

การสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดี่ยวด้วยวิธีการสะสมไอเชิงเคมี  
SYNTHESIS OF MONOLAYER MoS<sub>2</sub> BY CHEMICAL VAPOR  
DEPOSITION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2564

KMITL-2021-SC-M-030-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF MONOLAYER MoS<sub>2</sub> BY CHEMICAL VAPOR  
DEPOSITION



TINNA CHIAWCHAN

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-030-057

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	การสังเคราะห์ MoS <sub>2</sub> ชั้นเดียวด้วยวิธีการสะสมไอเชิงเคมี
ชื่อนักศึกษา	ติณณา เชี่ยวชาญ
รหัสประจำตัว	62605032
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. รัชนก สมพรเสนห์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฮาริฮารา รามามูร์ตี

### บทคัดย่อ

เนื่องจากโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO<sub>3</sub>) ที่ใช้กันทั่วไปสำหรับเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS<sub>2</sub>) ด้วยวิธีการสะสมไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition หรือ CVD) นั้น มีอุณหภูมิการระเหยต่ำและเป็นสารก่อกัมเร่ง ทำให้ MoO<sub>3</sub> ไม่ใช่สารตั้งต้นที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ในการสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> ทั้งในแง่ของความปลอดภัยและในแง่ของการปฏิบัติที่ยากต่อการควบคุม นอกจากนี้ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้หลายงานได้มีการรายงานว่าการสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> โดยใช้ MoO<sub>3</sub> เป็นสารตั้งต้นนั้น มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องของหลายปฏิกิริยา และปฏิกิริยาเหล่านั้นได้ก่อให้เกิดโมลิบดีนัมออกซีซัลไฟด์ (MoS<sub>2-y</sub>O<sub>y</sub>) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ผสมมากับผลึก MoS<sub>2</sub> ในปริมาณที่ไม่สามารถควบคุมได้ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สารตั้งต้นโมลิบดีนัมไดออกไซด์ (MoO<sub>2</sub>) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าและปลอดภัยกว่า MoO<sub>3</sub> ในการสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> โดยสามารถสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวที่มีลักษณะเป็นฟิล์มต่อเนื่องและมีขนาดอยู่ในระดับเซนติเมตรได้ และได้ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบและความสม่ำเสมอของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้นี้ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่มีความละเอียดสูงและเทคนิคการสแกนแผนภาพรามานแบบทีละแถว นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของฟิล์มอย่างละเอียด และพบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น 10 เท่า ระยะห่างระหว่างขอบเกรนในผลึก MoS<sub>2</sub> มีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่ากลไกที่ควบคุมการเกิดขึ้นของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลง จากที่ถูกควบคุมด้วยกลไกทางจลศาสตร์ เป็นถูกควบคุมด้วยกลไกทางอุณหพลศาสตร์ และที่สำคัญ จากผลการทดลองที่สังเกตได้จากหลายๆ การทดลองที่ได้ใช้ MoO<sub>2</sub> เป็นสารตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่อยู่ในสถานะไอระเหยและเกิดเป็น MoS<sub>2</sub> โดยได้มีเปลี่ยนตัวแปรต่างๆในการทดลองนั้น พบว่ามีผลิตภัณฑ์ MoS<sub>2-y</sub>O<sub>y</sub> เกิดขึ้นใน

ปริมาณที่น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ MoO<sub>3</sub> เป็นสารตั้งต้น และเมื่อได้ทำการทดลองเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของกำมะถันจนกระทั่งอัตราส่วนของ S:Mo สูงกว่า 3:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาดังกล่าว พบว่าไม่มี  $\text{MoS}_{2-y}\text{O}_y$  เกิดขึ้นเลย

**คำสำคัญ :** วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียว การสะสมไอเชิงเคมี รามาน สารตั้งต้น  $\text{MoO}_2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of Monolayer MoS <sub>2</sub> by Chemical Vapor Deposition
Student Name	Tinna Chiawchan
Student ID	62605032
Degree	Master of science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2564
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ratchanok Somphonsane
Thesis Co-advisor	Asst. Prof. Dr. Harihara Ramamoorthy

### Abstract

The low evaporation temperature and carcinogen classification of commonly used molybdenum trioxide (MoO<sub>3</sub>) precursor render it unsuitable for the safe and practical synthesis of molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) using chemical vapor deposition (CVD). Furthermore, as evidenced by several experimental findings, the associated reaction constitutes a multistep process prone to the formation of uncontrolled amounts of intermediate MoS<sub>2-y</sub>O<sub>y</sub> phase mixed with the MoS<sub>2</sub> crystals. Here, molybdenum dioxide (MoO<sub>2</sub>), a chemically more stable and safer oxide than MoO<sub>3</sub>, was utilized to successfully grow cm-scale continuous films of monolayer MoS<sub>2</sub>. A high-resolution optical image stitching approach and Raman line mapping were used to confirm the composition and homogeneity of the material grown across the substrate. A detailed examination of the surface morphology of the continuous film revealed that, as the gas flow rate increased by an order of magnitude, the grain-boundary separation dramatically reduced, implying a transition from a kinetically to thermodynamically controlled growth. Importantly, the single-step vapor-phase sulfurization (VPS) reaction of MoO<sub>2</sub> was shown to suppress intermediate state formations for a wide range of experimental parameters investigated and is completely absent, provided that the global S: Mo loading ratio is set higher than the stoichiometric ratio of 3:1 required by the VPS reaction.

**Keywords:** 2D materials, monolayer MoS<sub>2</sub>, chemical vapor deposition, Raman, MoO<sub>2</sub> precursors



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากการได้รับอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่  
บริการรองศาสตราจารย์ ดร. รัชชก สมพรเสน่ห์และที่ปรึกษาร่วมผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฮาริฮารา  
รามามูร์ตีที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง  
รวมถึงให้ความรู้ และหาทุนสนับสนุน

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมตยา กิติวรรณ อาจารย์สาขาวิชา  
ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้  
เกียรติมาเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ติณณา เชี่ยวชาญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ฉม
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	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 โลหะทรานซิสชันไดคาลโคจีไนด์ .....	4
2.2 กระบวนการสังเคราะห์ MOS <sub>2</sub> .....	6
2.2.1 การสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-down approaches) .....	6
2.2.1.1 การสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกล (Mechanical exfoliation) .....	6
2.2.1.2 การสังเคราะห์ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมี (Liquid phase exfoliation).....	8
2.2.2 การสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (Bottom-up approaches).....	9
2.2.2.1 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการสะสมไอทางกายภาพ (Physical vapor deposition).....	9
2.2.2.2 การสังเคราะห์ด้วยวิธีการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition) ....	10
2.2.2.3 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition).....	11
2.3 โครงสร้างผลึกของ MOS <sub>2</sub> .....	17
2.4 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ MOS <sub>2</sub> .....	19
2.5 คุณสมบัติทั่วไปของ MOS <sub>2</sub> .....	21
2.5.1 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ .....	21
2.5.2 คุณสมบัติทางแสง .....	22

# สารบัญ

	หน้า
2.6 การนำไปประยุกต์ใช้.....	24
2.7 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะ MoS <sub>2</sub> .....	27
2.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	27
2.7.2 Field emission scanning electron microscope.....	28
2.7.3 Raman Spectroscopy.....	29
2.7.4 Photoluminescence spectroscopy.....	31
2.7.5 Atomic force microscopy.....	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>37</b>
3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	37
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2 วิธีการทดลอง.....	38
3.2.1 การตัดและล้างทำความสะอาด substrate.....	38
3.2.2 การสังเคราะห์ MoS <sub>2</sub> ด้วยเทคนิค CVD.....	38
3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของ MoS <sub>2</sub> .....	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>42</b>
4.1 ผลการทดลอง.....	42
4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูก MoS <sub>2</sub> .....	43
4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กับกำมะถัน.....	45
4.1.3 ผลของปริมาณสารตั้งต้น MoO <sub>3</sub> .....	47
4.1.4 ผลของจากอัตราส่วนของสารตั้งต้น.....	50
4.1.5 ผลของเวลาในการปลูก MoS <sub>2</sub> .....	53
4.1.6 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส.....	55
4.1.7 ผลของการกระจายสารตั้งต้น.....	57
4.2 ข้อมูลการวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของ MoS <sub>2</sub> .....	60
4.2.1 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM).....	60
4.2.2 Raman Spectroscopy.....	63

## สารบัญ

	หน้า
4.2.3 PL Spectroscopy .....	67
4.2.4 Atomic Force Microscopy (AFM).....	68
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>69</b>
เอกสารอ้างอิง .....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังโครงสร้าง 3 มิติของชั้น TMDCs ประเภท $MX_2$ .....	6
รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกลและ $MoS_2$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกล [18].....	7
รูปที่ 2.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ $MoS_2$ ก่อนและหลังการสแกนด้วยเลเซอร์ในบริเวณที่ทำเครื่องหมายสีเหลี่ยมเส้นประสีเหลือง [19].....	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์ $MoS_2$ ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมีและตัวอย่าง $MoS_2$ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมี [20].....	8
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายสังเคราะห์ $MoS_2$ ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและ $MoS_2$ บนพื้นผิว substrate $SiO_2$ [18].....	9
รูปที่ 2.6 กระบวนการสังเคราะห์ $MoS_2$ ด้วยวิธีการสลายตัวด้วยความร้อน [21].....	10
รูปที่ 2.7 ภาพถ่าย $MoS_2$ จำนวน 3 ชั้น (ก) ภาพถ่ายเทคนิค AFM (ข) ภาพถ่ายเทคนิค TEM [21].....	10
รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงการรวมตัวกันของ $MoS_2$ รูปสามเหลี่ยมเป็นฟิล์มต่อเนื่องขนาดใหญ่และภาพขยาย $MoS_2$ ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมี [22].....	11
รูปที่ 2.9 แผนภาพจำลองภายในของเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์ $MoS_2$ [23].....	12
รูปที่ 2.10 แผนภาพจำลองภายในเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์ $MoS_2$ และมุมมองด้านบน substrate [24].....	13
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ $MoS_2$ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD ภายใต้อุณหภูมิแตกต่างกัน [24].....	14
รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มบาง $MoS_2$ ที่สังเคราะห์ด้วย CVD ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน [24].....	14
รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองภายในเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์ $MoS_2$ [26].....	15
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์ม $MoS_2$ ที่บริเวณที่ต่างกันบนพื้นผิว substrate [26].....	15
รูปที่ 2.15 แผนภาพจำลองภายในเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์ $MoS_2$ [26].....	16

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ MoS <sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD (ก) แสดงภาพขยายของพื้นที่บริเวณลูกศรสี (ข) แสดงภาพพื้นที่ของฟิล์มบาง MoS <sub>2</sub> ส่วนมากจะมีจำนวนชั้นมากกว่า 1 ชั้น [26] .....	16
รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกชั้นเดียวของ MoS <sub>2</sub> (ก) มุมมองด้านบน [27] (ข) มุมด้านข้าง [31] .....	18
รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองโครงสร้างประสานกันแบบปริซึมตรีโกณมิติ (2H) และโครงสร้างประสานกันแบบแปดด้าน (1T).....	18
รูปที่ 2.19 แสดงลำดับการซ้อนกันสำหรับโครงสร้างชนิด 2H, 3R และ 1T [28].....	19
รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS <sub>2</sub> ที่มีจำนวนชั้นความหนาจำนวนหลายชั้นและจำนวน 1 ชั้น [31] .....	20
รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS <sub>2</sub> จำนวนหลายชั้นที่ได้จากการคำนวณ(ซ้าย) และความหนาแน่นของสถานะที่คาดการณ์ในวงโคจร(PDOS) บน Mo และ S ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มจำนวนหลายชั้น(ขวา) [30] .....	20
รูปที่ 2.22 คำนวณความหนาแน่นของสถานะที่คาดการณ์ (PDOS) ของ MoS <sub>2</sub> จำนวนหลายชั้นและจำนวน 1 ชั้น แสดงสถานะ Mo(4d) และ S(3p) [30].....	21
รูปที่ 2.23 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะกับอุณหภูมิ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของพาหะภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน [34].....	22
รูปที่ 2.24 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของผลึกจำนวน 1 ชั้นและหลายชั้นของ MoS <sub>2</sub> บนพื้นผิวซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรู (ซ้าย) และแสดงภาพจาก Photoluminescence จากตัวอย่างเดียวกัน (ขวา) [36].....	23
รูปที่ 2.25 (ก) กราฟแสดงค่าการดูดซับแสง (ข) กราฟแสดงค่าความเข้มการเปล่งแสงของ MoS <sub>2</sub> ที่ความหนาแตกต่างกัน [36] .....	23
รูปที่ 2.26 (ก) แสดงภาพจำลองอุปกรณ์ field-effect transistors (ข) ภาพถ่าย FET จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [2].....	24

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.27 (ก) แสดงภาพจำลอง field-effect transistors (FET) ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้โครงสร้างไฮบริดระหว่าง MoS <sub>2</sub> และ ZnO (ข) ภาพถ่าย FET จากกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [37] .....	25
รูปที่ 2.28 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ (ก) MoS <sub>2</sub> จำนวน 1 ชั้น (ข) อุปกรณ์ Phototransistor [38].....	26
รูปที่ 2. 29 แสดงแผนภาพจำลองอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้โครงสร้างไฮบริดมีช่องว่างพลาสมอนบน MoS <sub>2</sub> [39].....	26
รูปที่ 2.30 แผนผังจำลองโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์.....	27
รูปที่ 2.31 แผนภาพจำลองโครงสร้างของ FE-SEM.....	28
รูปที่ 2.32 แผนภาพจำลองระบบของ Raman Spectroscopy.....	29
รูปที่ 2.33 แสดงการกระเจิงของแสงแต่ละรูปแบบ (ก) Rayleigh scattering , (ข) Stokes scattering และ (ค) Anti-Stokes scattering.....	30
รูปที่ 2.34 แสดงโหมดการสั่นใน E <sub>12g</sub> และ A <sub>1g</sub> ของ MoS <sub>2</sub> .....	31
รูปที่ 2.35 แสดงกระบวนการ Photoluminescence ในช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุเคมีคอนดักเตอร์.....	32
รูปที่ 2.36 แสดงช่องว่างแถบพลังงานงานของ MoS <sub>2</sub> ที่ปรากฏสถานะกระตุ้น A และสถานะกระตุ้น B [43].....	32
รูปที่ 2.37 แผนภาพจำลองส่วนประกอบของ AFM.....	33
รูปที่ 2.38 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์ MoS <sub>2</sub> ด้วยเทคนิค CVD และวิวัฒนาการของรูปทรงผลึก MoS <sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไป [45].....	35
รูปที่ 2.39 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงวิวัฒนาการของรูปทรง MoS <sub>2</sub> [45].....	35
รูปที่ 3.1 แสดงภาพการทดลอง (ก) แสดงแบบจำลองภายในท่อเตาเผา CVD (ข) แสดงแบบจำลองรูปแบบของการ ปลูก MoS <sub>2</sub> (ค) CVD Single-zone (ง) ภาพถ่ายแสดงการจัดวางสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดภายในท่อเตาเผา CVD.....	39
รูปที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการทดลอง (ก) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (ข) กราฟแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง.....	40

