ hBN ให้ตรงกัน เมื่อถ่ายโอนสำเร็จจะได้โครงสร้างเฮเทอโร Graphene/hBN แสดงดังรูป 4.20 และ 4.21 (ง)



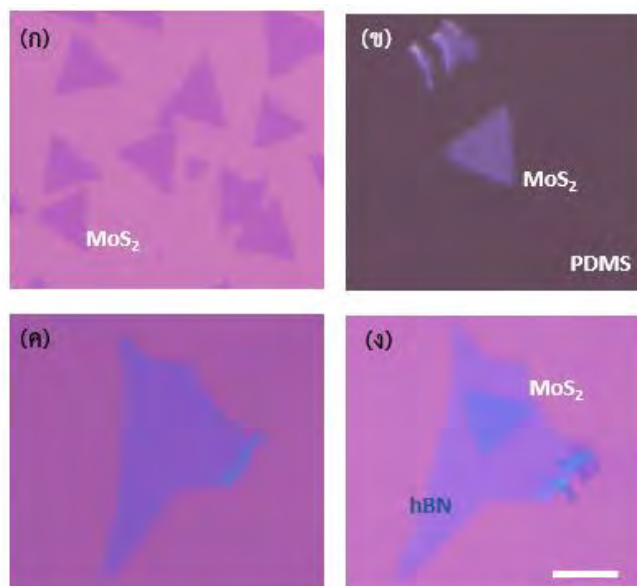
รูปที่ 4.20 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ Graphene/hBN (ก) แสดงภาพ graphene on Si/SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ graphene on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ graphene on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน



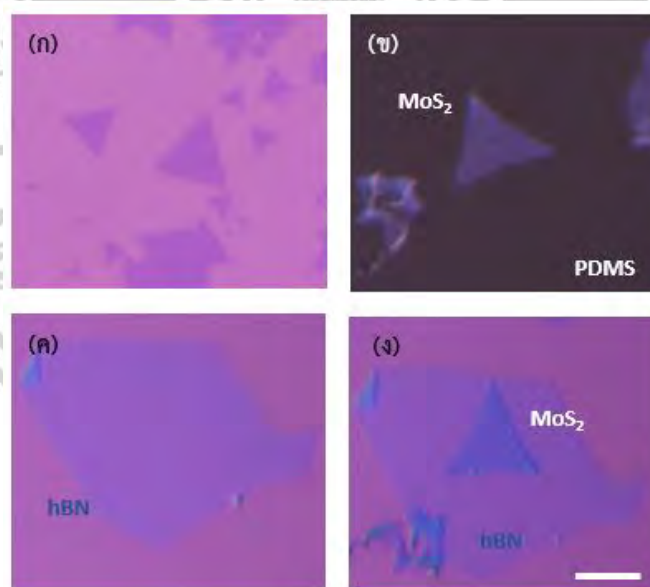
รูปที่ 4.21 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ Graphene/hBN (ก) แสดงภาพ graphene on Si/ SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ graphene on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ graphene on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน

#### 4.2.2.2 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS<sub>2</sub>/hBN

เตรียม MoS<sub>2</sub> จากเทคนิค CVD แสดงดังรูป 4.22 และ 4.23 (ก) สำหรับ MoS<sub>2</sub> จากเทคนิค CVD ไม่ต้องนำวัสดุฐานรองไปผ่านกระบวนการพลาสมาก่อนการสังเคราะห์เนื่องจากเทคนิค CVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นมีการทำปฏิกิริยากับวัสดุฐานรองด้วยแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสังเคราะห์จึงทำให้วัสดุฐานรองมีความชอบน้ำแล้ว ชั้นแรกตั้ง MoS<sub>2</sub> โดยใช้ PDMS และน้ำ จะได้ MoS<sub>2</sub> ที่อยู่บน PDMS ทำตามขั้นตอนของเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก โดยนำ MoS<sub>2</sub> ที่อยู่บน PDMS วางพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนถ่ายโอน เพื่อให้ความชื้นจากน้ำที่ติดมากับ MoS<sub>2</sub>แห้งก่อน หลังจากนั้นจะนำ MoS<sub>2</sub> ที่อยู่บน PDMS แสดงดังรูป 4.22 และ 4.23 (ข) มาถ่ายโอนลงบน hBN ที่เตรียมไว้โดย hBN ที่เตรียมไว้แสดงดังรูป 4.22 และ 4.23 (ค) ถ่ายโอน MoS<sub>2</sub> ลงบน hBN แสดงดังรูป 4.22 และ 4.23 (ง)



รูปที่ 4.22 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ  $\text{MoS}_2/\text{hBN}$  (ก) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on Si/  $\text{SiO}_2$  (ข) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on PDMS ที่ได้จากการถ่ายไอออนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/  $\text{SiO}_2$  (ง) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายไอออน สเกลบาร์ 10 ไมครอน

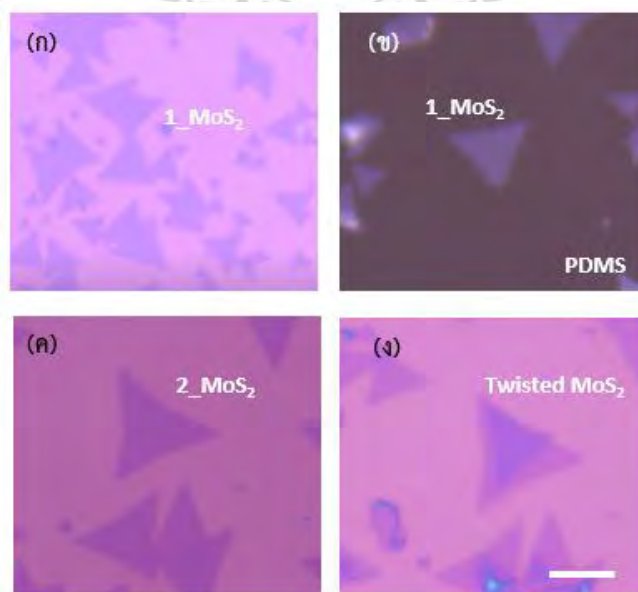


รูปที่ 4.23 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ  $\text{MoS}_2/\text{hBN}$  (ก) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on Si/  $\text{SiO}_2$  (ข) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on PDMS ที่ได้จากการถ่ายไอออนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/  $\text{SiO}_2$  (ง) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on hBN หลังจากกระบวนการถ่ายไอออน สเกลบาร์ 10 ไมครอน

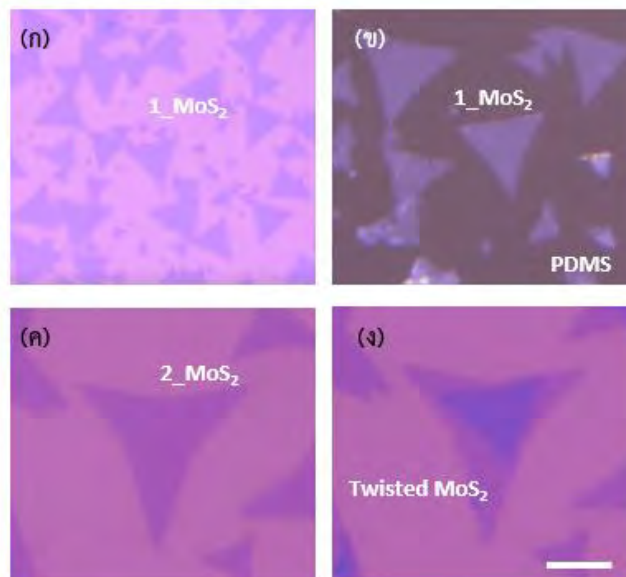
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.3 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub>