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 (ก) ตัวอย่างภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะการเกิดของ MoS <sub>2</sub> (ข) ภาพจำลองแสดงการกระจายตัวไล่ระดับความหนาแน่นบนพื้นผิว substrate.....	43
รูปที่ 4.2 (ก) แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะการเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 760, 800 และ 850 °C (ข) ภาพขยายบริเวณวงกลมประ.....	44
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายรูปทรงการเกิดของโดเมน MoS <sub>2</sub> จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่อุณหภูมิ 760, 800 และ 850 °C.....	45
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายแสดงตำแหน่งการวางกัมะถัน 3 ตำแหน่ง.....	46
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายรูปทรงการเกิดของโดเมน MoS <sub>2</sub> จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและสีของกัมะถันตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3.....	46
รูปที่ 4.6 (ก) แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงรูปแบบการเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นเนื่องจากปริมาณสารตั้งต้น MoO <sub>2</sub> 1, 2, 3, 5 และ 10 mg (ข) ภาพขยายบริเวณวงกลมประ.....	48
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายรูปทรงการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ปริมาณสารตั้งต้น MoO <sub>2</sub> 1, 2, 3, 5 และ 10 mg.....	49
รูปที่ 4.8 แสดงภาพจำลองการเกิดของ MoS <sub>2</sub> ที่เริ่มจากขอบ zz-Mo และ zz-S [45].....	51
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายวิวัฒนาการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่าง S:Mo แตกต่างกัน .....	52
รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายการก่อตัวของผลผลิตชั้นกลางเกิดใกล้บริเวณขอบ substrate จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่อัตราส่วน 1:1.....	53
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายวิวัฒนาการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เกิดจากเวลาในการปลูกแตกต่างกัน.....	54
รูปที่ 4.12 (ก) แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงรูปแบบการเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นเนื่องจากอัตราการใช้ของแก๊สแตกต่างกัน (ข) ภาพขยายบริเวณวงกลมประ.....	56
รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายวิวัฒนาการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เกิดอัตราการใช้ของแก๊สในการปลูกที่แตกต่างกัน.....	57
รูปที่ 4.14 แสดงภาพจำลองการกระจายสารตั้งต้น MoO <sub>2</sub> .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงรูปแบบการเกิดเมื่อการกระจายสารตั้งต้น Mo อย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของภาชนะที่อัตราการไหลของแก๊สต่างกัน.....	59
รูปที่ 4.16 ผลกระทบของอัตราการไหลของแก๊สต่อขนาดเฉลี่ยของโดเมน MoS <sub>2</sub> ที่เกิดในโซน D (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบของขนาดโดเมนเฉลี่ยที่โซน C (ฟิล์มต่อเนื่อง) และโซน D (โดเมน) (ข,ค) ภาพถ่าย FESEM แสดงโดเมนเฉลี่ยสำหรับการทดลองอัตราการไหล 10 sccm และ 100 sccm ตามลำดับ ภาพสิ่งที่ใส่เข้าไป (ค) คือภาพขยายของพื้นที่ขนาดเล็กในภาพหลัก.....	61
รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย FESEM แสดงความแปรผันทางสัณฐานวิทยาในฟิล์ม MoS <sub>2</sub> ชั้นเดียวต่อเนื่องที่เกิดจากอัตราการไหลของแก๊สเปลี่ยนจาก (ด้านซ้าย) 10 sccm เป็น (ด้านขวา) 100 sccm (ก,ง) ภาพแสดงการแบ่งโซน C และ D สำหรับอัตราการไหลของแก๊สที่ 10 และ 100 sccm ตามลำดับ (ข,จ) ภาพถ่านที่ตำแหน่งภายในโซน C (ค,ฉ) ภาพกำลังขยายสูงของ (ข,จ).....	62
รูปที่ 4.18 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก) แสดงแผนภาพรามานจากโหมด E <sup>1</sup> <sub>2g</sub> และ A <sub>1g</sub> (ข) รามานสเปกตรัมของโดเมน MoS <sub>2</sub> ที่พบบริเวณโซน D (ค) รามานสเปกตรัมรวมที่ 6 ตำแหน่งจากแผนภาพรามาน.....	63
รูปที่ 4.19 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก,ข) ตำแหน่งแสมกนเส้นที่ 1 และ 2 (ค,ง) แผนภาพสเปกตรัมโหมด E <sup>1</sup> <sub>2g</sub> และ A <sub>1g</sub> ของการแสมกนเส้นที่ 1 และ 2 (จ,ฉ) รามานสเปกตรัม 6 ตำแหน่งที่แสดงในแผนภาพ ตามลำดับ.....	65
รูปที่ 4.20 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก,ง) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ผล (ข,จ) แสดงกราฟการสแกนรามานในช่วง 100-600 cm <sup>-1</sup> (ค,ฉ) แสดงความแตกต่างระหว่างพีค E <sup>1</sup> <sub>2g</sub> และ A <sub>1g</sub> .....	66
รูปที่ 4.21 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ผล (ข) แสดงกราฟการสแกนรามานในช่วง 100-600 cm <sup>-1</sup> .....	67
รูปที่ 4.22 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PL (ก) สเปกตรัมการสแกนบนฟิล์ม MoS <sub>2</sub> (ข) กราฟ PL แสดงสถานะกระตุ้น A และ B ของ MoS <sub>2</sub> ชั้นเดียว.....	67
รูปที่ 4.23 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM (ก) ภาพถ่าย AFM ของโดเมน MoS <sub>2</sub> (ข) ภาพ 3 มิติของโดเมน MoS <sub>2</sub> (ค) ตำแหน่งวัดความหนาของฟิล์ม (ง) กราฟแสดงความหนาของ MoS <sub>2</sub> ที่ได้จากการวิเคราะห์ AFM.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปีที่ผ่านมาวัสดุ 2 มิติจำพวกโลหะทรานซิชันไดคัลโคจีไนด์ (Transition metal dichalcogenides, TMDs หรือ TMDCs) มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ได้หลากหลายด้านได้แก่ ด้านอิเล็กทรอนิกส์, ออปโตอิเล็กทรอนิกส์และรวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชีวภาพได้อีกด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่น่าสนใจเหล่านี้สามารถนำไปใช้พัฒนาได้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คุณภาพสูง ในบรรดาวัสดุ 2 มิติ TMDs วัสดุที่ได้รับความสนใจและมีแนวโน้มที่จะประสบความสำเร็จมากที่สุดนั้นก็คือโมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide,  $\text{MoS}_2$ ) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น โดยมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 1.2-1.9 eV และมีการควบคู่ของสปินและวอลลีย์ที่แข็งแกร่ง (strong spin-valley coupling) [1] ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาในอุปกรณ์ได้หลากหลายเช่นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือเฟต (Field effect transistor, FET) [2], อุปกรณ์ตรวจจับแสง [3], เซลล์แสงอาทิตย์ [4] และเซ็นเซอร์ [5] เป็นต้น จากการที่วัสดุดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานในแอปพลิเคชันได้อย่างมีศักยภาพ จึงมีความต้องการเป็นอย่างมากสำหรับวัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  คุณภาพสูง โดยวิธีการเตรียมด้วยวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) นั้นเป็นที่ยอมรับเนื่องจากสามารถสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่โครงสร้างผลึกสมบูรณ์และคุณภาพสูงนอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ที่จำนวนหนึ่งชั้นและหลายชั้นได้

เมื่อไม่นานมานี้เทคนิค CVD เป็นวิธีการหนึ่งที่มีแนวโน้มที่ดีที่สุดในการผลิตวัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ขึ้นเดี่ยวสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่และคุณภาพสูง โดยมีรายงานก่อนหน้านี้นี้มีการใช้สารตั้งต้นหลายชนิดในการสังเคราะห์เช่น ฟิล์มโมลิบดีนัม, โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (molybdenum trioxide,  $\text{MoO}_3$ ), โมลิบดีนัมเพนตะคลอไรด์ (molybdenum tetrachloride,  $\text{MoCl}_5$ ) เป็นต้น การศึกษาก่อนหน้านี้ได้รายงานถึงบทบาทของพารามิเตอร์ที่สำคัญหลายประการที่กำหนดพฤติกรรมการเติบโตของ  $\text{MoS}_2$  ได้แก่ ปริมาณสารตั้งต้น, อุณหภูมิ, เวลาในการเติบโต, อัตราการไหลของแก๊สและสารส่งเสริมการปลูก (Growth  $\text{MoS}_2$ ) เป็นต้น แล้วเพื่อการปรับปรุงคุณภาพและขนาดของ  $\text{MoS}_2$  นั้นจำเป็นต้องเข้าใจกลไกอย่างเป็นระบบของเกิด  $\text{MoS}_2$  ด้วยเทคนิค CVD ซึ่งเป็นเงื่อนไขเบื้องต้นที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ด้วยเทคนิค CVD การทดลองของเรานั้นเลือกใช้โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (molybdenum dioxide,  $\text{MoO}_2$ ) เป็นสารตั้งต้นเนื่องจากมีรายงานที่น้อยมากเกี่ยวกับการเลือกใช้สารตั้งต้นชนิดนี้ในการสังเคราะห์วัสดุ งานวิจัยนี้อยากจะศึกษาวิวัฒนาการกลไกเกิด  $\text{MoS}_2$  และหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปลูก  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวขนาดใหญ่ และหลีกเลี่ยงการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Intermediate product) เพื่อต้องการยืนยันและตรวจสอบคุณภาพของวัสดุจึงจำเป็นต้องตรวจสอบและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งตัวอย่างจะถูกตรวจสอบลักษณะเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จากนั้นเพื่อยืนยันจำนวนชั้นของ  $\text{MoS}_2$  ตัวอย่างจะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิครามาน สเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) วิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยโฟโตลูมิเนสเซนส์ สเปกโตรมิเตอร์ (Photoluminescence spectrometer, PL) เพื่อยืนยันช่องว่างแถบพลังงานและตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวให้ได้พื้นที่ขนาดใหญ่และคุณภาพสูง
- 2) เพื่อเข้าใจเกี่ยวกับวิวัฒนาการและกลไกการเกิด  $\text{MoS}_2$
- 3) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิด  $\text{MoS}_2$
- 4) เพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถหลีกเลี่ยงการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวด้วยวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีภายใต้การควบคุมพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน จากนั้นจะถูกตรวจสอบคุณลักษณะเชิงโครงสร้าง และสมบัติทางแสงเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลพร้อมทั้งสรุปผลการทดลอง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวให้ได้พื้นที่ขนาดใหญ่และคุณภาพสูงได้สำเร็จ
- 2) ทราบถึงวิวัฒนาการและกลไกการเกิด  $\text{MoS}_2$
- 3) ทราบถึงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปลูก  $\text{MoS}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)											
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24
Literature review												
สังเคราะห์ MoS <sub>2</sub> ด้วยเทคนิค CVD												
วิเคราะห์จำนวนชั้นของวัสดุ 2 มิติ ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy และ PL												
วิเคราะห์พื้นผิวและความหนาของวัสดุด้วย AFM												
จัดเตรียมรายงาน												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โลหะทรานซิชันไดคัลโคจีไนด์ (Transition metal dichalcogenides)

ในปัจจุบันนี้วัสดุ 2 มิติได้กลายเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในการนำมาวิจัยตั้งแต่มีการค้นพบและประสบความสำเร็จในการแยกชั้นของกราฟีน (Graphene) ที่มีความเสถียรด้วยการสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกล (Mechanical exfoliation) จากกราฟีนวัสดุ 3 มิติ ในปี 2004 [6] การค้นพบของกราฟีนวัสดุ 2 มิติ เรียกได้ว่าเป็นความสำเร็จอีกขั้นหนึ่งของวัสดุ 2 มิติ โดยมีวัสดุ 2 มิติ จำนวนมากได้ถูกคาดการณ์ทางทฤษฎีว่ามีความเสถียรขณะที่นักวิจัยก็แสดงให้เห็นมากขึ้น และในอนาคตวัสดุ 2 มิติ จะได้รับความนิยมในงานด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ, อิเล็กทรอนิกส์ และพลังงานมากขึ้น [7]

วัสดุ 2 มิติได้ถูกกล่าวไว้ว่าเป็นวัสดุมีลักษณะเป็นผลึกที่ประกอบด้วยชั้นเพียงชั้นเดียวโดยวัสดุ 3 มิติ นั้นประกอบด้วยชั้นจำนวนมากรวมเข้าด้วยกันระหว่างชั้นจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ยึดกันไว้ด้วยแรงไม่แน่นอน ซึ่งคุณสมบัติที่โดดเด่นนั้นจะพบเมื่อวัสดุ 3 มิตินั้นได้เปลี่ยนเป็นวัสดุ 2 มิติ ก่อนหน้านี้นี้มีการนำกราฟีน 1 ชั้นไปใช้งานพบว่ามีการนำไฟฟ้าสูงมาก  $\sim 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ , การนำความร้อนสูงที่อุณหภูมิห้อง  $3 \times 10^3 \text{ W/mK}$ , ความโปร่งใสของแสงสูง 97.7 % การส่งผ่านแสงที่มองเห็นได้, ความแข็งแรงเชิงกลสูง (Young's moduli)  $\sim 1.1 \text{ TP}$  และมีพื้นผิวจำเพาะสูง  $\sim 2700 \text{ m}^2/\text{g}$  [8, 9] นอกจากนี้คุณสมบัติที่น่าสนใจเหล่านี้กราฟีนยังแสดงปรากฏการณ์ทางกายภาพอีกมากมายโดยที่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) มาบรรจบกันที่จุด K และมีการกระจายตัวเชิงเส้นรอบจุด K ส่งผลให้เกิด "Dirac cone" [10, 11] นอกจากนี้กราฟีนแล้วยังมีวัสดุ 2 มิติประเภทอื่นอีกมากมายที่มีคุณสมบัติโดดเด่น เช่น โบรอนไนไตรด์หกเหลี่ยม (hBN) เป็นวัสดุ 2 มิติที่ได้รับความนิยมนำมาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุ hBN นั้นมีพื้นผิวที่มีลักษณะแบนเป็นพิเศษแล้วยังมีเสถียรภาพทางเคมีที่ดีและวัสดุ hBN ยังมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนที่หลากหลายทำให้มีประโยชน์ในการนำไปใช้งาน [12-14]

โดยทั่วไปวัสดุ 2 มิติสามารถแบ่งประเภทตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า 3 ประเภทได้แก่ ตัวนำไฟฟ้า, สารกึ่งตัวนำและฉนวน ในส่วนของการนำไปใช้งานของวัสดุ 2 มิตินั้นมีการนำไปประยุกต์ใช้ที่น่าสนใจในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความต้องการที่จะลดขนาดอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กที่สุดในอุปกรณ์พกพาขณะที่อุปกรณ์นั้นยังคงประสิทธิภาพที่ดี [15] อย่างไรก็ตามกราฟีนนั้นมีคุณสมบัติที่น่าสนใจแต่ในการนำมาใช้งานในทรานซิสเตอร์นั้นกราฟีนยังมีคุณสมบัติที่ยังไม่เหมาะสมมากนัก

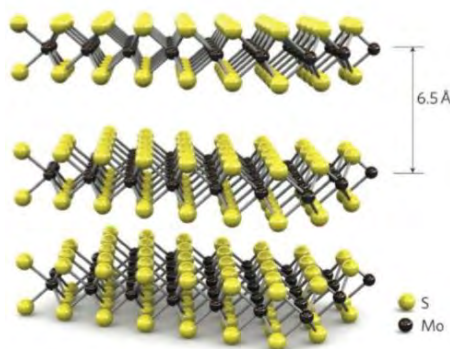
เนื่องจากกราฟีนนั้นไม่มีช่องว่างแถบพลังงานและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกึ่งโลหะโดยให้อัตราส่วนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิด/ปิด ต่ำมาก ~ 5 เป็นค่าต่ำกว่าความต้องการที่จะนำไปใช้งาน จึงไม่สามารถนำไปใช้ในวงจรตรรกะ (Logic circuits) และตัวประมวลผลได้ ดังนั้นวัสดุ 2 มิติที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำจึงมีความน่าสนใจมากกว่าในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากกว่ากราฟีน

วัสดุ 2 มิติที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้งานและนำมาศึกษาวิจัยกันเป็นจำนวนมากได้แก่ วัสดุโลหะทรานซิชันไดแซลโคเจนไนด์ (TMDs หรือ TMDCs) [16] ซึ่งเป็นวัสดุ 2 มิติ และเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท  $MX_2$  โดยที่ M คืออะตอมของโลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น ไทเทเนียม(Ti), โมลิบดีนัม(Mo), ทังสแตน(W) และไนโอเบียม(Nb) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้เป็นโลหะที่มีโครงสร้างที่มีลักษณะหกเหลี่ยมคั่นกลางระหว่างชั้นของ X โดยที่ X คืออะตอมของเซลโคเจน (Chalcogen atom) เช่น ซีลีเนียม(Se), ซัลเฟอร์หรือกำมะถัน(S) และเทลลูไรด์(Te) เป็นต้น ในโครงสร้างแต่ละชั้นมีความหนาอยู่ที่ 6-7 Å ในขณะที่มีพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ที่มีความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมของ M และอะตอมของ X โดยอะตอมของโลหะเซลโคเจนทั้ง 2 ชั้นถูกประกอบเข้ากันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ประกอบเข้ากันอย่างไม่แน่นหนาแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยวัสดุ TMDs ที่รวมกันอยู่เป็นจำนวนมากมีความหนาหลายชั้นสามารถทำให้มีจำนวนชั้นบางลงด้วยวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกล (Exfoliated) ซึ่งวัสดุ TMDs ที่มีการนำมาศึกษามากที่สุดได้แก่  $MoS_2$ ,  $MoSe_2$ ,  $WS_2$  และ  $WSe_2$  วัสดุเหล่านี้ทั่วไปจะมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.2 eV มีการเคลื่อนที่ของพาหะที่วัดได้อยู่ในระดับ  $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิห้อง สามารถเปลี่ยนจากแถบพลังงานทางอ้อม (Indirect bandgap) ไปเป็นแถบพลังงานทางตรง (Direct bandgap) มีช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.9 eV [17] ซึ่งค่าที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นได้มาจากการลดความหนาของชั้นให้เหลือเพียงชั้นเดียวทำให้วัสดุ TMDs เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากที่กล่าวมานั้นในบรรดาวัสดุ 2 มิติ TMDs นั้นเป็นไปได้ว่า  $MoS_2$  มีแนวโน้มที่จะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการนำมาศึกษาเนื่องจากมีความเสถียรทางเคมีที่ดีเยี่ยม, พาหะมีความคล่องตัวสูง และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันมีวิธีการสังเคราะห์  $MoS_2$  ที่หลากหลายวิธีและสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบาง  $MoS_2$  ที่มีขนาดใหญ่ได้สำเร็จ