ขั้นตอนแรกเตรียม MoS<sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง จากเทคนิค CVD แสดงดังรูป 4.24 และ 4.25 (ก) จากนั้นดึง MoS<sub>2</sub> โดยใช้ PDMS และน้ำ จะได้ MoS<sub>2</sub> ที่อยู่บน PDMS ทำตามขั้นตอนเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก หลังจากจากนั้นจะนำ MoS<sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่งที่อยู่บน PDMS แสดงดังรูป 4.24 และ 4.25 (ข) มาถ่ายโอนลงบน MoS<sub>2</sub> ชั้นที่สองที่เตรียมไว้โดย MoS<sub>2</sub> ชั้นที่สองที่เตรียมไว้แสดงดังรูป 4.24 และ 4.25 (ค) ขั้นตอนการถ่ายโอนของ MoS<sub>2</sub> จัดตำแหน่งของ MoS<sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สองให้ตำแหน่งสามเหลี่ยมอยู่แนวเดียวกันจากนั้นบิดมุมของ MoS<sub>2</sub> ชั้นที่สองที่วางบนฐาน xyz โดยใช้ฐาน xyz ในการบิดมุมที่ต้องการและจากนั้นถ่ายโอน MoS<sub>2</sub> ซ้ำๆเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศระหว่างชั้นของ MoS<sub>2</sub> แสดงดังรูป 4.24 และ 4.25 (ง) บิดมุม MoS<sub>2</sub> ที่มีขนาดมุม 12 องศา



รูปที่ 4.24 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub> (ก) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on Si/ SiO<sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง (ข) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on Si/ SiO<sub>2</sub> ชั้นที่สอง (ง) แสดงภาพ twisted MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub> มุม 15 องศา หลังจากกระบวนการถ่ายโอน

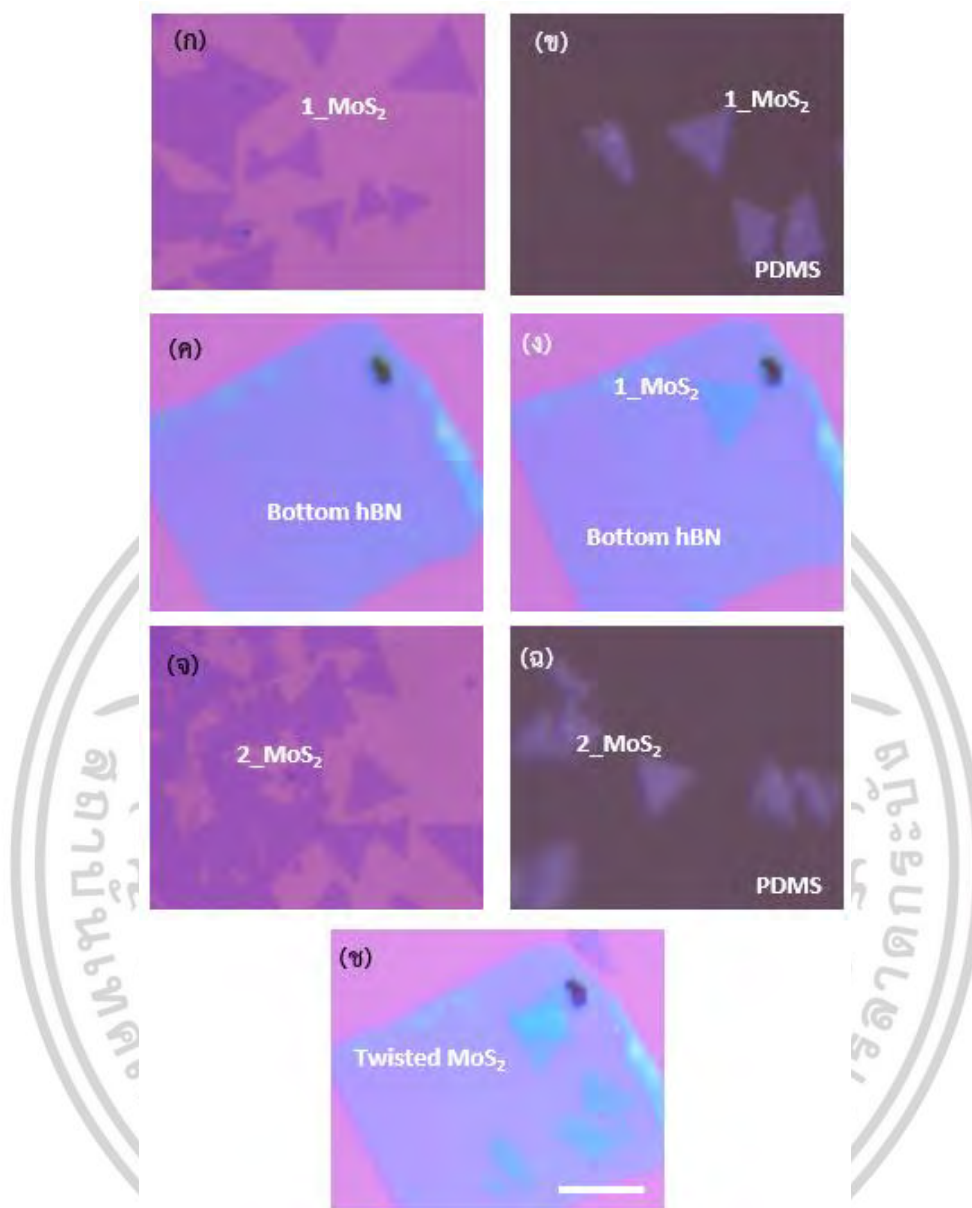


รูปที่ 4.25 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub> (ก) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on Si/ SiO<sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง (ข) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on PDMS ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ MoS<sub>2</sub> on Si/ SiO<sub>2</sub> ชั้นที่สอง (ง) แสดงภาพ twisted MoS<sub>2</sub> on Si/SiO<sub>2</sub> มุม 15 องศา หลังจากกระบวนการถ่ายโอน สเกลบาร์ 10 ไมครอน

#### 4.2.2.4 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted MoS<sub>2</sub> on hBN

เตรียม MoS<sub>2</sub> ชั้นที่หนึ่ง จากเทคนิค CVD แสดงดังรูป 4.26 (ก) จากนั้นดึง MoS<sub>2</sub> โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกแสดงดังรูป 4.26 (ข) ถ่ายโอนลงบน hBN แสดงดังรูป 4.26 (ค) เตรียม MoS<sub>2</sub> ชั้นที่สอง แสดงดังรูป 4.26 (ง) จากนั้นดึง MoS<sub>2</sub> โดยใช้ เทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกแสดงดังรูป 4.26 (ฉ) และนำไปถ่ายโอนลงบน MoS<sub>2</sub>/hBN แสดงดังรูป 4.26 (ช) บิดมุม 180 องศา แสดงดังรูป 4.26 (ซ)