รูปที่ 2.1 แผนผังโครงสร้าง 3 มิติของชั้น TMDCs ประเภท  $MX_2$

## 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ $MoS_2$

$MoS_2$  ที่อยู่รวมกันเป็นชั้นหนาจำนวนมากเป็นวัสดุ 3 มิตินั้นเป็นสารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานชนิด Indirect bandgap โดยมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.2 eV เมื่อความหนาของจำนวนชั้นลดลงเหลือเพียงชั้นเดียวกลายเป็นวัสดุ 2 มิติช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าประมาณ 1.9 eV จึงทำให้สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานชนิด Indirect bandgap เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานชนิด Direct bandgap ด้วยคุณสมบัตินี้จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบาง  $MoS_2$  นั้นมีวิธีการสังเคราะห์ที่หลากหลาย สามารถแบ่งออกเป็นวิธีหลักทั้งหมด 2 วิธี ได้แก่ การสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-down approaches) และการสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (Bottom-up approaches)

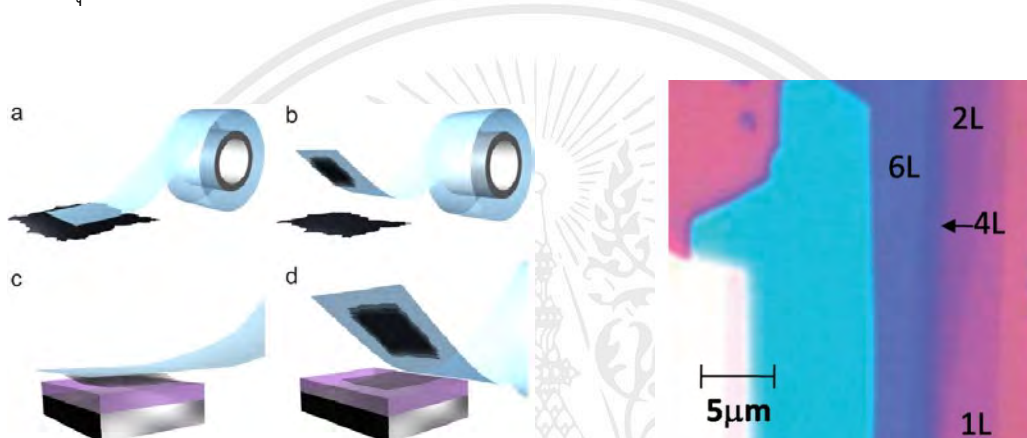
### 2.2.1 การสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-down approaches)

#### 2.2.1.1 การสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกล (Mechanical exfoliation)

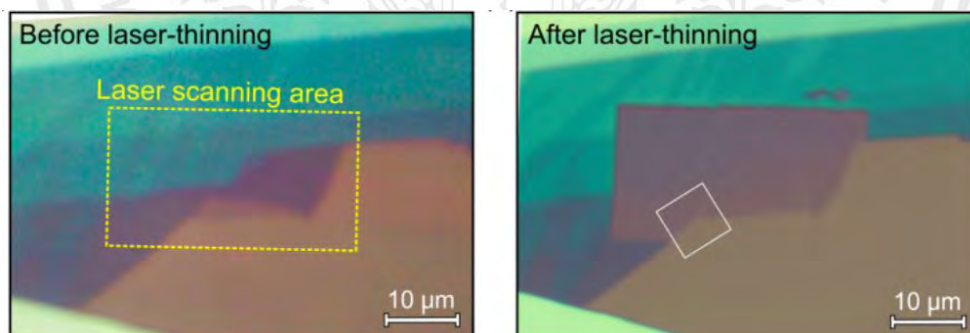
จากงานวิจัยก่อนหน้านี้วิธีการสังเคราะห์ด้วย Mechanical exfoliation เป็นวิธีแรก ที่ประสบความสำเร็จในการแยกชั้นของกราฟีนจากกราไฟต์เพื่อให้ได้วัสดุ 2 มิติที่มีจำนวนชั้นเพียงชั้นเดียวผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธี Top-down approaches และเป็นแนวทางสำหรับผลิตวัสดุ 2 มิติชนิดอื่น เช่นเดียวกันกับวัสดุ  $MoS_2$  นั้นสามารถสร้างเป็นแผ่นฟิล์มบางได้จากผลึกขนาดใหญ่บนพื้นผิววัสดุพิมพ์หรือฐานรอง (Substrate) โดยใช้เทปกาวกดลงบนพื้นผิว substrate เมื่อดึงเทปกาวออก  $MoS_2$  จะติดอยู่บนพื้นผิว substrate มากกว่าบนเทปกาว เนื่องจากแรงยึดของ Van der Waals ไปยัง substrate เมื่อมีการทำซ้ำบนพื้นผิว substrate ทำให้เกิดฟิล์มบางที่มีขนาดรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยมีขนาดตั้งแต่ 10  $\mu m$  ถึง 100  $\mu m$  [18] และมีจำนวนชั้นที่เกิดขึ้นต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.2 วิธีนี้จะทำให้ได้วัสดุ 2 มิติ ที่มีความบริสุทธิ์สูงเหมาะสำหรับนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและสำหรับ

การประดิษฐ์อุปกรณ์เป็นวิธีที่ง่ายมีขั้นตอนไม่ซับซ้อนและประหยัดต้นทุนในการผลิตวัสดุ 2 มิติ วิธีนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อวัตถุประสงค์ในการวิจัยขั้นพื้นฐานแต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถควบคุมขนาดและความหนาของแผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากปัญหาดังกล่าวมีการพยายามที่จะลดความหนาของจำนวนชั้นของฟิล์มและปรับขนาดให้ฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยใช้เลเซอร์เพื่อลดความหนาของชั้น MoS<sub>2</sub> ลงให้เป็น monolayer โดยการระเหยด้วยความร้อนที่ความละเอียดระดับไมโครเมตร แต่ความต้องการในการสแกนด้วยเลเซอร์นั้นยังยากเกินไปสำหรับการเพิ่มขนาดของฟิล์มให้ใหญ่ขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกลยังไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เนื่องจากให้ผลผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการ ในการผลิตด้วยวิธีนี้ยังยากต่อการควบคุมอาจมีการปนเปื้อนและเกิดข้อบกพร่องระหว่างขั้นตอนการผลิต [19]



รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกลและ MoS<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีหลุดออกเชิงกล [18]

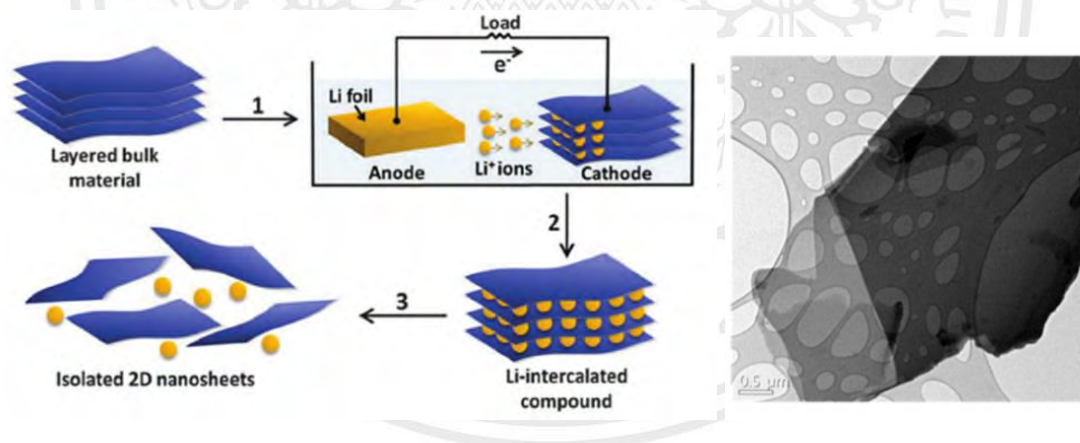


รูปที่ 2.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ MoS<sub>2</sub> ก่อนและหลังการสแกนด้วยเลเซอร์ในบริเวณที่ทำเครื่องหมายสี่เหลี่ยมเส้นประสีเหลือง [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.2 การสังเคราะห์ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมี (Liquid phase exfoliation)

นอกจากการแยกชั้นวัสดุด้วยวิธี Mechanical exfoliation แล้ววิธี Exfoliation สามารถนำวิธีการทางเคมีมาช่วยในการแยกชั้นของวัสดุ 2 มิติ โดยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เอชันททางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical lithiation process) มีขั้นตอนและวิธีการดังนี้ วัสดุ 2 มิติที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มเรียงตัวกันเป็นชั้นจะนำไปวางไว้ในส่วนของเซลล์ทดสอบแคโทดและลิเทียมฟอยด์จะถูกใช้เป็นขั้วแอโนด โดยที่ประจุลิเทียมไอออนถูกแทรกเข้าไปในระยะห่างของชั้นวัสดุ 2 มิติ จำนวนหลายชั้นผ่านกระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้าเคมีทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นถูกขยายเป็นผลให้แรง Van der Waals ที่ยึดเกาะระหว่างชั้นอ่อนตัวลงจากนั้นวัสดุจะถูกทำให้สั่นสะเทือนซึ่งนำไปสู่การแยกชั้นและเกิดแผ่นบางระดับนาโนโดยจะมีรูปร่าง, ขนาด และจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน [20] แสดงดังรูปที่ 2.4 แต่วิธีนี้ส่งผลให้สูญเสียคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากการมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนต่ำและมีคุณภาพที่ค่อนข้างสูงสำหรับผลิตอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการผลิตเนื่องจากขนาดของฟิล์มบางที่ได้นั้นมีขนาดที่เล็กไม่เพียงพอต่อความต้องการทำให้เกิดข้อจำกัดเรื่องการนำไปใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์

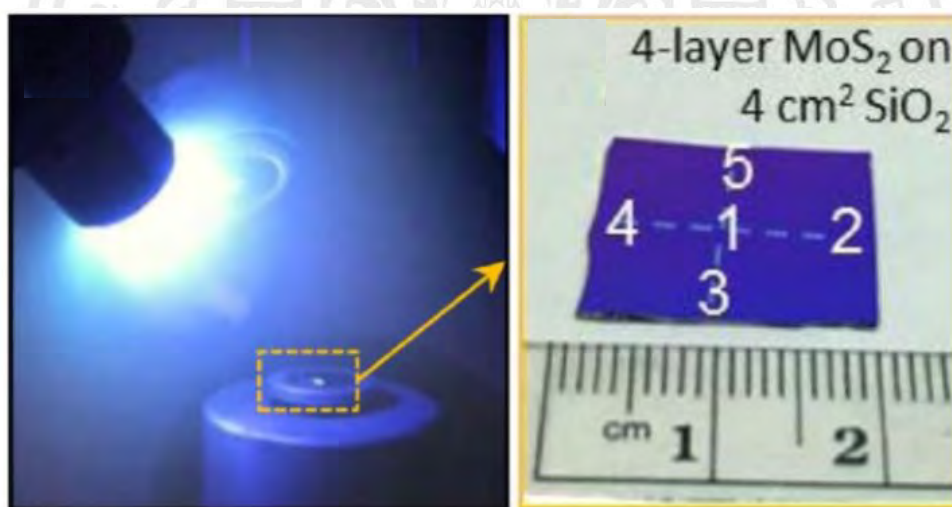


รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมีและตัวอย่าง  $\text{MoS}_2$  ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีแทรกชั้นทางไฟฟ้าเคมี [20]

## 2.2.2 การสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (Bottom-up approaches)

### 2.2.2.1 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการระเหยทางกายภาพ (Physical vapor deposition)

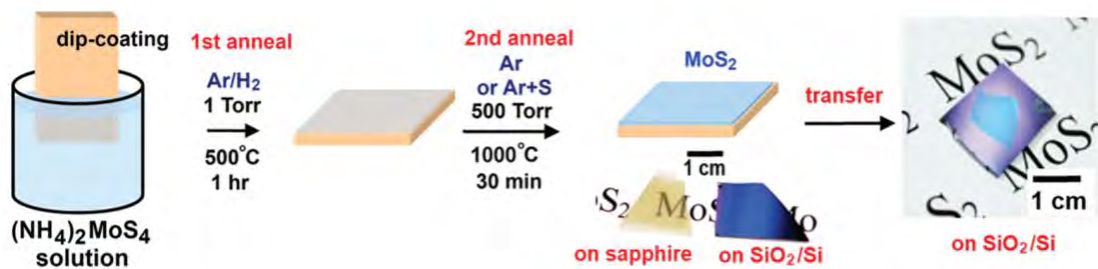
การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Physical vapor deposition (PVD) เป็นวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางที่ใช้กลไกทางกายภาพ โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธี PVD นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ทั้งหมดมีหลักการพื้นฐานเหมือนกันคือใช้พลังงานที่มีความเข้มสูงยิ่งไปยังวัสดุบริสุทธิ์ที่มีสถานะเป็นของแข็งเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพให้วัสดุนั้นระเหยกลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนพื้นผิวในสถานะสุญญากาศหรือในสถานะที่มีแก๊สบริสุทธิ์สูง โดยแรงดันสุญญากาศสูงอยู่ในช่วง  $1 \times 10^{-8}$  Torr หรือน้อยกว่า วิธี PVD ที่ใช้กันโดยทั่วไปในการวิจัยวัสดุสารกึ่งตัวนำมี 2 วิธี ได้แก่ เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron sputtering) และวิธีการระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulsed laser deposition) [18] ปัจจุบันมีการใช้วิธี PVD อย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรมเพราะมีจุดเด่นที่เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิความร้อนต่ำ ใช้แก๊สที่ไม่เป็นพิษและมีกระบวนการไม่ซับซ้อน แสดงดังรูปที่ 2.5



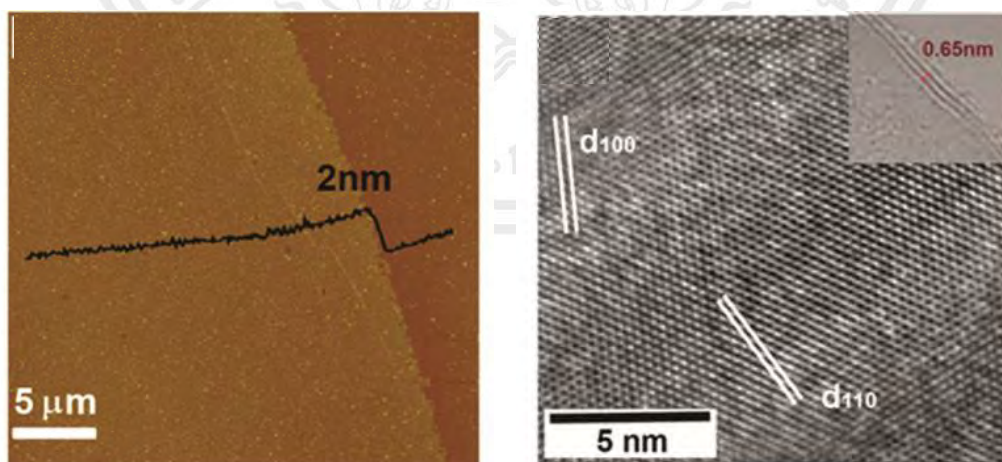
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและ  $\text{MoS}_2$  บนพื้นผิว substrate  $\text{SiO}_2$  [18]

### 2.2.2.2 การสังเคราะห์ด้วยวิธีการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition)

การสังเคราะห์โดยสารละลายเคมีนั้นมียุทธวิธีที่หลากหลายในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  เช่นการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Decomposition เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางให้มีขนาดใหญ่บนพื้นผิวของวัสดุได้หลากหลายชนิด โดยการหลอมชั้นของแอมโมเนียม ไธโอโมลิบเดต (Ammonium thiomolybdate:  $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$ ) ที่อุณหภูมิสูงสลายตัวด้วยความร้อนทำปฏิกิริยากับกำมะถัน การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถผลิตชั้นฟิล์มบางของ  $\text{MoS}_2$  ขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ดี วิธีการสังเคราะห์นี้เป็นวิธีที่ง่ายแล้วยังสามารถปรับขนาดของฟิล์มบางและสามารถใช้สังเคราะห์วัสดุ TMDs ชนิดอื่นได้อีกด้วย ในขณะเดียวกันฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ที่ได้ยังสามารถถ่ายโอนไปยังพื้นผิววัสดุอื่นได้ [21] แสดงดังรูปที่ 2.6 และตัวอย่างจากการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 กระบวนการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ด้วยวิธีการสลายตัวด้วยความร้อน [21]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.7 ภาพถ่าย  $\text{MoS}_2$  จำนวน 3 ชั้น (ก) ภาพถ่ายเทคนิค AFM (ข) ภาพถ่ายเทคนิค TEM [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition)

การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition: CVD) ในปัจจุบันวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  เนื่องจากสามารถสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ที่มีขนาดใหญ่และมีคุณภาพที่ดี นอกจากนี้ข้อดีดังกล่าววิธีนี้ยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำและเป็นวิธีที่มีความหลากหลายที่สุดสำหรับขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  บนพื้นผิวของ substrate โดยสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางได้กับวัสดุฐานรองได้หลายชนิดได้แก่  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , ไพลิน, แก้ว, ไม้กา และ hBN เป็นต้น โดย substrate แต่ละชนิดจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับการสังเคราะห์ฟิล์มและการนำไปใช้งาน โดยวิธีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์ระบบเครื่องกล เป็นต้นในการผลิตอุปกรณ์ในขนาดเทคนิค CVD นั้นมีความโดดเด่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่นเนื่องจากเทคนิค CVD ไม่ต้องถ่ายโอนฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  ไปยังพื้นผิวของวัสดุอื่น การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD สามารถผลิตฟิล์มบาง monolayer ได้ซึ่งฟิล์มบางที่ได้นั้นเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีคุณภาพสูงและมีขนาดใหญ่มากถึง  $100 \mu\text{m}$  เนื่องจากข้อได้เปรียบของวิธี CVD [22] ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกสังเคราะห์วัสดุ 2 มิติ  $\text{MoS}_2$  โดยการใช้เทคนิค CVD แสดงดังรูป 2.8

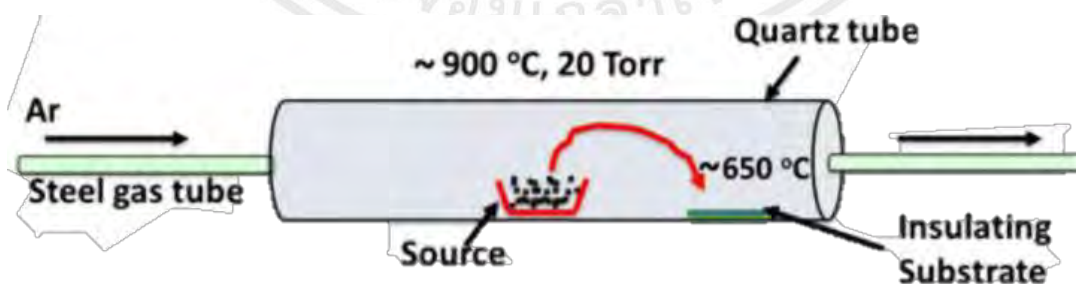


รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงการรวมตัวกันของ  $\text{MoS}_2$  รูปสามเหลี่ยมเป็นฟิล์มต่อเนื่องขนาดใหญ่และภาพขยาย  $\text{MoS}_2$  ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมี [22]

โดยปกติแล้วเทคนิค CVD มีหลักการพื้นฐานคือจะอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่เป็นสารตั้งต้นเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ทั้งนี้สารที่ได้เป็นผลจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไอเคมีตั้งต้นกับพื้นผิวโดยตรง หรืออาจได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอเคมีมากกว่าหนึ่งชนิดแล้วเกิดเป็นฟิล์มบนพื้นผิว ในการสังเคราะห์ฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  นั้นอาศัยหลักการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้ซึ่งจะสังเคราะห์ฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  บนพื้นผิว substrate โดยให้แก๊สเฉื่อยทำปฏิกิริยากันภายใต้ อุณหภูมิสูง ปัจจุบันงานส่วนใหญ่ใช้สารตั้งต้นเป็นโมลิบดีนัม (molybdenum) ได้แก่  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{MoO}_2$  หรือ  $\text{Mo}$  โดยจะนำมาทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (S) หากสารตั้งต้นของ  $\text{Mo}$  ไม่ระเหยในกระบวนการ มักเรียกวินี้ว่า sulfurization [18] โดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง  $600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$  และ กำมะถันจะระเหยกลายเป็นไอในช่วงอุณหภูมิ  $120\text{--}180\text{ }^\circ\text{C}$  ซึ่งการไหลของแก๊สเป็นปัจจัยสำคัญที่มี อิทธิพลต่อรูปร่าง ขนาดและคุณภาพของฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  โดยแก๊สเฉื่อยที่ใช้ส่วนใหญ่ในการทำปฏิกิริยา คือ แก๊สอาร์กอน ( $\text{Ar}_2$ ), แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) หรือใช้แก๊สทั้งสองผสมกัน ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม สามารถทำได้ทั้งภายใต้ความดันบรรยากาศหรือความดันต่ำ นอกจากอัตราการไหลของแก๊สที่มี อิทธิพลในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  แล้วยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องคือ อุณหภูมิ, ความดัน, substrate ที่ใช้, อัตราการระเหยและปริมาณของสารตั้งต้น

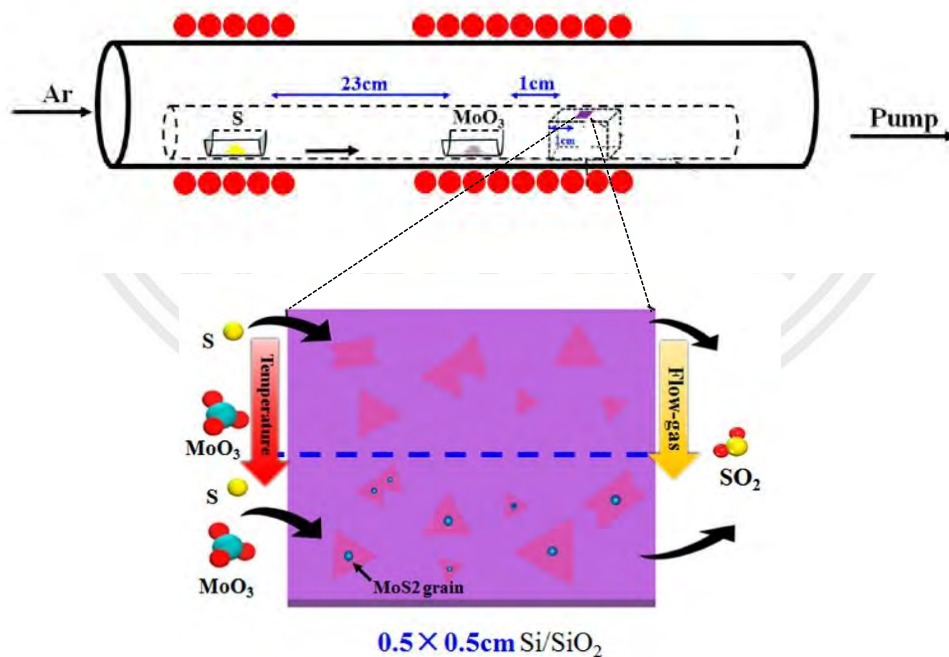
สำหรับวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ต้องการพิจารณากระบวนการภายในเครื่อง CVD สำหรับสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ 2 มิติให้มีลักษณะเป็นฟิล์มบางโดยเทคนิค CVD ได้ถูกนำมาใช้ กันอย่างแพร่หลายเพื่อปลูกฟิล์มบนพื้นผิววัสดุที่แตกต่างกัน เนื่องจากวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ฟิล์ม บางได้ดีสำหรับกราฟีนที่มีความบางมาก นักวิจัยหลายคนจึงเลือกใช้วิธีนี้ในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  มี งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้รายงานโดย S. Wu และคณะได้สังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ด้วยการระเหยของผง  $\text{MoS}_2$  โดยตรงถูกทำให้ระเหยที่อุณหภูมิ  $\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15-20 นาที ภายใต้อัตราการไหลของแก๊ส อาร์กอนและใช้ความดันภายใน 20 Torr โดยใส่ผง  $\text{MoS}_2$  ลงในภาชนะอลูมินาและได้มีการสังเคราะห์ บน substrate ที่แตกต่างกันได้แก่  $300\text{ nm SiO}_2/\text{Si}$ , (0001) ไพลีน, กระจก ภายใต้อุณหภูมิ  $\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$  แสดงดังรูปที่ 2.9 พวกเขาแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  ให้มีความหนา เป็น monolayer ได้สำเร็จและ substrate ที่ใช้มีผลต่อลักษณะรูปร่างฟิล์มที่เกิดขึ้น [23]



รูปที่ 2.9 แผนภาพจำลองภายในของเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> ด้วยเทคนิค CVD มีรายงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้โดย D. Zhou และคณะ มีการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มบาง MoS<sub>2</sub> โดยใช้สารตั้งต้นทั้งหมด 2 ชนิด คือ MoO<sub>3</sub> ปริมาณ 12 mg เป็นสารตั้งต้นของ Mo และกำมะถัน ปริมาณ 120 mg ใส่ลงในภาชนะแยกกัน หลังจากสารตั้งต้นระเหยและทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิดแล้ว MoS<sub>2</sub> จะเกิดขึ้นบนพื้นผิว substrate (SiO<sub>2</sub>/Si) โกล์แหล่งกำเนิด Mo แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้คือผง MoO<sub>3</sub> และผงกำมะถัน ถูกทำให้ระเหยที่อุณหภูมิ 750 °C และ 180 °C ตามลำดับ วางลงในบ่าหลอมที่แยกออกจากกันในเครื่อง CVD ภายใต้การไหลของแก๊สอาร์กอน พวกเขาแสดงให้เห็นว่าจำนวนชั้นของฟิล์มบางและขนาดของฟิล์ม MoS<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารตั้งต้น MoO<sub>3</sub> แสดงดังรูปที่ 2.11 และอัตราการไหลของแก๊สมีผลทำให้ฟิล์มบาง MoS<sub>2</sub> นั้นเปลี่ยนรูปร่างแล้วยังส่งผลให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก [24] แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยปฏิกิริยาเคมีทั่วไปของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดในเครื่อง CVD เมื่อใช้ MoO<sub>3</sub> และกำมะถันเป็นสารตั้งต้นแสดงดังต่อไปนี้ [25]

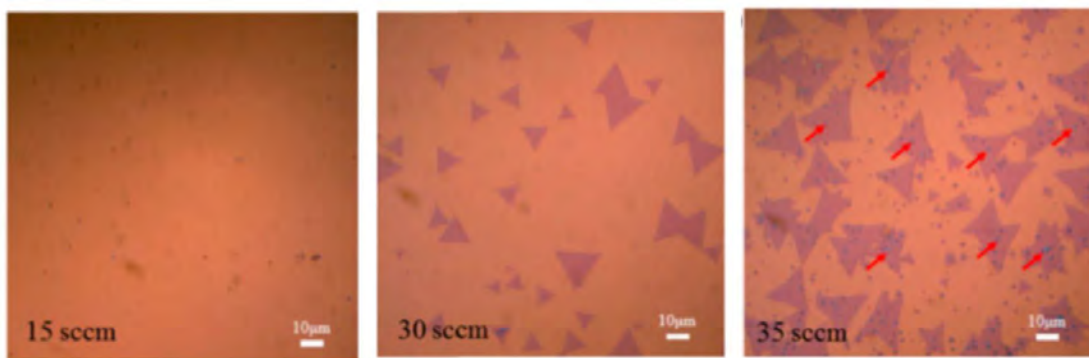


รูปที่ 2.10 แผนภาพจำลองภายในเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> และมุมมองด้านบน substrate [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



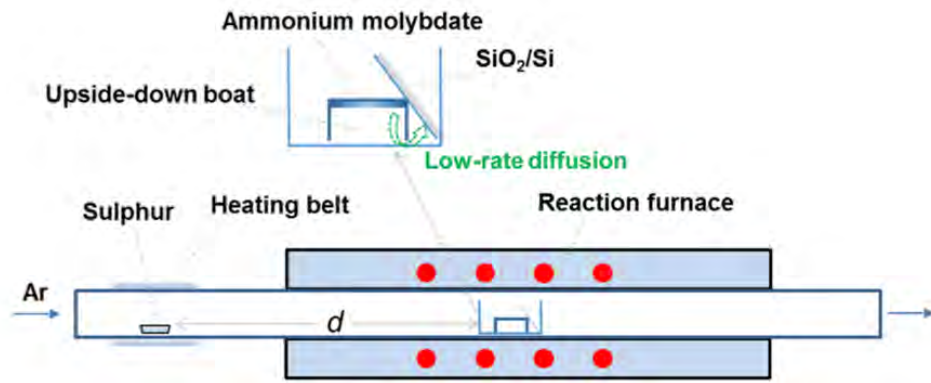
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ  $\text{MoS}_2$  ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD ภายใต้อุณหภูมิแตกต่างกัน [24]



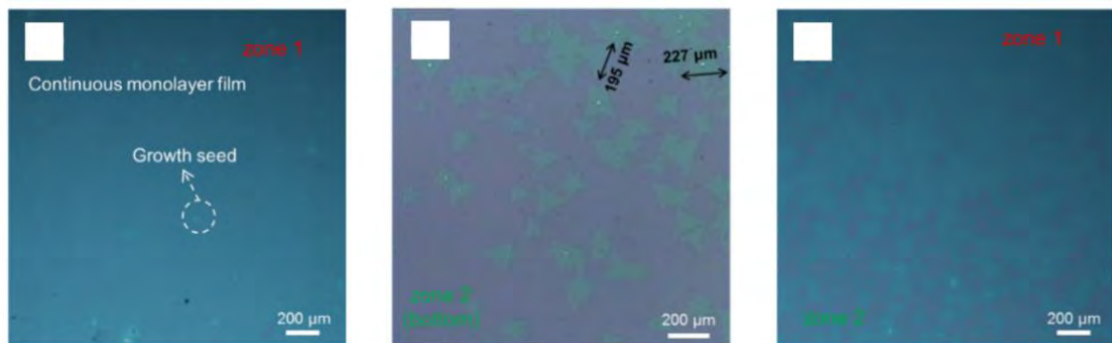
รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  ที่สังเคราะห์ด้วย CVD ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สที่ต่างกัน [24]

จากวิธีดังกล่าวที่ได้มีการนำเสนอนั้นมีการเปลี่ยนสารตั้งต้นเพื่อให้ได้ฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  ขนาดใหญ่ขึ้นและควบคุมการเกิดเกรน (Grain) จากแหล่งกำเนิดของ Mo โดยใช้แอมโมเนียมโมลิฟเตต  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  เป็นสารตั้งต้นของ Mo ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 20 นาที และวางผังกำมะถันที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนแสดงดังรูปที่ 2.13 พบว่าฟิล์มที่ได้มีขนาดใหญ่โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 120  $\mu\text{m}$  และได้ฟิล์มต่อเนื่องขนาดใหญ่ [26] แสดงดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



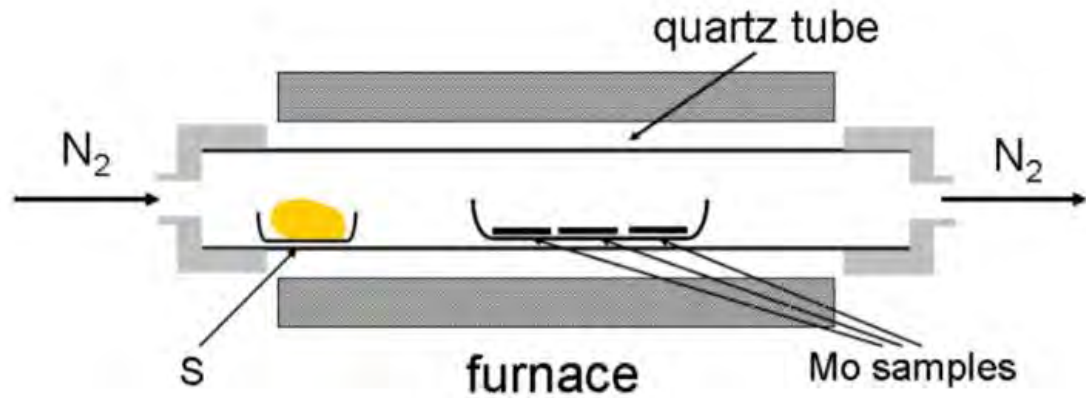
รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองภายในเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  [26]



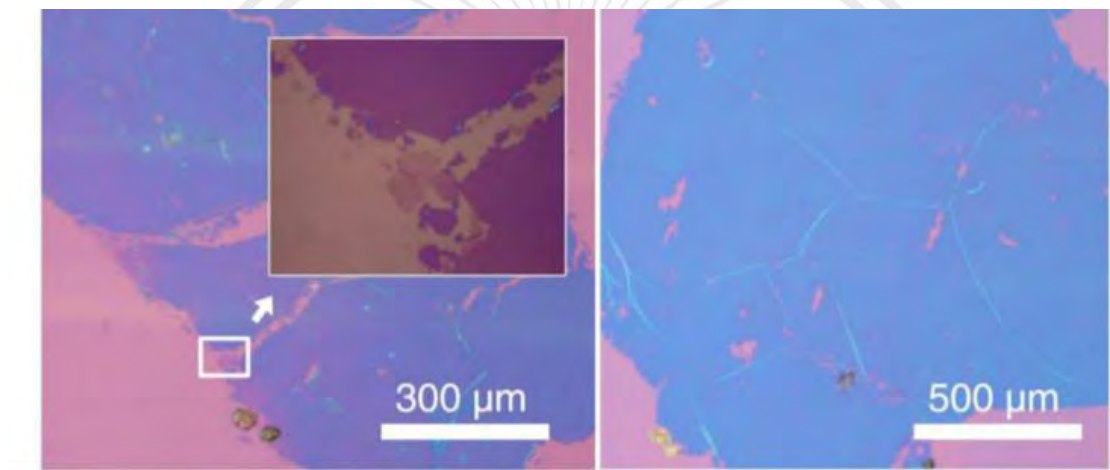
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ที่บริเวณที่ต่างกันบนพื้นผิว substrate [26]