จากผลการทดลอง hBN ที่อยู่ด้านล่างควรมีขนาดใกล้เคียงหรือใหญ่กว่า MoS<sub>2</sub> เล็กน้อย เนื่องจาก MoS<sub>2</sub> ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกจะติดบน PDMS จำนวนมาก เมื่อถ่ายโอน MoS<sub>2</sub> บน hBN ผลึกของ MoS<sub>2</sub> ชั้นอื่นอาจอยู่บน hBN ด้วยเช่นกันจึงยากต่อการนำไปดำเนินการในขั้นตอนการสังเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า



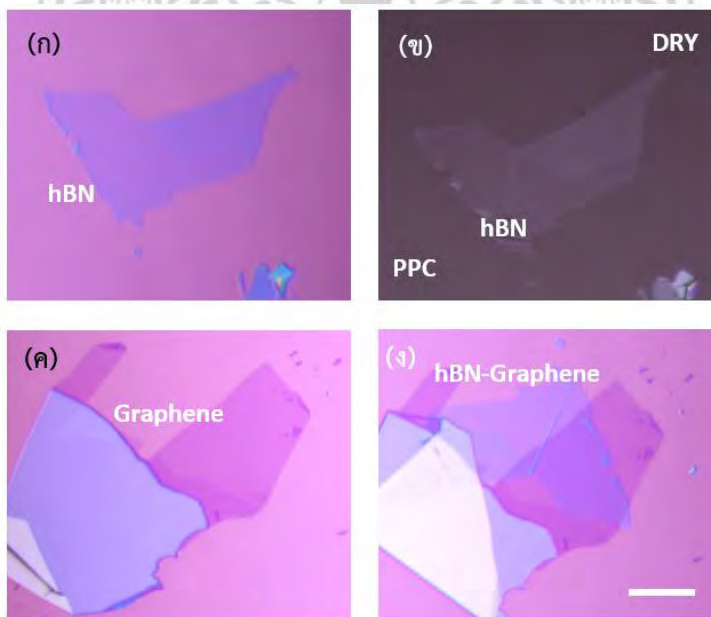
รูปที่ 4.26 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ twisted  $\text{MoS}_2$  on hBN (ก) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on Si/  $\text{SiO}_2$  ชั้นที่หนึ่ง (ข) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on PDMS ชั้นที่หนึ่งที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ hBN on Si/  $\text{SiO}_2$  (ง) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on hBN ชั้นที่หนึ่งที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (จ) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on Si/  $\text{SiO}_2$  ชั้นที่สอง (ฉ) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on PDMS ชั้นที่สองที่ได้จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ช) แสดงภาพ twisted  $\text{MoS}_2$  on hBN สเกลบาร์ 10 ไมครอน

#### 4.2.2.4 โครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS<sub>2</sub>/hBN/Graphene

โครงสร้าง tunneling heterostructure เป็นโครงสร้างแบบแนวตั้งที่ประกอบไปด้วย MoS<sub>2</sub>/hBN/Graphene เป็นโครงสร้างที่ใช้วัสดุสองมิติ สามชนิดในการสร้างโครงสร้างเฮเทอโร ซึ่งใช้เทคนิคการถ่ายโอน ทั้งสองเทคนิคคือเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้งและการถ่ายโอนแบบเปียก

การถ่ายโอนแบบแห้ง

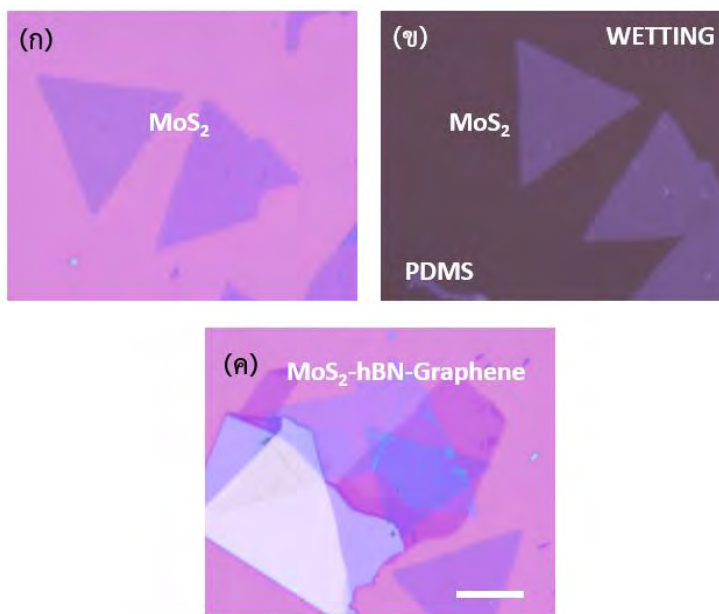
เตรียม hBN จากเทคนิคการลอก แสดงดังรูป 4.27 (ก) จากนั้นดึง hBN โดยใช้ เทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง แสดงดังรูป 4.27 (ข) เตรียมกราฟีนจากเทคนิคการลอก แสดงดังรูป 4.27 (ค) ถ่ายโอน hBN ลงบนกราฟีน แสดงดังรูป 4.27 (ง) จากผลการทดลองการถ่ายโอน hBN ลงบนกราฟีนด้วยเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง อุณหภูมิสำหรับถ่ายโอน hBN จะต้องใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงสำหรับกราฟีนที่อยู่ด้านล่างอาจส่งผลให้กราฟีนเสียหาย ความร้อนทำให้กราฟีนเกิดการม้วนตัว จึงนำแอสตัมป์ ที่มี hBN ไปให้ความร้อนแยกกับกราฟีนใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและย้ายมาถ่ายโอนบนกราฟีนโดยให้ความร้อนกับกราฟีน 40 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้ทำให้กราฟีนไม่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 4.27 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS<sub>2</sub>/hBN/Graphene (ก) แสดงภาพ hBN on Si/ SiO<sub>2</sub> (ข) แสดงภาพ hBN on PPC จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง (ค) แสดงภาพ Graphene on Si/ SiO<sub>2</sub> (ง) แสดงภาพ hBN on Graphene จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบแห้ง สเกลบาร์ 10 ไมครอน

การถ่ายโอนแบบเปียก

เตรียม  $\text{MoS}_2$  จากเทคนิค CVD แสดงดังรูป 4.28 (ก) จากนั้นดึง  $\text{MoS}_2$  โดยใช้ เทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียกแสดงดังรูป 4.28 (ข) จากนั้นนำ  $\text{MoS}_2$  ที่ได้ไปถ่ายโอนลงบน hBN/Graphene จากการถ่ายโอนแบบแห้ง จะได้โครงสร้างเฮเทอโร  $\text{MoS}_2/\text{hBN/Graphene}$  แสดงดังรูป 4.28 (ค)