มีความพยายามที่จะปลูก monolayer  $\text{MoS}_2$  พื้นที่ขนาดใหญ่โดยวิธี direct sulfurization ด้วยฟิล์มบางของ Mo หรือ  $\text{MoO}_3$  มีการรายงานโดย Y. Zhan และคณะ มีการสังเคราะห์โดยใช้ฟิล์มบางของ Mo ที่อยู่บนพื้นผิวของ  $\text{SiO}_2$  วางเรียงกันลงในภาชนะเซรามิค และกักมะถันปริมาณ 1-2 g ใส่ลงในภาชนะเซรามิคแยกกัน แล้วนำไปทำปฏิกิริยา sulfurized ในเครื่อง CVD ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยภาชนะที่ใส่กักมะถันจะวางอยู่ที่บริเวณอุณหภูมิประมาณ 113 °C ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศแสดงดังรูปที่ 2.15 วิธีนี้ได้จะได้ฟิล์มขนาดใหญ่ที่เป็น monolayer และ few layer [27] แสดงดังรูปที่ 2.16 จากที่มีการรายงานเกี่ยวกับการใช้สารตั้งต้นที่หลากหลายแต่มีงานจำนวนน้อยมากที่ใช้  $\text{MoO}_2$  เป็นสารตั้งต้น โดยงานส่วนมากที่ได้รายงานมานั้นจะใช้  $\text{MoO}_3$  เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ซึ่งพบว่าสารดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็งมีความอันตรายสูงและมีความเสถียรทางเคมีที่ต่ำกว่า  $\text{MoO}_2$  ดังนั้นในงานนี้จึงเลือกใช้สารตั้งต้น  $\text{MoO}_2$  ในการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนภาพจำลองภายในเครื่อง CVD สำหรับการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  [26]



(ก)

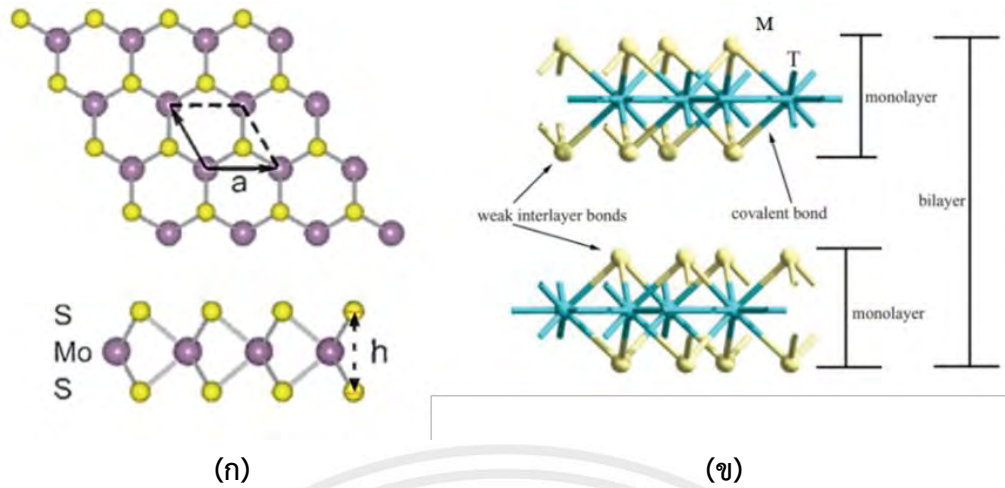
(ข)

รูปที่ 2.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ  $\text{MoS}_2$  ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD (ก) แสดงภาพขยายของพื้นที่บริเวณลูกศรสี (ข) แสดงภาพพื้นที่ของฟิล์มบาง  $\text{MoS}_2$  ส่วนมากจะมีจำนวนชั้นมากกว่า 1 ชั้น [26]

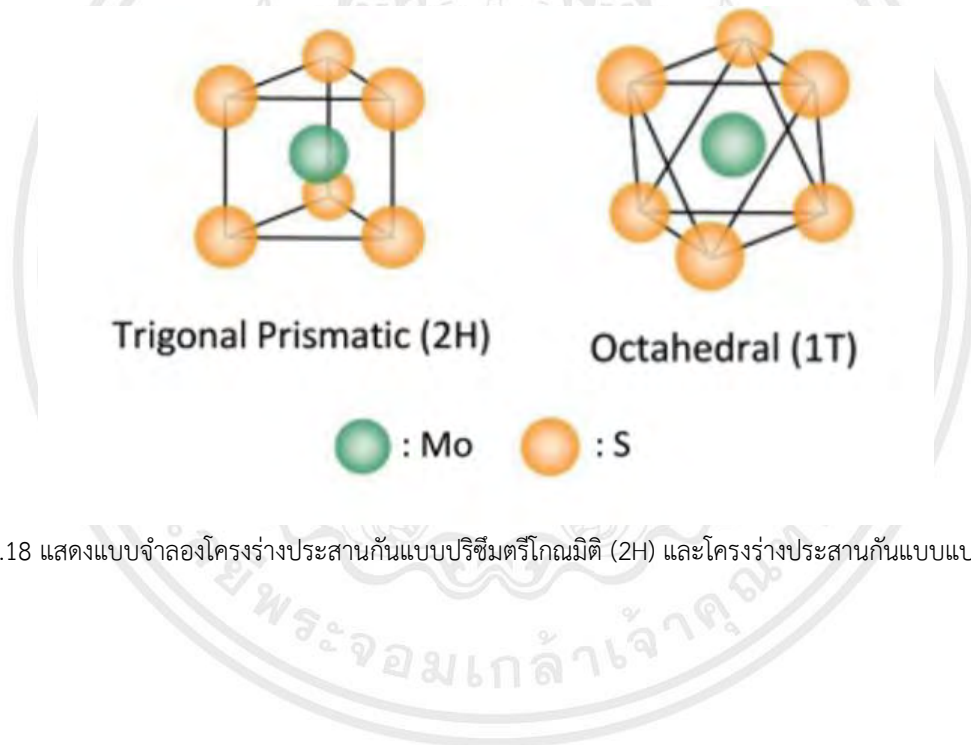
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 โครงสร้างผลึกของ MoS<sub>2</sub>

MoS<sub>2</sub> มีโครงสร้างพื้นฐานคือ X-M-X ประกอบเข้าด้วยกันอย่างหลวมๆ โครงสร้างผลึกชั้นเดียวของ MoS<sub>2</sub> นั้นคล้ายกับโครงสร้างผลึกของโบรอนไนไตรด์(BN), ซิลิคอนคาร์ไบด์(SiC), ซิงค์ออกไซด์(ZnO) และกราฟีน โครงสร้างผลึกนั้นประกอบด้วยอะตอมของโลหะทรานซิชันคือโมลิบดีนัม (Mo) คั่นกลางอยู่ระหว่างชั้นของเซลโคเจนคือกำมะถัน(S) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) มีอัตราส่วนทางเคมี Mo:S = 1:2 โครงสร้างผลึกชั้นเดียวของ MoS<sub>2</sub> มีความหนา  $h = 3.13 \text{ \AA}$  และค่าคงที่ของแลตทิซ  $a = 3.19 \text{ \AA}$  [28] โดยระหว่างชั้นของอะตอมรวมเข้ากันได้ด้วยแรง Van der Waals ที่อ่อนกำลังยึดกันไว้อย่างไม่แน่นอนและระยะห่างระหว่างชั้นห่างกันประมาณ  $6.5 \text{ \AA}$  แสดงดังรูปที่ 2.17 ชั้นที่อยู่ติดกันถูกยึดเข้าด้วยกันไว้อย่างไม่แน่นอนนั้นเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากโดยโครงสร้างของ MoS<sub>2</sub> มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ 1T, 2H และ 3R โดยตัวเลขหมายถึงจำนวนอะตอมหนึ่งชั้นในหน่วยเซลล์และตัวอักษร T,H และ R แสดงถึงความสมมาตรเชิงโครงสร้างเป็นตัวแทนของสมมาตรสามเหลี่ยม (Tetragonal symmetry), สมมาตรหกเหลี่ยม (Hexagonal symmetry) และสมมาตรสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhombohedral symmetry) ตามลำดับ ซึ่ง MoS<sub>2</sub> แต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่ต่างกันโดยชนิด 1T เป็นโครงสร้างแปดด้านที่อะตอมโลหะทรานซิชันอยู่ตรงกลางส่วนชนิด 2H และ 3R มีโครงสร้างเดียวกันเป็นปริซึมแบบตรีโกณมิติมีอะตอมโลหะทรานซิชันเชื่อมต่อระหว่างอะตอมของเซลโคเจน 6 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.18 โครงสร้างแต่ละชนิดของ MoS<sub>2</sub> มีความแตกต่างกันในการเรียงตัวซ้อนกันโดยชนิด 2H แสดงให้เห็นถึงสมมาตรหกเหลี่ยมจำนวน 2 ชั้นเรียงซ้อนกันแล้วชั้นถัดไปจะเรียงซ้ำเดิมคือ AbA BaB AbA... , ชนิด 3R แสดงให้เห็นถึงสมมาตรสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนเรียงซ้อนกัน 3 ชั้นแล้วชั้นถัดไปจะเรียงซ้ำเดิมคือ AbA BcB CaC AbA... และชนิด 1T แสดงให้เห็นถึงสมมาตรสามเหลี่ยมเรียงซ้อนแบบเดิมซ้ำกันคือ AbC AbC... แสดงดังรูปที่ 2.19 จากโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดมีเพียงชนิด 2H และ 3R เท่านั้นที่มีความเสถียรในธรรมชาติและโครงสร้างที่มีความเสถียรที่สุดคือ MoS<sub>2</sub> ที่มีความหนา monolayer คือชนิด 2H [29,31]

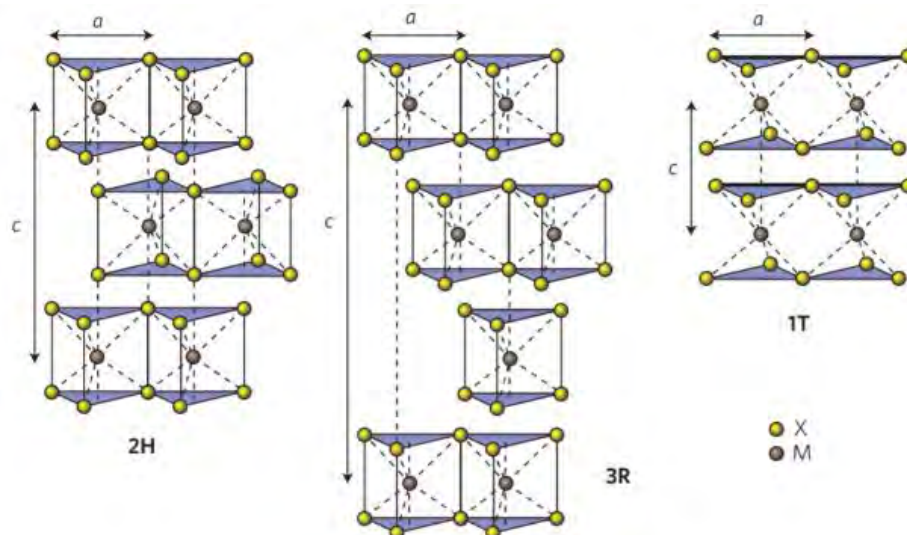


รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกชั้นเดียวของ  $\text{MoS}_2$  (ก) มุมมองด้านบน [27] (ข) มุมด้านข้าง [31]



รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองโครงสร้างประสานกันแบบปริซึมตรีโกณมิติ (2H) และโครงสร้างประสานกันแบบแปดด้าน (1T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



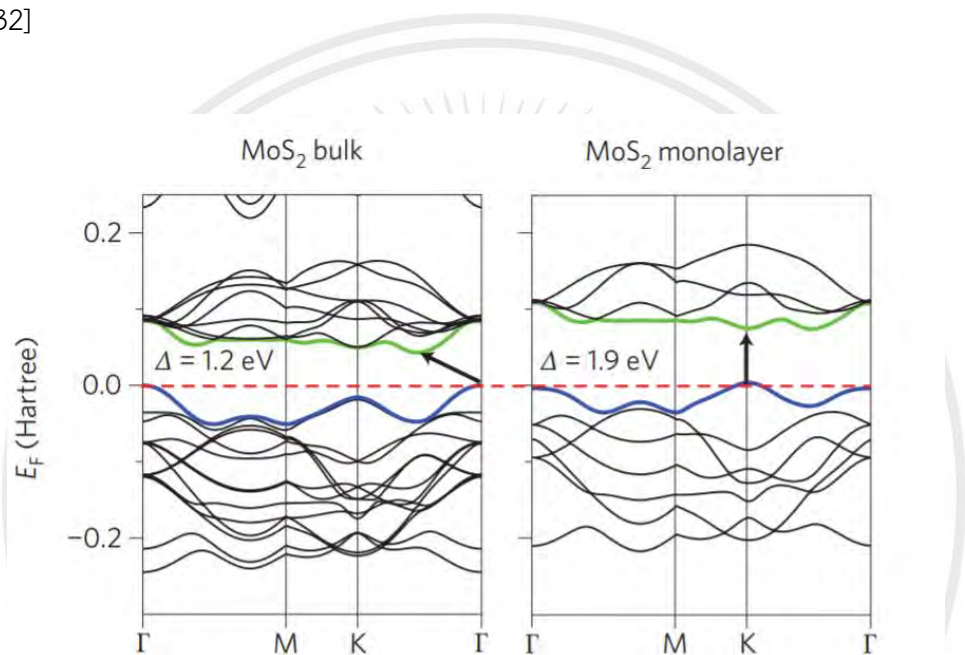
รูปที่ 2.19 แสดงลำดับการซ้อนกันสำหรับโครงสร้างชนิด 2H, 3R และ 1T [28]

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

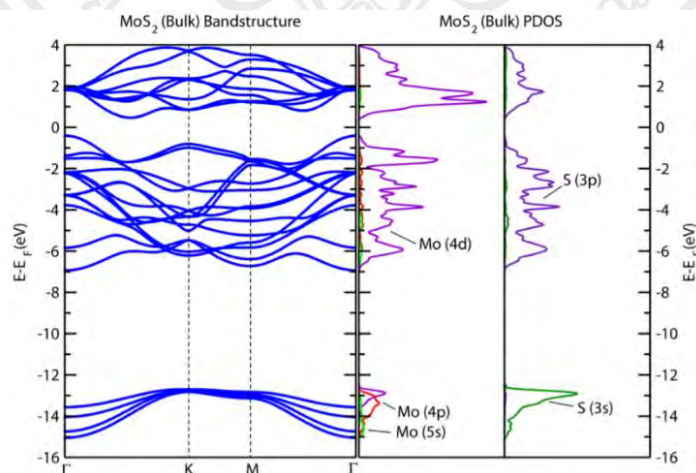
วัสดุ TMDCs นั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานที่คล้ายกันในทางคุณสมบัติทั่วไปโดยโครงสร้างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จาก first principles ซึ่งสำหรับ  $\text{MoS}_2$  นั้นเมื่ออยู่รวมกันเป็นกลุ่มจำนวนหลายชั้นพบว่าแถบวาเลนซ์ (Valence band) สูงสุดอยู่ที่จุด  $\Gamma$  และแถบนำ (Conduction band) ต่ำสุดอยู่ที่กลางระหว่างจุด K และ จุด  $\Gamma$  แสดงดังรูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีช่องว่างแถบพลังงานชนิด Indirect bandgap มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน  $\sim 1.2$  eV แต่เมื่อจำนวนชั้นลดลงจะทำให้แถบวาเลนซ์และแถบนำจะค่อยๆ เลื่อนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานเป็นชนิด Direct bandgap เมื่อความหนาของชั้นเป็น monolayer แถบวาเลนส์สูงสุดและแถบนำสูงสุดจะอยู่ตรงกันที่จุด K แสดงดังรูปที่ 2.20 โดยมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มสูงขึ้น  $\sim 1.9$  eV การเปลี่ยนแปลงแถบโครงสร้างที่ขึ้นกับจำนวนชั้นเกิดจากควอนตัมจำกัดบริเวณ การเคลื่อนที่ทั้งสามมิติ (Quantum confinement) และการเปลี่ยนแปลงในการผสมระหว่างอิเล็กตรอนในออร์บิทัล (Hybridization) ระหว่าง  $P_z$  ออร์บิทัลบนอะตอมของกำมะถันและ d ออร์บิทัลบนอะตอมของโมลิบดีนัมสำหรับ  $\text{MoS}_2$  การคำนวณทฤษฎีการทำงานที่หนาแน่น (DFT) แสดงให้เห็นว่าสถานะอิเล็กทรอนิกส์ของเวกเตอร์คลื่นต่างกันมีวงจรรองอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการกระจายเชิงพื้นที่ต่างกันโดยเฉพาะในส่วนของสถานะแถบนำที่จุด K ส่วนใหญ่เกิดจาก d ออร์บิทัลบนอะตอมของ Mo ตั้งอยู่กลางระหว่างชั้นของกำมะถัน ในทางกลับกันสถานะใกล้จุด  $\Gamma$  และช่องว่างแถบพลังงานทางอ้อมเกิดจากการรวมตัวเชิงเส้นของ d ออร์บิทัลบนอะตอมของ Mo และ  $P_z$  ออร์บิทัลบนอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

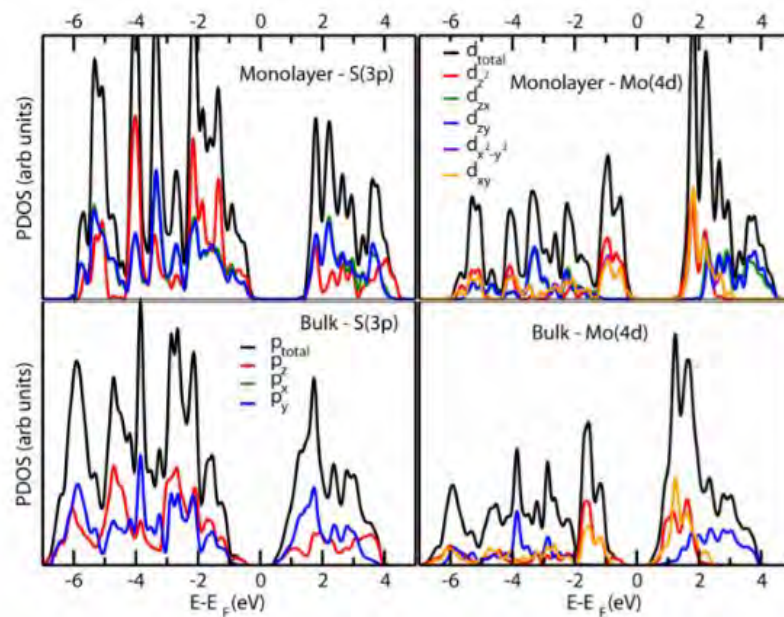
ของกัมมะถัน แสดงดังรูป 2.21 เมื่อจำนวนชั้นมีความหนามากจึงทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างชั้นที่แข็งแรงเนื่องจากพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นด้วยสาเหตุนี้เมื่อจำนวนชั้นลดลงทำให้ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงยึดกันระหว่างชั้น เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของสถานะที่คาดการณ์ในวงโคจร (PDOS) ของ MoS<sub>2</sub> ที่มีจำนวนหลายชั้นและจำนวน 1 ชั้นแสดงดังรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าสถานะ d<sub>z<sup>2</sup></sub> เป็นสาเหตุหลักในขณะสถานะ d<sub>xy</sub> และ d<sub>x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup></sub> จะลดลงเมื่อ MoS<sub>2</sub> มีจำนวนหลายชั้นและจะแยกออกจากกันเล็กน้อยเมื่อ MoS<sub>2</sub> จำนวน 1 ชั้นดังนั้นจะเห็นได้ว่า MoS<sub>2</sub> ที่มีจำนวนชั้นที่น้อยลงสามารถปรับเปลี่ยนชนิดของช่องว่างแถบพลังงานได้ และจะแสดงตัวเป็นเซมิคอนดักเตอร์ [2,29-32]



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> ที่มีจำนวนชั้นความหนาจำนวนหลายชั้นและจำนวน 1 ชั้น [31]



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ MoS<sub>2</sub> จำนวนหลายชั้นที่ได้จากการคำนวณ(ซ้ำ) และความหนาแน่นของสถานะที่คาดการณ์ในวงโคจร(PDOS) บน Mo และ S ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มจำนวนหลายชั้น(ขวา) [30] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตหากไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์ เอกสารนี้ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 คำนวณความหนาแน่นของสถานะที่คาดการณ์ (PDOS) ของ MoS<sub>2</sub> จำนวนหลายชั้นและจำนวน 1 ชั้น แสดงสถานะ Mo(4d) และ S(3p) [30]

## 2.5 คุณสมบัติทั่วไปของ MoS<sub>2</sub>

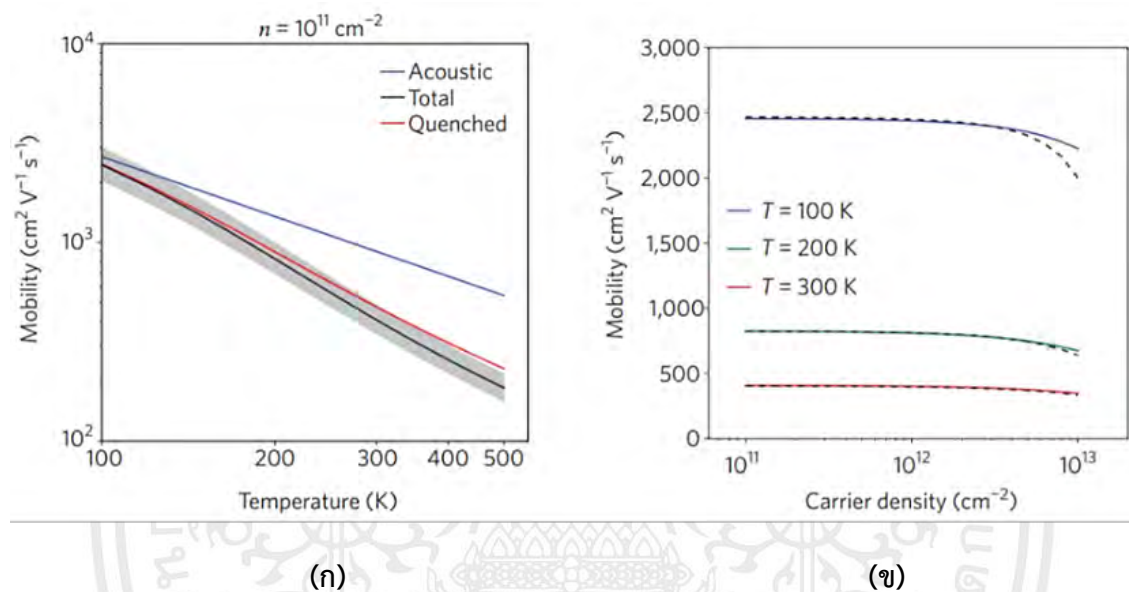
วัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> มีคุณสมบัติเชิงกลคล้ายกับของกราฟีน มีความยืดหยุ่นสูงมีค่ามอดูลัสของยัง (Young's moduli) ประมาณ 0.34 TPa จากการคำนวณ DFT แสดงให้เห็นว่า monolayer MoS<sub>2</sub> สามารถรักษาความเครียดยืดหยุ่นได้ดีมาก ทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการจัดเก็บพลังงานยืดหยุ่น นอกจากนี้วัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> ยังมีคุณสมบัติอื่นที่น่าสนใจ ได้แก่ โครงผลึกของฟิล์มบางไม่มีจุดบกพร่อง หรือพันธะแขวนขาด (Dangling bond) และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงถึง 1100°C [2]

### 2.5.1 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์

วัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่โดดเด่นเป็นที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานขนาดใหญ่มีค่าป 1.9 eV แต่มีความคล่องตัวพาหะของ MoS<sub>2</sub> จำนวนชั้นเดียวที่อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 0.1–10 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> ซึ่งต่ำเกินไปสำหรับการนำไปใช้งานจริงและเมื่อเปรียบเทียบกับความคล่องตัวพาหะของ MoS<sub>2</sub> จำนวนหลายชั้นนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 200–500 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> [33] ซึ่งก่อนหน้านี้มีการศึกษาเพื่อเพิ่มความคล่องตัวพาหะ ทดลองโดยนำวัสดุที่มีค่าคงที่เป็นฉนวนสูง (high-k gate dielectric) นำไปใช้ในส่วน of top-gated พบว่ามีค่าความคล่องตัวพาหะของ MoS<sub>2</sub> จำนวนชั้นเดียวที่อุณหภูมิห้องมีค่า >200 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการเคลื่อนที่พาหะที่พบนั้นเกิดจากการปรับเปลี่ยนโพ

นอนของ MoS<sub>2</sub> เนื่องจากการกระเจิงของโฟนอนเป็นกลไกภายในที่ถูกจำกัดที่อุณหภูมิห้อง การพึ่งพาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขเชิงพาณิชย์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของการเคลื่อนที่จึงเป็นประโยชน์สำหรับกลไกการกระเจิงและมีการศึกษาเชิงทฤษฎีโดยการคำนวณการเคลื่อนที่ของพาหะใน MoS<sub>2</sub> จำนวนชั้นเดียวเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความหนาแน่นของพาหะคำนวณแบบ first-principles (DFT) สำหรับโครงสร้างแถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์, การกระจายโฟนอนและความปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนกับโฟนอน [34] แสดงดังรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ monolayer MoS<sub>2</sub> นั้นมีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่โดดเด่นเป็นที่น่าสนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย



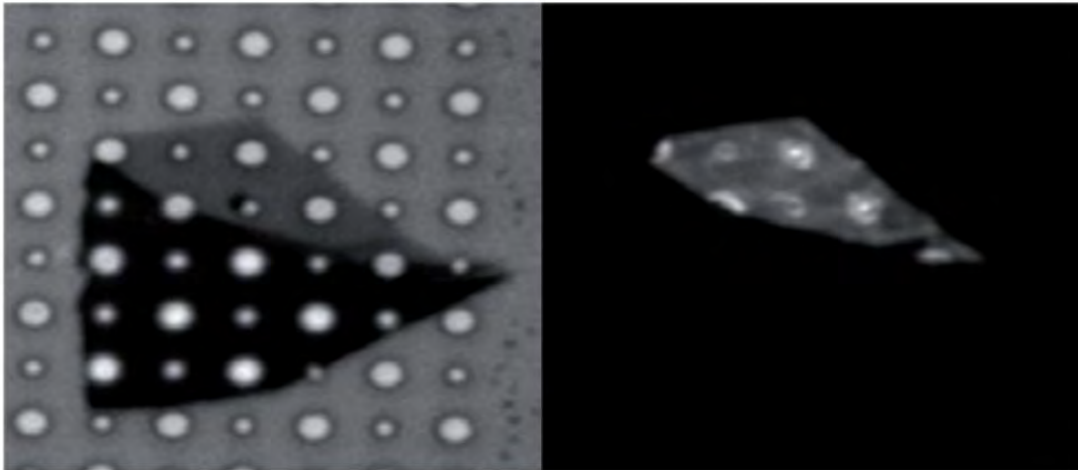
รูปที่ 2.23 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะกับอุณหภูมิ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของพาหะภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน [34]

### 2.5.2 คุณสมบัติทางแสง

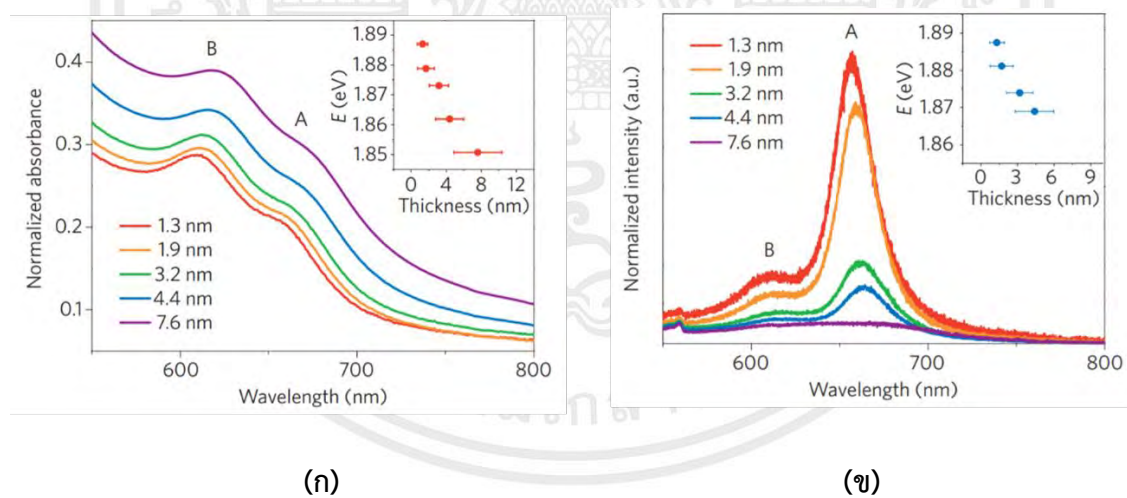
นอกจากคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์แล้ววัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> ยังมีคุณสมบัติทางแสงที่โดดเด่น โดยโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางแสง MoS<sub>2</sub> นั้นสามารถเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงานจากช่องว่างแถบพลังงานทางอ้อมเป็นช่องว่างแถบพลังงานทางตรง มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้นและมีการดูดซับความยาวคลื่นในช่วง 350-1000 nm การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้ PL quantum yield (QY) มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากการลดจำนวนชั้นให้บางลงเหลือเพียง 1 ชั้นแสดงดังรูปที่ 2.24 โดยจะสามารถมองเห็นเพียงบริเวณ MoS<sub>2</sub> นั้นมีความหนาของชั้นจำนวน 1 ชั้นเท่านั้น เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพ QY สูงขึ้น [35] ซึ่งสอดคล้องกับความหนาของฟิล์มเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มค่อยๆ ลดลงแสดงดังรูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นว่า

ตัวอย่างที่บางที่สุดนั้นมีค่าความเข้มการเปล่งแสงสูงที่สุดในขณะที่ความเข้มการเปล่งแสงลดลงเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกลักษณ์ที่ส่งผ่านแสงที่แรงขึ้นเพื่อที่จะให้ค่าที่แน่นอน เมื่ออยู่ใต้เห็นแบบใช้ประโยชน์การวัดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางกลับกันเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับแสงมากขึ้นตามจะเห็นได้ว่าฟิล์มที่บางสุดนั้นจะดูดซับแสงได้น้อยและเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นการดูดซับแสงก็จะเพิ่มขึ้น คุณสมบัติทางแสงเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจพัฒนาและนำไปใช้งานทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [36]



รูปที่ 2.24 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของผลึกจำนวน 1 ชั้นและหลายชั้นของ MoS<sub>2</sub> บนพื้นผิวซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรู (ซ้าย) และแสดงภาพจาก Photoluminescence จากตัวอย่างเดียวกัน (ขวา) [36]

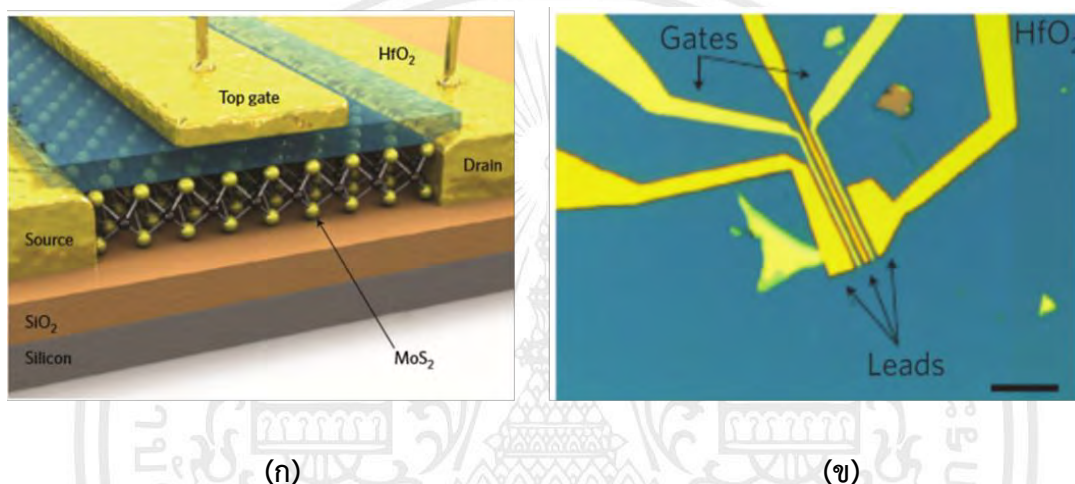


รูปที่ 2.25 (ก) กราฟแสดงค่าการดูดซับแสง (ข) กราฟแสดงค่าความเข้มการเปล่งแสงของ MoS<sub>2</sub> ที่ความหนาแตกต่างกัน [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

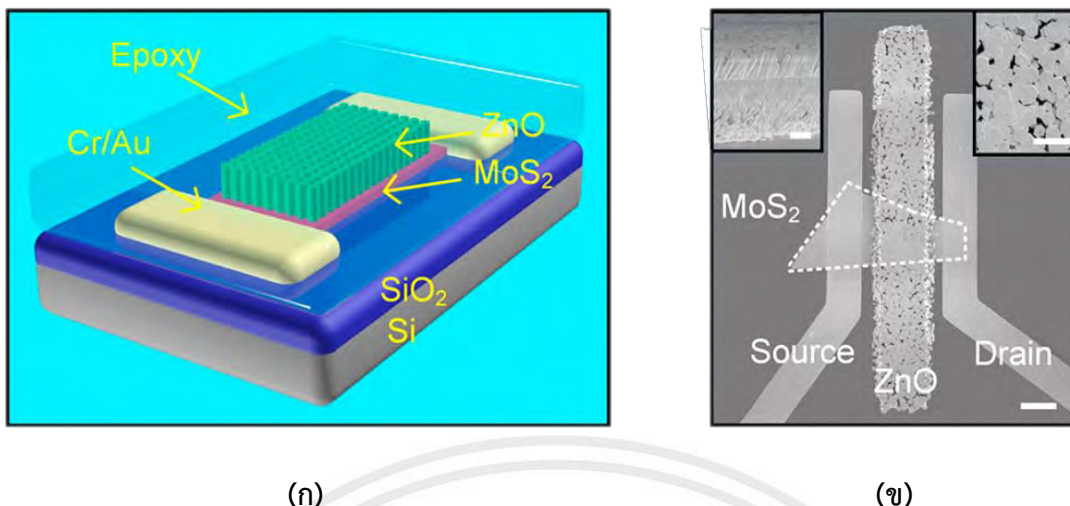
## 2.6 การนำไปประยุกต์ใช้

เนื่องจาก TMDCs มีประสิทธิภาพทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสงที่โดดเด่นโดย MoS<sub>2</sub> นั้นเป็นหนึ่งใน TMDCs ที่มีอยู่ทั่วไปและมีแนวโน้มที่ดีในด้านการนำไปใช้งานจึงได้รับความสนใจนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสง โดยอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้มากที่สุดคือ ทรานซิสเตอร์ซึ่งในงานก่อนหน้านี้นี้มีการนำ monolayer MoS<sub>2</sub> ไปใช้ประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ field-effect transistor (FET) แสดงดังรูปที่ 2.26 โดยแสดงค่าอัตราเปิด/ปิดของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง  $1 \times 10^8$  และความคล่องตัว  $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [2]