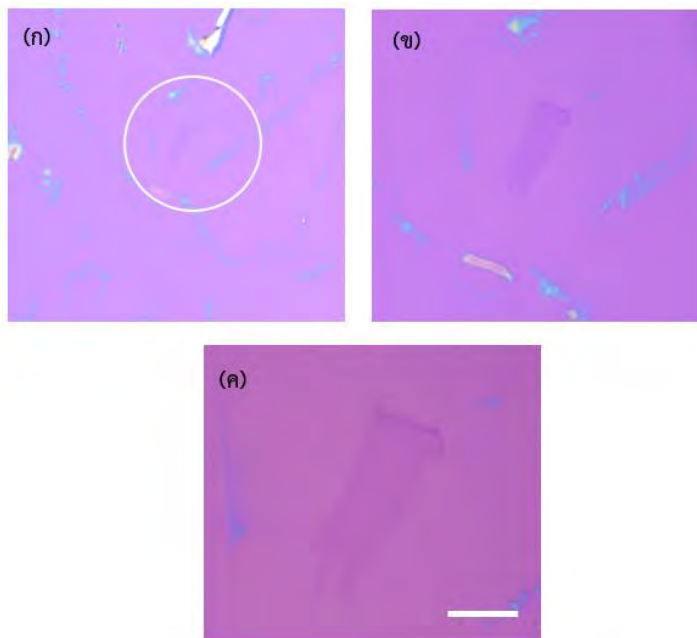
รูปที่ 4.28 แสดงผลของโครงสร้างเฮเทอโรแบบ  $\text{MoS}_2/\text{hBN/Graphene}$  (ก) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on Si/  $\text{SiO}_2$  (ข) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2$  on PDMS จากเทคนิคการถ่ายโอนแบบเปียก (ค) แสดงภาพ  $\text{MoS}_2/\text{hBN/Graphene}$  สเกลบาร์ 10 ไมครอน

### 4.3 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นของวัสดุสองมิติ

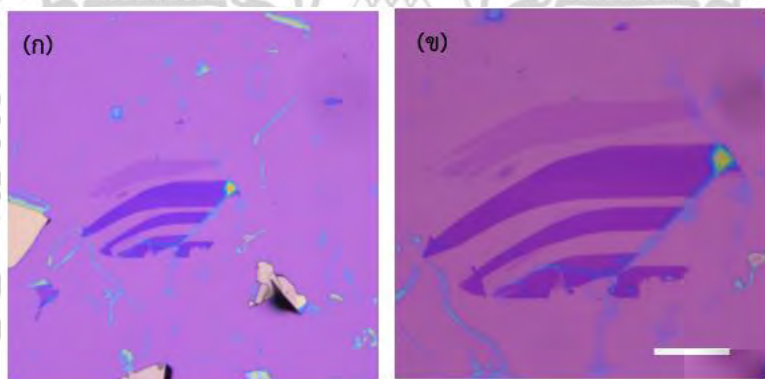
#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นกราฟีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy)

ในงานวิจัยนี้ตรวจสอบจำนวนชั้นของกราฟีนและ hBN จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ความละเอียดสูง กราฟีนชั้นเดียวมีความโปร่งแสงเมื่อปรับกำลังขยายมากขึ้นจะเห็นได้อย่างชัดเจน แสดงดังรูป 4.29 (ก-ค) กำลังขยาย 20, 50 และ 100 เท่า ตามลำดับ กราฟีนสองชั้นจะมีความทึบแสงมากกว่ากราฟีนชั้นเดียวจึงทำให้สามารถมองเห็นกราฟีนบนวัสดุฐานรองได้ดีกว่าและกราฟีนที่มีความหนาหลายชั้นหรือ กราไฟท์จะมีความทึบแสงสูงสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากกล้องจุลทรรศน์ แสดงดังรูป 4.30 (ก-ข) กำลังขยาย 20 และ 100 เท่า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



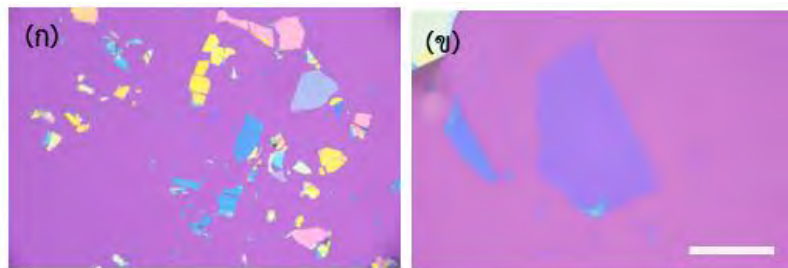
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนชั้นเดียว (ก) กำลังขยาย 20 เท่า (ข) กำลังขยาย 50 เท่า (ค) กำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของกราฟีนสองชั้นเดียว (ก) กำลังขยาย 20 เท่า (ข) กำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน

สำหรับการวิเคราะห์ผลึก hBN ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง hBN เป็นวัสดุที่มีหลากหลายสีเนื่องจากซ้อนทับกันหลายชั้น แสดงดังรูป 4.31 (ก) โดยผลึกที่จะนำมาสร้างโครงสร้างเฮเทอโรนั้นจะมีความหนาไม่เกิน 30 ไมครอน hBN ที่มีความหนาไม่เกิน 10 ไมครอน จะมีสีฟ้าอ่อน แสดงดังรูป 4.31 (ข) ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปสร้างโครงสร้างเฮเทอโร จากการอ้างอิงผลของ AFM

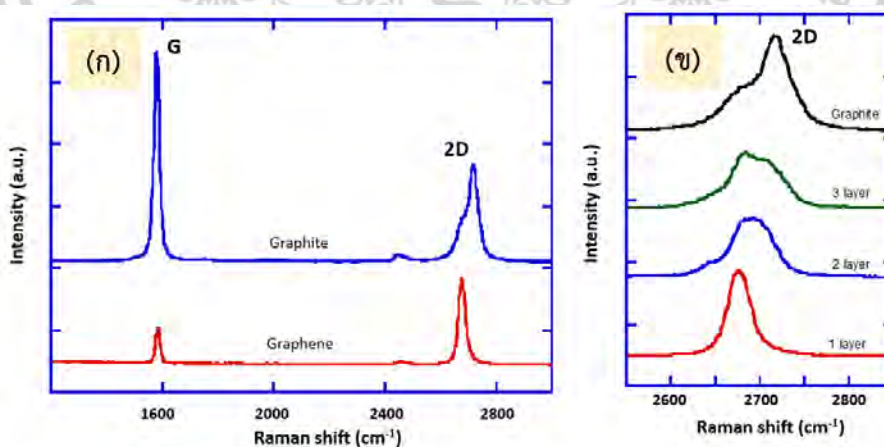
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของ hBN (ก) ผลึก hBN หลายชั้น (ข) ผลึก hBN ความหนาไม่เกิน 10 ไมครอน กำลังขยาย 100 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมครอน