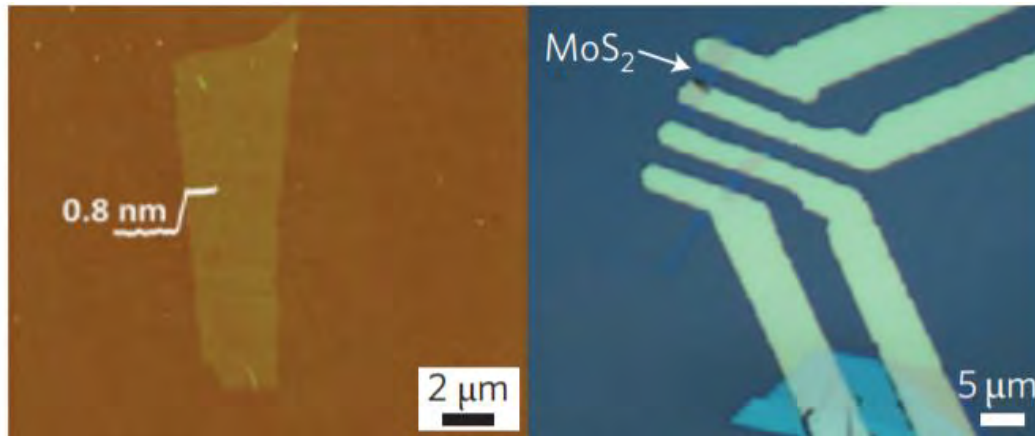
รูปที่ 2.26 (ก) แสดงภาพจำลองอุปกรณ์ field-effect transistors (ข) ภาพถ่าย FET จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [2]

อย่างไรก็ตาม FET แบบดั้งเดิมจะถูกควบคุมโดยแรงดัน gate ที่จ่ายจากภายนอกซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการใช้งานเพื่อการทำงานที่ดีขึ้นของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ได้มีการพัฒนาโดยใช้โครงสร้างไฮบริดมาประดิษฐ์เป็น FET ซึ่งงานก่อนหน้านี้นี้ได้ใช้โครงสร้างไฮบริดของ MoS<sub>2</sub> และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แสดงดังรูปที่ 2.27 ZnO จะทำหน้าที่เป็นแรงดันเกตสามารถปรับและควบคุมการขนส่ง source-drain ภายใน MoS<sub>2</sub> ได้  $\sim 25\%$  [37]



รูปที่ 2.27 (ก) แสดงภาพจำลอง field-effect transistors (FET) ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้โครงสร้างไฮบริดระหว่าง MoS<sub>2</sub> และ ZnO (ข) ภาพถ่าย FET จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [37]

นอกจากการนำวัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> ไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบไฮบริดแล้วยังมีการนำคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> นำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตรวจจับ โต้ตอบหรือควบคุมแสงได้ เช่น เลเซอร์, LED, เซลล์แสงอาทิตย์, optical switches, อุปกรณ์ตรวจจับแสงและหน้าจอแสดงผล เนื่องจากวัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> นั้นมีความยืดหยุ่นสูงจึงเป็นอีกทางเลือกที่ดีในการนำคุณสมบัตินี้มาใช้ประโยชน์ ฟิล์มบางของ MoS<sub>2</sub> นั้นมีความไวต่อแสงจึงมีการนำ monolayer MoS<sub>2</sub> มาประดิษฐ์เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตัวตรวจจับแสง แสดงดังรูปที่ 2.28 โดยกระแสไฟฟ้าขณะที่มีการฉายแสง (Photocurrent) ในอุปกรณ์นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบและพบว่าโฟโตทรานซิสเตอร์ monolayer MoS<sub>2</sub> มีการตอบสนองต่อแสงได้ดีแสดงค่าสูงถึง 7.5 mA/W ภายใต้การส่องสว่างพลังงานแสงต่ำ พบว่าการตอบสนองต่อแสงของโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ประดิษฐ์จาก monolayer MoS<sub>2</sub> นั้นดีกว่าโฟโตทรานซิสเตอร์จากกราฟีนซึ่งมีการตอบสนองต่อแสงได้ค่าเพียง 1 mA/W [38]

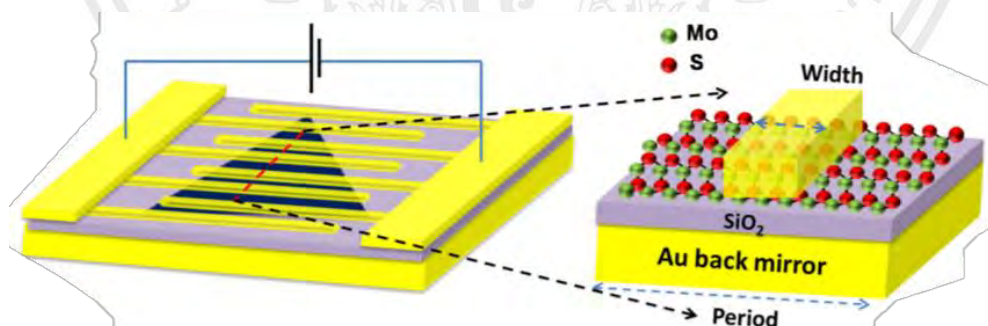


(ก)

(ข)

รูปที่ 2.28 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ (ก) MoS<sub>2</sub> จำนวน 1 ชั้น (ข) อุปกรณ์ Phototransistor [38]

มีการพยายามพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้โครงสร้างแบบไฮบริด งานก่อนหน้านี้นี้รายงานการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบไฮบริด แสดงดังรูปที่ 2.29 พบว่าพื้นผิวที่นำมาใช้สามารถควบคุมความไวโพลาไรซ์ของอุปกรณ์ตรวจจับแสงอย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างแบบไฮบริดช่วงเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องตรวจจับแสงให้ดีขึ้น [39] นอกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น MoS<sub>2</sub> ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ ได้จากที่รายงานมาก่อนหน้านี้เช่น เซลล์แสงอาทิตย์, อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกล, ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แก๊สเซนเซอร์, ไบโอสเซนเซอร์ เป็นต้น



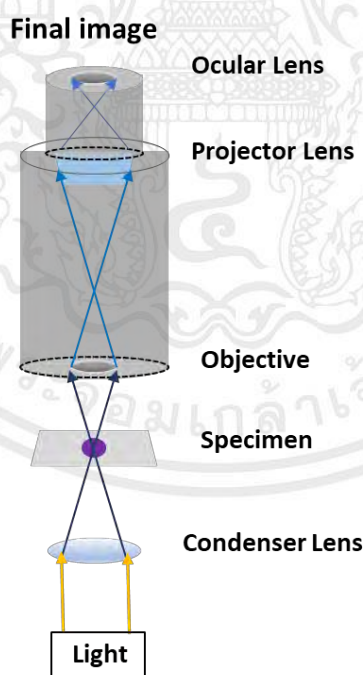
รูปที่ 2. 29 แสดงแผนภาพจำลองอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้โครงสร้างไฮบริดมีช่องว่างพลาสมอนบน MoS<sub>2</sub> [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะ MoS<sub>2</sub>

### 2.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นและเป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นที่ง่ายที่สุดในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์เนื่องจากมีประโยชน์ในการมองเห็นคุณสมบัติที่มีขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยตรง การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพตัวอย่างนั้นนิยมตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งกล้องสามารถถ่ายภาพในกำลังขยายตั้งแต่ 5 -100 เท่า [40] ทำให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดทั่วไปของตัวอย่างเช่น รูปร่าง, รูปทรงและพื้นผิวของตัวอย่างภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงนั้นมีโครงสร้างพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.30 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงนั้นเป็นที่นิยมนำมาใช้งานเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มบางที่มีความโปร่งใสเพียงพอเพื่อแสงที่มองเห็นจะแสดงความคมชัดของสี แม้ว่าตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบคุณลักษณะนั้นสามารถมองเห็นรูปทรงของตัวอย่างและสีที่แตกต่างกันชัดเจนแต่ก็ยังไม่สามารถระบุจำนวนชั้นที่ชัดเจนของ MoS<sub>2</sub> ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ลักษณะอื่นเพื่อระบุจำนวนชั้นที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

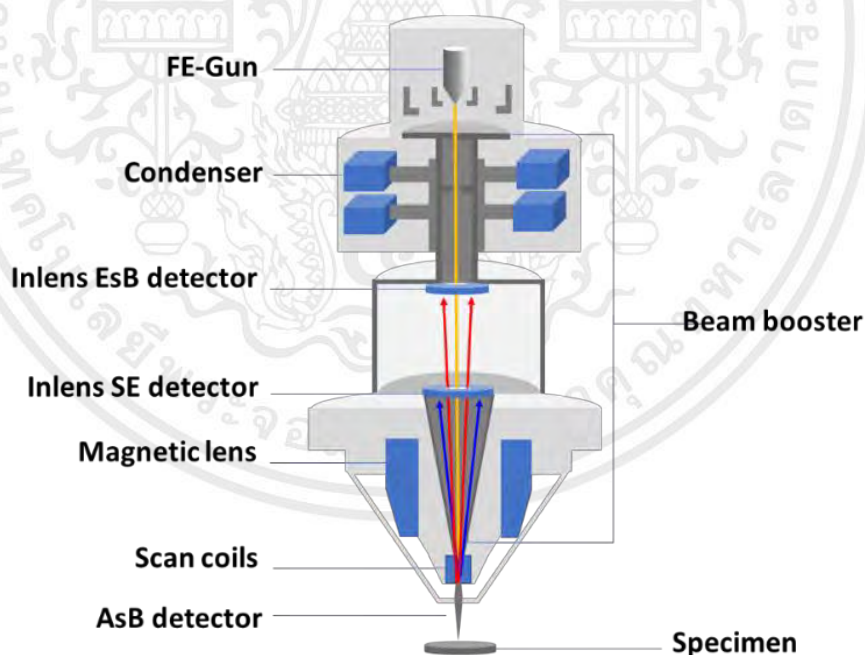


รูปที่ 2.30 แผนผังจำลองโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 Field emission scanning electron microscope

กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชัน (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างขนาดเล็กได้ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตรโดย FE-SEM นั้นมีกำลังขยายตั้งแต่ 20-800,000 เท่า เครื่องมือชนิดนี้จะต้องอาศัยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงในการทำงานโดยที่อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (FE-Gun) แล้วใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างผลของการวิเคราะห์จะได้ออกมาเป็นภาพที่ได้มีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยโครงสร้างพื้นฐานของ FE-SEM [41] แสดงดังรูปที่ 2.31 นอกจากการวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไปแล้วเครื่องมือชนิดนี้ยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่กระจายตัวบนพื้นผิวตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณจากการวัดสัญญาณที่แปลงเป็นสัญญาณภาพ ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและงานด้านอุตสาหกรรม แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นั้นยังไม่สามารถระบุจำนวนชั้นที่ชัดเจนได้เนื่องจากการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างทางกายภาพจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ที่ลักษณะอื่นเพิ่ม

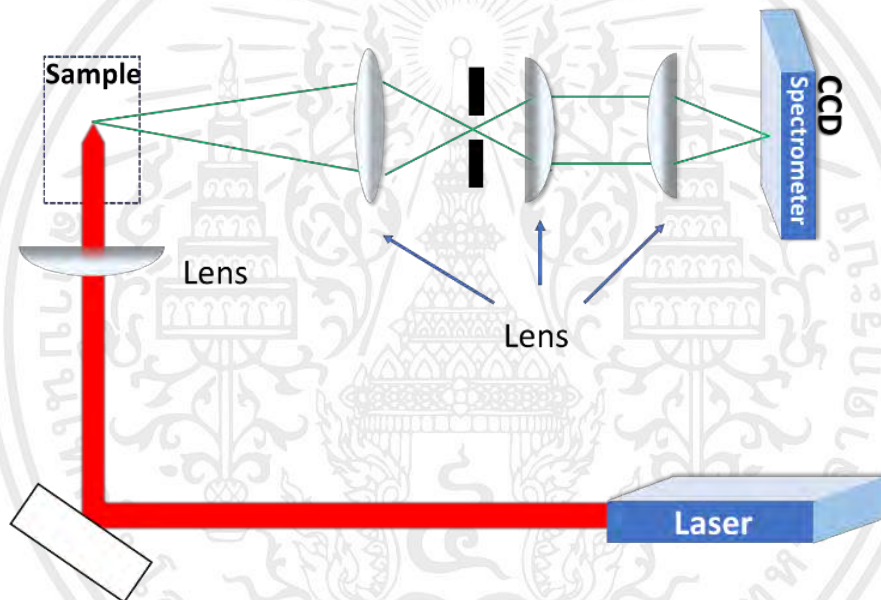


รูปที่ 2.31 แผนภาพจำลองโครงสร้างของ FE-SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 Raman Spectroscopy

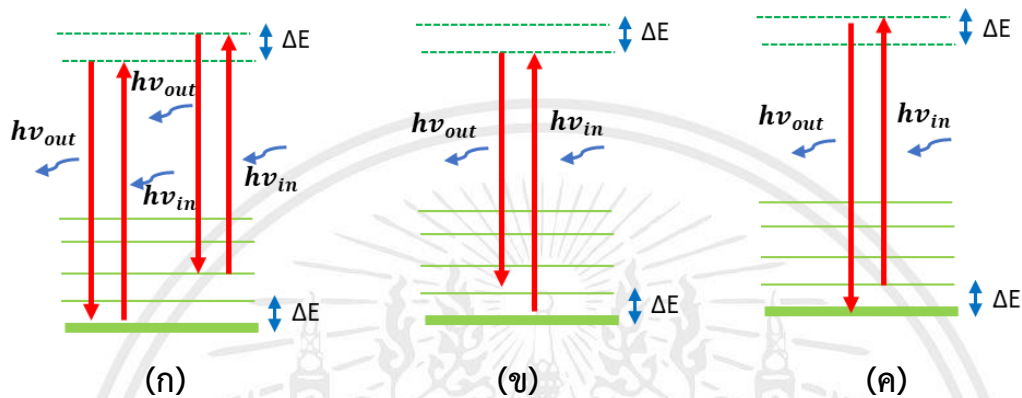
ตามที่อยู่ข้างบนนี้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและ FE-SEM เป็นเพียงการตรวจสอบลักษณะทั่วไปเชิงโครงสร้างของตัวอย่าง ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบุลักษณะตัวอย่างที่ถูกต้อง จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นประกอบด้วย โดยเลือกการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) เป็นวิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่างมีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมประเภทสารกึ่งตัวนำจำนวนมาก วิทยาศาสตร์ชีวภาพการแพทย์และด้านวัสดุศาสตร์สำหรับระบุโมเลกุลเนื่องจากแต่ละโมเลกุลมีพันธะเคมีและความสมมาตรที่เฉพาะ Raman spectroscopy นั้นทำงานบนพื้นฐานของการกระเจิงของแสงแบบรามาน (Raman scattering) ด้วยอะตอมหรือโมเลกุล โดยแผนผังจำลองระบบของ Raman Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แผนภาพจำลองระบบของ Raman Spectroscopy