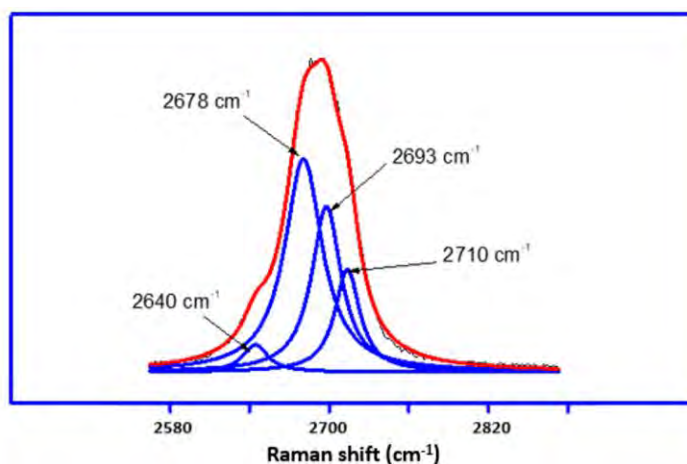
#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นกราฟีนจากรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy)

จากการวิเคราะห์ คาร์บอนสเปกตรัมของกราฟีนชั้นเดียว จะปรากฏ Raman shift ที่ตำแหน่ง G และ 2D ซึ่งอัตราส่วนความเข้มของตำแหน่ง 2D กับ G นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าสองเท่า ( $2D/G > 2$ ) ที่ตำแหน่ง G และ 2D จะปรากฏตำแหน่ง Raman shift ที่  $1590$  และ  $2700$   $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งคาร์บอนสเปกตรัมอาจมีแถบอื่นๆเพิ่ม ขึ้นมาเนื่องจากความไม่สมบูรณ์หรือจุดบกพร่องของผลึกกราฟีน แสดงกราฟ 4.32 (ก) ที่ Raman shift ตำแหน่งของ G พิกัด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแต่มีการเปลี่ยนแปลง ความสูงของพิกัด เมื่อ G พิกัด สูงกว่า 2D พิกัด มากๆจะเป็นกราฟไฟท์และตำแหน่ง Raman shift ของ 2D พิกัด เมื่อความกว้างของพิกัดเพิ่มขึ้นแสดงถึงจำนวนที่เพิ่มมากขึ้น แสดงดังกราฟ 4.32 (ข)



รูปที่ 4.32 กราฟจากรามานสเปกโตรสโกปี (ก) แสดงตำแหน่งพิกัด G และ 2D ของ กราไฟท์และกราฟีน (ข) แสดงความกว้างของพิกัด 2D ของ กราไฟท์ และกราฟีนที่มีความหนา 1, 2 และ 3 ชั้น

จากตำแหน่งของ 2D พีคสามารถแยกความสัมพันธ์ของกราฟแบบ Lorentzian 4 กราฟ แสดงดังกราฟที่ 4.33 ซึ่งสามารถระบุจำนวนชั้นของกราฟีนสองชั้น (bilayer graphene) อธิบายได้ด้วย กระบวนการ Double Resonance process ที่เกิดขึ้น 4 กระบวนการ ซึ่งจะเห็นได้ว่า จุดสูงสุดของกราฟ จะอยู่ที่ตำแหน่งที่ความยาวคลื่น หรือ Raman shift ที่ 2640 2670 2690 และ 2710  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น ตำแหน่ง Raman shift ของกราฟีนสองชั้น

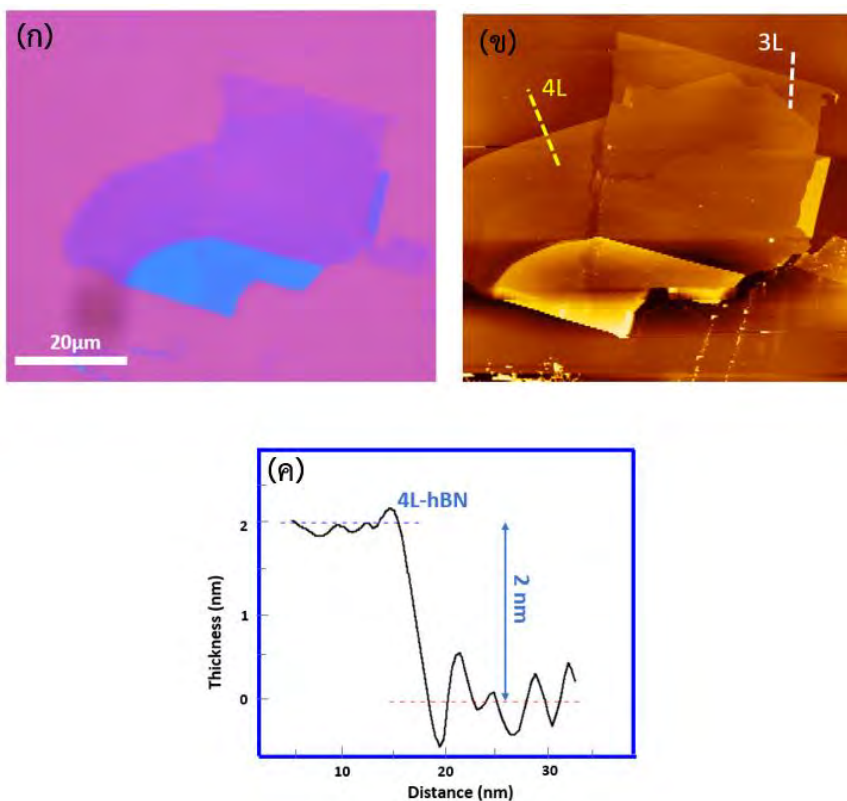


รูปที่ 4.33 แสดงกราฟรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) กราฟชนิด Lorentzian 4 กราฟ

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์จำนวนชั้น hBN และ ฟอสฟอรัสดำ จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy)

##### 4.3.3.1 ผลการวิเคราะห์ hBN

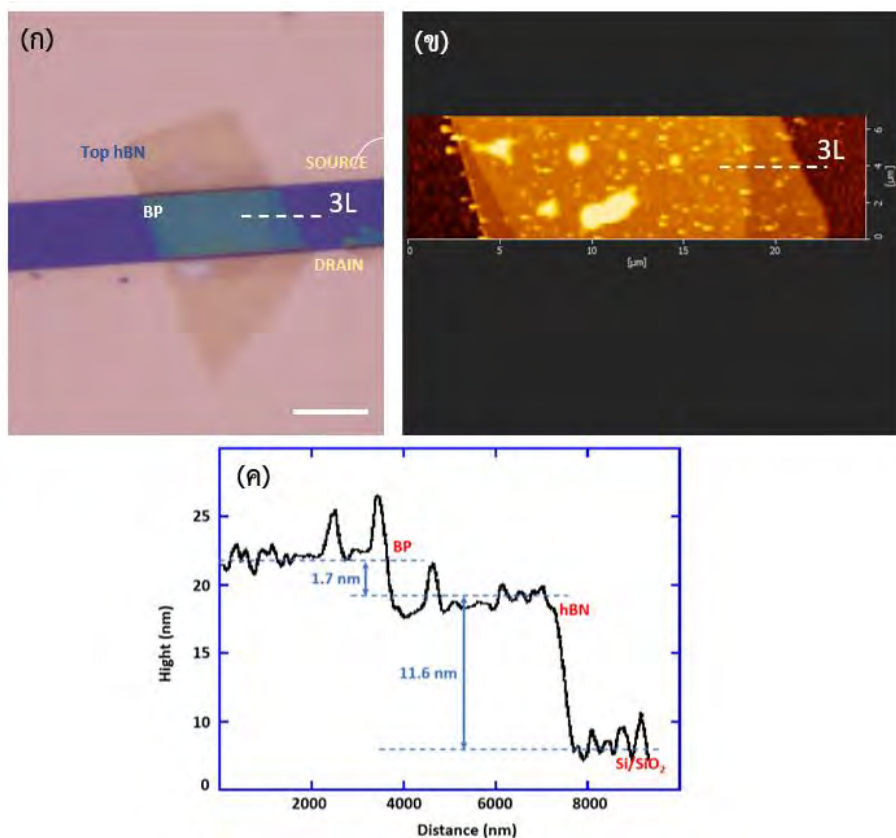
จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จาก AFM ของ hBN พบว่า hBN ที่ได้จากเทคนิคการลอกเชิงกลมีความหนา 2 นาโนเมตร ซึ่งสามารถระบุ hBN บริเวณที่วัด มีความหนา 4 ชั้น โดยทั่วไปที่ความหนาหนึ่งชั้นคือ 0.4–0.5 นาโนเมตรและสองชั้น และ สามชั้น ของ hBN คือ 0.7–0.9 นาโนเมตรและ 1.1–1.3 นาโนเมตรตามลำดับ แสดงดังรูป 4.34 (ก, ข และ ค) ค่าความสูงเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกราฟีนเนื่องจาก ระยะห่างระหว่างชั้นของ hBN และกราฟีนมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.34 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัลของ 3-4 ชั้น (ก) hBN บนพื้นผิว Si/SiO<sub>2</sub> (ข) ภาพถ่าย hBN จาก AFM และ (ค) กราฟแสดงความสูงจาก AFM ของ hBN 3 ชั้น

#### 4.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ของฟอสฟอรัสดำ

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จาก AFM ของ BP พบว่า BP เมื่อใช้โครงสร้างเฮเทอโร hBN/BP/contact มาวิเคราะห์จำนวนชั้น แสดงดังรูป 4.35 (ก) โดยทั่วไป BP ชั้นเดียวมีความหนาประมาณ 0.8 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ผล BP มีความหนาประมาณสามชั้น ซึ่งวัดจาก hBN ถึง BP โดยที่ความหนา BP มีค่าประมาณ 1.7 นาโนเมตรและความหนา hBN ด้านบนมีความหนาประมาณ 11.5 นาโนเมตร แสดงดังรูป 4.35 (ข-ค)



รูปที่ 4.35 (ก) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัลของ hBN/BP/contact สเกลบาร์ 10 ไมครอน (ข) ภาพถ่าย hBN-BP จาก AFM และ (ค) กราฟแสดงความสูงจาก AFM ของ hBN 3 ชั้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับใช้ในการย้ายและการวางซ้อนทับกันของวัสดุสองมิติ (transfer system) ที่สามารถใช้งานได้หลากหลายซึ่งและเป็นระบบที่ใช้ต้นทุนต่ำ มีลักษณะเป็น all-in-one เมื่อเทียบกับระบบของรายงานที่ผ่านมา ชุดอุปกรณ์ของเรามีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาได้ง่าย และสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วและชุดอุปกรณ์ของระบบการถ่ายโอนได้รับการทดสอบด้วยการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรที่หลายหลายโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนที่แตกต่างกัน 3 แบบ วิธีการถ่ายโอนแบบแห้ง (dry method) วิธีการถ่ายโอนแบบเปียก (wetting method) และวิธีการรวมกันของทั้งการถ่ายโอนแบบแห้งและการถ่ายโอนแบบเปียกเข้าด้วยกันซึ่งยังไม่พบในงานวิจัยก่อนหน้านี้

วิธีการถ่ายโอนแบบแห้งเป็นวิธีที่ประสบผลสำเร็จ 100 % สำหรับกราฟีนและฟอสฟอรัสดำ โครงสร้างเฮเทอโรของวิธีการถ่ายโอนแบบแห้ง มี 4 แบบ คือ hBN/graphene/hBN, hBN/MoS<sub>2</sub>/hBN, hBN/BP/hBN และ hBN/BP/contact แต่วิธีนี้สำหรับ MoS<sub>2</sub> ยังไม่ประสบผลสำเร็จ 100% เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง MoS<sub>2</sub> กับวัสดุฐานรองมีความหนาแน่นสูง ในทางตรงกันข้ามสำหรับวิธีการถ่ายโอนแบบเปียกจะสร้างสภาวะที่เอื้อต่อการถ่ายโอนซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการลดแรงยึดเหนี่ยวที่หนาแน่นของ MoS<sub>2</sub> กับวัสดุฐานรองอย่างเห็นได้ชัด และด้วยวิธีการถ่ายโอนแบบเปียกนี้เราได้สร้างโครงสร้างเฮเทอโร 4 แบบ Graphene/hBN และ MoS<sub>2</sub>/hBN และแสดงให้เห็นถึงการสร้างโครงสร้างเฮเทอโร MoS<sub>2</sub> ที่บิดมุม (twisted MoS<sub>2</sub>) บนวัสดุฐานรอง (Si/SiO<sub>2</sub>) และ บน hBN ที่มีมุมบิดที่แตกต่างกันได้สำเร็จและวิธีการรวมกันของทั้งการถ่ายโอนแบบแห้งและการถ่ายโอนแบบเปียกเข้าด้วยกันเราได้สร้างโครงสร้างเฮเทอโรแบบ MoS<sub>2</sub>-hBN-graphene

จุดเด่นที่สำคัญของงานวิจัยนี้คือการออกแบบและการสร้าง glovebox ที่เรียบง่ายและสามารถทำได้ด้วยตนเอง (DIY) ที่มีราคาต้นทุนต่ำและที่สำคัญ glovebox สามารถใช้งานได้จริงเมื่อมีการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรของวัสดุที่ไม่เสถียรทางอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพดังกล่าวด้วยการสร้างโครงสร้างเฮเทอโรแบบ hBN/BP/hBN อีกทั้งยังนำ BP ที่ลอกได้ไปวางบนขั้วไฟฟ้าเพื่อสร้างเป็น electrical device และใช้ hBN วางทับด้านบนอีกทีเพื่อป้องกันไม่ให้ BP เกิดการออกซิไดซ์ เนื่องจากชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ต้นทุนรวมทั้งสิ้น 1,000 ดอลลาร์ งานวิจัยนี้คาดว่าจะช่วยผลักดันให้งานวิจัยทางด้านวัสดุสองมิติและโครงสร้างเฮเทอโรก้าวหน้าขึ้นไปอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นประโยชน์กับนักวิจัยทั้งหลายที่สนใจและเริ่มทำวิจัยในสาขานี้และต้องใช้ทุนวิจัยที่สูงมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเมื่อตรวจสอบโครงสร้างเฮทเทอโรภายใต้กล้องจุลทรรศน์ความละเอียดต่ำการตรวจสอบทำได้ยากเนื่องจากกล้องมีคุณภาพที่ไม่สูงมากนักจึงขอเสนอการเพิ่มคุณภาพของกล้องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab and K. Kim, A roadmap for graphene, *Nature* 490, 192–200 (2012)
- [2] C. R. Dean, A. F. Young, I. Meric, C. Lee, L. Wang, S. Sorgenfrei, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Kim, K. L. Shepard and J. Hone, Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics, *Nat. Nanotechnol* 5, 722–726 (2010)
- [3] A. S. Mayorov, R. V. Gorbachev, S. V. Morozov, L. Britnell, R. Jalil, L. A. Ponomarenko, P. Blake, K. S. Novoselov, K. Watanabe, T. Taniguchi and A. K. Geim, Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature, *Nano Lett.* 11, 2396-2399 (2011)
- [4] B. Wenzhong, Jairo Velasco Jr., Z. Fan, J. Lei, S. Brian, S. Dmitry, B. Marc, Allan H. MacDonald and N. L. Chun, Evidence for a spontaneous gapped state in ultraclean bilayer graphene, *PNAS* 109 (27) 10802-10805 (2012)
- [5] K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho and A. H. Castro Neto, 2D materials and van der Waals heterostructures, *Science* 353 298 (2016)
- [6] A. K. Geim and K. S. Novoselov, The rise of graphene, *Nature Materials* 6, 183–191 (2007)
- [7] A. K. Geim and I. V. Grigorieva, Van der Waals heterostructures, *Nature* 499, 419–425 (2013)
- [8] JiPing Zhu, GuangShun Xiao and XiuXiu Zuo, Two-Dimensional Black Phosphorus: An Emerging Anode Material for Lithium-Ion Batteries, *Nano-Micro Lett* 12, 120 (2020)
- [9] Hui Fang, Corsin Battaglia, Carlo Carraro, Slavomir Nemsak, Burak Ozdol, Jeong Seuk Kang, Hans A. Bechtel, Sujay B. Desai, Florian Kronast, Ahmet A. Unal, Giuseppina Conti, Catherine Conlon, Gunnar K. Palsson, Michael C. Martin, Andrew M. Minor, Charles S. Fadley, Eli Yablonovitch, Roya Maboudian, and Ali Javey, Strong interlayer coupling in van der Waals heterostructures built from single-layer chalcogenides, *PNAS* 111 (17) 6198-6202 (2014)
- [10] Mikhail I. Katsnelson, Graphene: carbon in two dimensions, 10, 1–2 20-27 (2007)
- [11] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, The electronic properties of graphene, *Rev. Mod. Phys.* 81, 109 (2009)
- [12] C. N. R. Rao and Ajay K. Sood, Graphene: Synthesis, Properties, and Phenomena,

ISBN: 978-3-527-33258-8 438 (2013)

[13] A. Aqel, K.A. El-Nour, R. Al-Warthan, Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterization, Arabian Journal of Chemistry 5, 1 1-23 (2012)

[14] G. Yang, L. Li, W. B. Lee and Man Cheung Ng, Structure of graphene and its disorders: a review, Science and Technology of Advanced Materials 19, 1 (2018)

[15] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar and J. Hone, Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, SCIENCE 321, 5887 385-388 (2008)

[16] J. Zhao, G.Y. Zhang, and D.X. Shi, Review of graphene-based strain sensors, Chin. Phys. B 22, 5 057701 (2013)

[17] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim, The electronic properties of graphene, Rev.Mod.Phys 81 109-162 (2009)

[18] M. Orlita, C. Faugeras, P. Plochocka, P. Neugebauer, G. Martinez, D. K. Maude, A.-L. Barra, M. Sprinkle, C. Berger, W. A. de Heer, and M. Potemski, Approaching the Dirac Point in High-Mobility Multilayer Epitaxial Graphene, Phys. Rev. Lett. 101, 267601 (2008)

[19] D. Zhan, J. Yan, L. Lai, Z. Ni, L. Liu and Z. Shen, Engineering the electronic structure of graphene, Adv Mater 24 (30) 4055-69 (2012)

[20] L. A. Falkovsky, Optical properties of graphene, J. Phys.: Conf. Ser. 129 012004 (2008)

[21] E. Pop, V. Varshney, and A. K. Roy, Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications, MRS Bull. 37, 1273 (2012)

[22] Y. W. Sun, D. G. Papageorgiou, C. J. Humphreys, D. J. Dunstan, P. Puech, J. E. Proctor, C. Bousige, D. Machon, and A. San-Miguel, Mechanical properties of graphene, Applied Physics Reviews 8, 021310 (2021)

[23] A. Kumar, G. Malik, R. Chandra, S. R. Mulik, Bluish emission of economical phosphor hBN nanoparticle fabricated via mixing annealing route using non-toxic precursor, Journal of Solid State Chemistry 288, 121430 (2020)

[24] V. K. Sangwan and M. C. Hersam, Electronic Transport in Two-Dimensional Materials, Annual Review of Physical Chemistry 69, 299-325 (2018)

[25] M. Örnek, C. Hwang, S. Xiang, Y. K. Xie, A. Etzold, B. Yang and R. A. Haber, Effect of synthesis conditions of BCNO on the formation and structural ordering of boron nitride at high temperatures, Journal of Solid State Chemistry 269, 212-219 (2019)

- [26] B. Arnaud, S. Lebègue, P. Rabiller, and M. Alouani, Huge Excitonic Effects in Layered Hexagonal Boron Nitride, *Phys. Rev. Lett.* 96, 026402 (2006)
- [27] M. Pan, L. Liang, W. Lin, S. M. Kim, Q. Li, J. Kong, M. S Dresselhaus and V. Meunier, Modification of the electronic properties of hexagonal boron-nitride in BN/graphene vertical heterostructures, *2D Mater.* 3 045002 (2016)
- [28] M. L. Hu, J. L. Yin, C. X. Zhang, Zhizhou Yu, and L. Z. Sun, Electronic structures and optical properties of hexagonal boron nitride under hydrostatic pressures, *Journal of Applied Physics* 109, 073708 (2011)
- [29] A. M. Satawara, G. A. Shaikh, S. K. Gupta, P. N. Gajjar, Structural, electronic and optical properties of hexagonal boron-nitride (hBN) monolayer: An Ab-initio study, *Materialstoday* 47, 2 529-532 (2021)
- [30] R. B. Abedi and J. Homayoun, DFT study on electronic and optical properties of halogen-adsorbed hexagonal boron nitride, *Computational Condensed Matter* 21, e00416 (2019)
- [31] A. Falin, Q. Cai, Elton J.G. Santos, D. Scullion, D. Qian, R. Zhang, Z. Yang, S. Huang, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. R. Barnett, Y. Chen, R. S. Ruoff and L. H. Li, Mechanical properties of atomically thin boron nitride and the role of interlayer interactions, *Nature Communications* 8, 15815 (2017)
- [32] Y. Ding, Y. Wang, J. Ni, L. Shi, S. Shi, W. Tang, First principles study of structural, vibrational and electronic properties of graphene-like MX<sub>2</sub> (M=Mo, Nb, W, Ta; X=S, Se, Te) monolayers, *Phys. B: Condens. Matter* 406 11, 2254-2260 (2015)
- [33] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti and A. Kis, Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors, *Nature Nanotechnology* 6, 147–150 (2011)
- [34] K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and T.F. Heinz, Atomically Thin MoS<sub>2</sub>: A New Direct-Gap Semiconductor *Phys. Rev. Lett.* 105, 136805 (2010)
- [35] M. V. Bollinger, K. W. Jacobsen, and J. K. Norskov, Atomic and electronic structure of MoS<sub>2</sub> nanoparticles, *PhysRevB* 67, 085410 (2003)
- [36] E. S.Kadantsevab and PawelHawrylak, Electronic structure of a single MoS<sub>2</sub> monolayer, *Solid State Communications* 152 10, 909-913 (2012)

- [37] O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic and A. Kis, Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS<sub>2</sub>, *Nature Nanotechnology* 8, 497–501 (2013)
- [38] C. Donnet, J.M. Martin, Th. Le Mogne and M. Belin, Super-low friction of MoS<sub>2</sub> coatings in various environments, *Tribology International* 29, 2 123-128 (1996)
- [39] A. Castellanos-Gomez, M. Poot, G. A. Steele, Herre S. J. van der Zant, N. Agrait and G. Rubio-Bollinger, Elastic properties of freely suspended MoS<sub>2</sub> nanosheets, *Advanced Materials* 24, 6 772-775 (2012)
- [40] R. Gusmão, Z. Sofer and M. Pumera, Black Phosphorus Rediscovered: From Bulk Material to Monolayers, *Angewandte Chemie - International Edition* 56, 28 8052-8072 (2017)
- [41] H.i Du, X. Lin, Z. Xu and D. Chu, Recent developments in black phosphorus transistors, *J. Mater. Chem. C* 3, 8760-8775 (2015)
- [42] J. Qiao, X. Kong, Z. X. Hu, F. Yang and W. Ji, High-mobility transport anisotropy and linear dichroism in few-layer black phosphorus, *Nature Communications* 5, 4475 (2014)
- [43] V. Tran, R. Soklaski, Y. Liang, and L. Yang, Layer-controlled band gap and anisotropic excitons in few-layer black phosphorus, *Phys. Rev. B* 89, 235319 (2014)
- [44] L. Li, Y. Yu, G. J. Ye, Q. Ge, X. Ou, H. Wu, D. Feng, X. Hui Chen and Y. Zhang, Black phosphorus field-effect transistors, *Nature Nanotechnology* 9, 372–377 (2014)
- [45] Y. Takao, H. Asahina, and A. Morita, Electronic Structure of Black Phosphorus in Tight Binding Approach, *J. Phys. Soc. Jpn.* 50, 3362-3369 (1981)
- [46] M. Baba, F. Izumida, Y. Takeda, K. Shibata, A. Morita, Y. Koike, and T. Fukase, Two-Dimensional Anderson Localization in Black Phosphorus Crystals Prepared by Bismuth-Flux Method, *J. Phys. Soc. Jpn.* 60, 3777-3783 (1991)
- [47] M. Baba, Y. Nakamura, Y. Takeda, K. Shibata, A. Morita, Y. Koike and T. Fukase, Hall effect and two-dimensional electron gas in black phosphorus, *J. Phys.: Condens. Matter* 4, 1535 (1992)
- [48] X. Wang and S. Lan, Optical properties of black phosphorus, *Adv. Opt. Photonics*, 8 ,618-655 (2016)

- [49] J. W. Jiang, T. Rabczuk and H. S. Park, A Stillinger–Weber potential for single-layered black phosphorus, and the importance of cross-pucker interactions for a negative Poisson's ratio and edge stress-induced bending, *Nanoscale* 7, 14 6059-6068 (2015)
- [50] F. Liu, Mechanical exfoliation of large area 2D materials from vdW crystals, *Prog. Surf. Sci.* 6, 100626 2021
- [51] Z. Zhang, P. Chen, X. Duan, K. Zang, J. Luo and X. Duan, Robust epitaxial growth of two-dimensional heterostructures, multiheterostructures, and superlattices, *Science* 357, 788–792 (2017)
- [52] J. Yu, J. Li, W. Zhang and H. Chang, Synthesis of high quality two-dimensional materials via chemical vapor deposition, *Chem. Sci.* 6, 6705-6716 (2015)
- [53] X. Cao, C. Jiang, D. Tan, Q. Li, S. Bi and J. Song, Recent mechanical processing techniques of two-dimensional layered materials: A review, *J. Sci.: Adv. Mater. Devices* 6, 2 135-152 (2021)
- [54] L. Wang, I. Meric, P. Y. Huang, Q. Gao, Y. Gao, H. Tran, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. M. Campos, D. A. Muller, J. Guo, P. Kim, J. Hone, K. L. Shepard and C. R. Dean, One-Dimensional Electrical Contact to a Two-Dimensional Material, *Science* 342, 614-617 (2013)
- [55] P. Lemmer, M. Gunkel, D. Baddeley, R. Kaufmann, A. Urich, Y. Weiland, J. Reymann, P. Müller, M. Hausmann and C. Cremer, "SPDM: light microscopy with single-molecule resolution at the nanoscale". *Appl. Phys. B.* 93 1, 1–12. (2008)
- [56] Z. Li, M. J. Deen, S. Kumar and P. R. Selvaganapathy, Raman Spectroscopy for In-Line Water Quality Monitoring — Instrumentation and Potential, *Sensors* 14, 17275-17303
- [57] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, Atomic Force Microscope, *Phys. Rev. Lett.* 56, 930 (1986)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวกนกวรรณ บัวปั้น
วัน/เดือน/ปีเกิด	1/กันยายน/2540
ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน	8 หมู่ 3 ตำบลบางเตย อำเภอบ้านสร้าง จังหวัดปราจีนบุรี 25150
ประวัติการศึกษา	2015-2019 ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2019-2021 ระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย
ผลงานทางวิชาการ	<b>K. Buapan</b> , H. Ramamoorthy and R. Somphonsane Transfer and Stacking of 2D van der Waals Heterostructures for Electronic Device Applications. The 5 <sup>th</sup> International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020), Pattaya, Thailand (Poster presentation)
ผลงานการตีพิมพ์	1) <b>K. Buapan</b> , R. Somphonsane, T. Chiawchan and H. Ramamoorthy, Versatile, Low-Cost, and Portable 2D Material Transfer Setup with a Facile and Highly Efficient DIY Inert-Atmosphere Glove Compartment Option, ACS Omega 6, 28, 17952–17964 (2021) 2) H. Ramamoorthy, <b>K. Buapan</b> , T. Chiawchan, K. Thamkrongart and R. Somphonsane, Exploration of the temperature-dependent correlations present in the structural, morphological and electrical properties of thermally reduced free-standing graphene oxide papers, Journal of Materials Science 56, 15134–15150 (2021) 3) T. Chiawchan, H. Ramamoorthy, <b>K. Buapan</b> and R. Somphonsane CVD Synthesis of Intermediate State-Free, Large-Area and Continuous MoS <sub>2</sub> via Single-Step Vapor-Phase Sulfurization of MoO <sub>2</sub> Precursor, Nanomaterials 11(10), 2642 (2021)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้