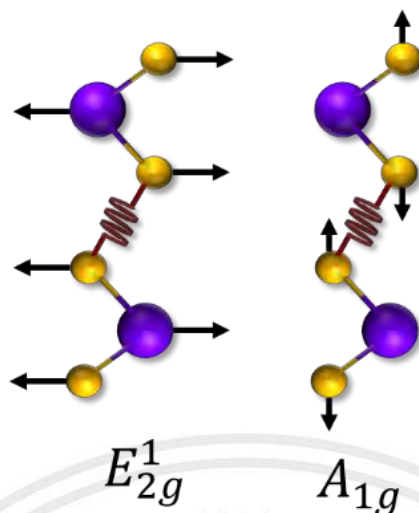
เนื่องจากขั้นตอนการผลิต Raman scattering จำเป็นต้องใช้แสงที่มีความเข้มสูงเพียงพอสำหรับแหล่งกำเนิดรามาน ทั่วไปแล้วจะใช้เลเซอร์ที่มองเห็นได้ ซึ่งสัญญาณรามานจากตัวอย่างนั้นได้มาจากการส่องลำแสงเลเซอร์บนตัวอย่าง การทำงานของ Raman Spectroscopy จะทำงานตามการกระเจิงของแสง 3 ชนิด ได้แก่ Rayleigh scattering, Stokes scattering และ anti-Stokes scattering แสดงดังรูปที่ 2.33 Rayleigh scattering เป็นการชนแบบยืดหยุ่นในการชนส่วนมากพลังงานของแสงหลังการชนจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่จะมีอนุภาคแสงส่วนน้อยที่พลังงานหลังการชนมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงพลังงานหลังการชนเรียกว่า Raman scattering เมื่อพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะเกิดการสั่นและหมุนของโมเลกุลออกมา พลังงานที่คายออกมาจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าพลังงานที่ถูกกระตุ้นเรียกว่า anti-Stokes scattering หรือน้อยกว่าพลังงานที่ถูกกระตุ้น เรียกว่า Stokes scattering แสงที่กระจัดกระจายนั้นจะถูกรวบรวมด้วยเลนส์ โดยทั่วไปนิยมวัดการเกิด Stokes scattering เนื่องจากสารจะอยู่ในสถานะพื้น ซึ่งสารแต่ละชนิดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ของแสงและให้ความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมาได้แตกต่างกัน จึงสามารถนำวิธี Raman Spectroscopy มาตรวจสอบวิเคราะห์และระบุโครงสร้างของสารได้ [42]



รูปที่ 2.33 แสดงการกระเจิงของแสงแต่ละรูปแบบ (ก) Rayleigh scattering , (ข) Stokes scattering และ (ค) Anti-Stokes scattering

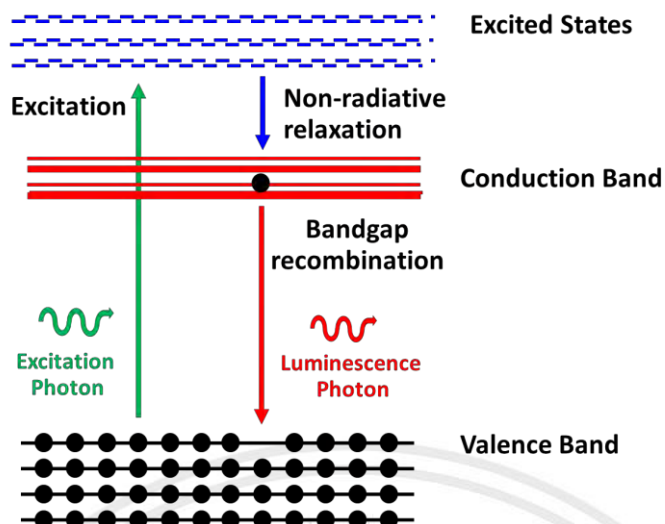
และนั่นคือเหตุผลที่วิธี Raman Spectroscopy เป็นวิธีที่เหมาะสมในการตรวจจับ การสั่นสะเทือนของโมเลกุลหรืออะตอม Stokes และ anti-Stokes วัดโหมดการสั่นของวัสดุ Raman spectrum นั้นเป็นพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างการตกกระทบและปล่อยออกมาของโฟตอน ดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้แต่ละจุดสูงสุดใน Raman spectrum แสดงถึงโหมดการสั่นสะเทือนแสดงดังรูปที่ 2.34 ซึ่ง Raman spectrum ทั่วไปของ  $\text{MoS}_2$  ในเฟส 2H จะมี 2 โหมดหลักใน Raman spectra คือ  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  โดยผลต่างระหว่างจุดสูงสุดทั้ง 2 จุด ( $\Delta k$ ) นั้นเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกความหนา ของชั้นตัวอย่าง  $\text{MoS}_2$  โดยชั้นที่บางที่สุดของ  $\text{MoS}_2$  มีระยะห่างระหว่างจุดสูงสุด 2 จุดน้อยที่สุดโดย  $\Delta k$  อยู่ในช่วง  $16-20 \text{ cm}^{-1}$  บ่งบอกถึงความหนาจำนวน 1 ชั้นของ  $\text{MoS}_2$  และระยะห่างระหว่าง จุดสูงสุดทั้ง 2 จุดจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจุดสูงสุด  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  สอดคล้องกับการสั่นสะเทือนในระนาบของอะตอม Mo และ S และการสั่นสะเทือนนอกระนาบของ อะตอม S ตามลำดับ



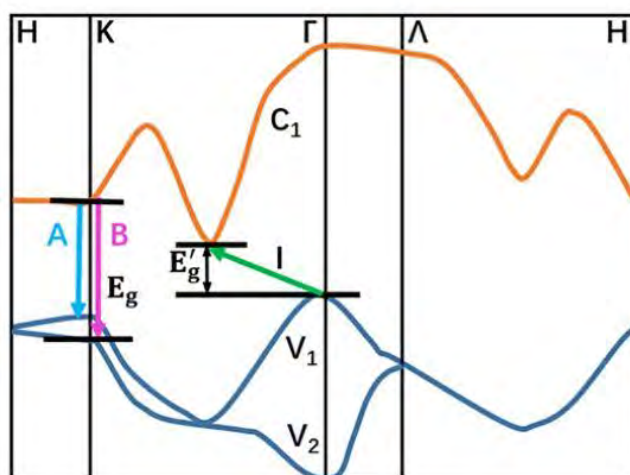
รูปที่ 2.34 แสดงโหมดการสั่นใน  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  ของ  $\text{MoS}_2$

#### 2.7.4 Photoluminescence spectroscopy

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Photoluminescence spectroscopy (PL) นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติทางแสง ทางเคมี โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุและยังสามารถบ่งชี้ชนิดของสารได้อีกด้วย โดย PL นั้นเป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงหรือการปล่อยโฟตอนอีกครั้งหลังจากวัสดุดูดกลืนแสงตกกระทบ เมื่อแสงตกกระทบนั้นไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในวัสดุให้อยู่ในสถานะพลังงานที่สูงขึ้นในขณะที่อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น พลังงานที่ปล่อยออกมามากเกินไปอาจเกิดจากการฉายแสงหรือกระบวนการที่ไม่มีการแผ่รังสีหรือที่เรียกว่าการระบายความร้อน พลังงานของแสงที่ปล่อยออกมาบ่งบอกถึงความแตกต่างของพลังงานระหว่างสถานะพื้นและระดับพลังงานกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 2.35 ซึ่งหลักการทำงานของ PL spectroscopy นั้นเป็นการวัดค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาจะบ่งบอกถึงช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุโดยในการตรวจสอบตัวอย่าง  $\text{MoS}_2$  จะมีสถานะกระตุ้น 2 สถานะ ได้แก่ สถานะกระตุ้น A และสถานะการกระตุ้น B โดยจุดสูงสุดที่สถานะกระตุ้น A ปรากฏจะบ่งบอกถึงช่องว่างแถบพลังงานของตัวอย่างโดยทั่วไปจะปรากฏอยู่ในช่วง 1.2-1.9 eV และจุดสูงสุดที่สถานะการกระตุ้น B ปรากฏจะบ่งบอกถึงสถานะอันตรกิริยาของสปิน ออร์บิทัล (spin orbital) ที่จุด K-valleys ซึ่งจะอยู่ในระดับพลังงานสูงกว่าสถานะกระตุ้น A [43] แสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 แสดงกระบวนการ Photoluminescence ในช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์

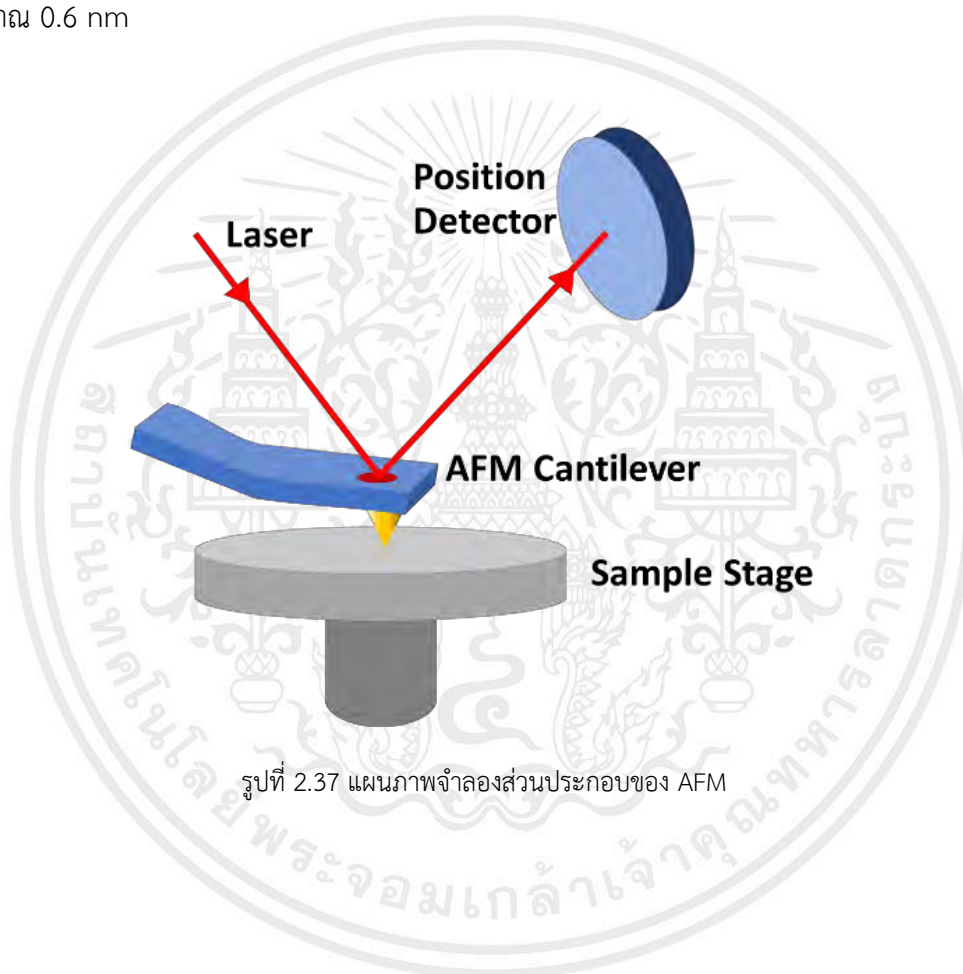


รูปที่ 2.36 แสดงช่องว่างแถบพลังงานของ  $\text{MoS}_2$  ที่ปรากฏสถานะกระตุ้น A และสถานะกระตุ้น B [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.5 Atomic force microscopy

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy : AFM) นั้นเป็นวิธีที่นิยมในการด้านวัสดุศาสตร์สามารถนำมาใช้วิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานของวัสดุ พื้นผิว และความหนาของวัสดุ หลักการทำงานของ AFM นั้นจะวัดตัวอย่างด้วยหัวเข็มขนาดเล็กระดับนาโน โดยจะลากหัวเข็มผ่านพื้นผิววัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่วิเคราะห์ได้นั้นจะให้ผลเป็นภาพ 2 มิติ และ 3 มิติ ภาพที่ได้จะแสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุและสามารถนำภาพไปวิเคราะห์หาระดับความสูงต่ำของวัสดุได้ ส่วนประกอบของ AFM [44] แสดงดังรูปที่ 2.37 โดย MoS<sub>2</sub> ชั้นเดียวนั้นมีความสูงที่ประมาณ 0.6 nm

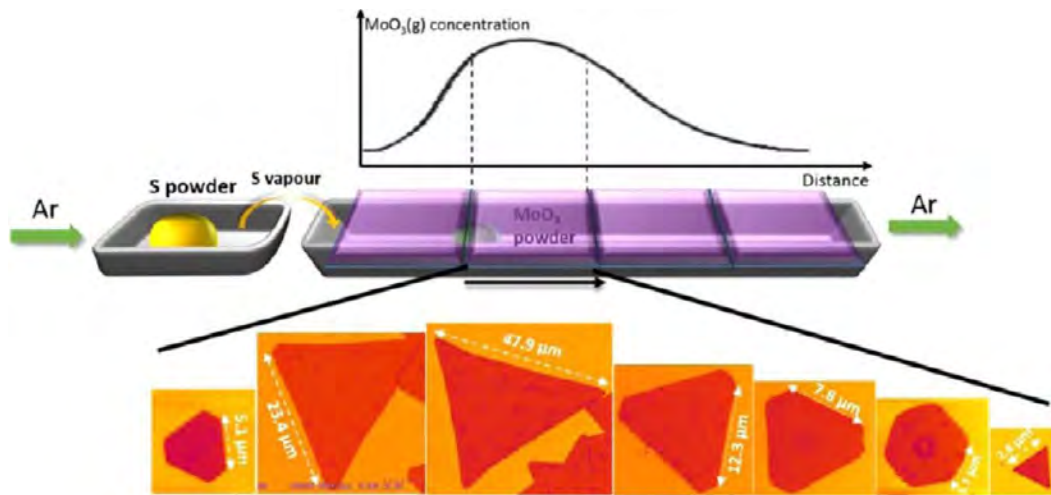


รูปที่ 2.37 แผนภาพจำลองส่วนประกอบของ AFM

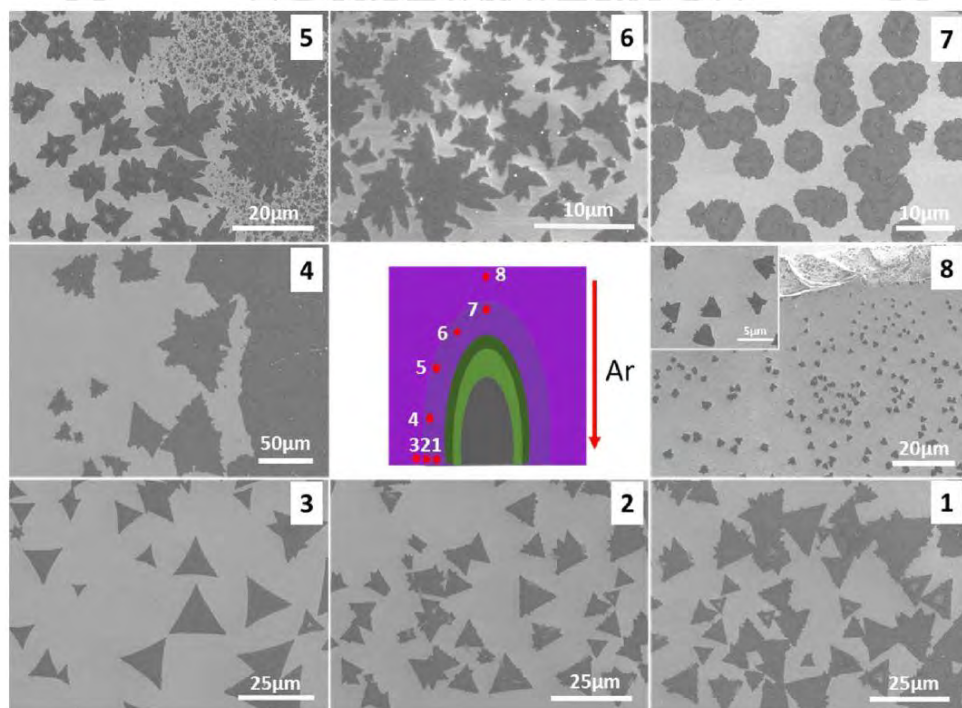
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก่อนหน้านี้นี้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ด้วยเทคนิค CVD ใช้  $\text{MoO}_3$  เป็นสารตั้งต้นของ Mo โดย Shanshan Wang และคณะ ได้มีการรายงานเกี่ยวกับวิวัฒนาการของรูปทรงที่เปลี่ยนไปของผลึก  $\text{MoS}_2$  จากบริเวณที่แตกต่างกันบนตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.38 รายงานว่ารูปทรงที่เปลี่ยนไปของผลึก  $\text{MoS}_2$  นั้นเกิดจากอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น Mo : S ที่เปลี่ยนไปในตำแหน่งของ substrate (Si substrates) ที่ห่างออกไปจากสารตั้งต้นตามทิศทางกระแสไหลของแก๊ส การเกิดสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น Mo : S ที่เหมาะสมและในทางกลับการเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น Mo : S ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดผลึก  $\text{MoS}_2$  รูปทรงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่ถูกตัดทอน นอกจากนี้ยังมีการรายงานเกี่ยวกับอุณหภูมิที่มีผลต่อรูปทรงของผลึกเนื่องจากการลดหรือเพิ่มอุณหภูมินั้นส่งผลต่ออัตราการระเหยของสารตั้งต้นดังนั้นจึงส่งผลต่ออัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น Mo : S ทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีรูปทรงที่เปลี่ยนไป จากที่มีการรายงานมาข้างต้นนั้นอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่ออัตราการระเหยของสารตั้งต้นดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเป็นการเติบโตภายใต้สภาวะอุณหพลศาสตร์ นอกจากนี้อุณหภูมิที่มีผลต่อรูปทรงของผลึกแล้วยังพบว่าอัตราการไหลของแก๊สยังส่งผลต่อรูปทรงของผลึกอีกด้วย Shanshan Wang และคณะ ได้มีการรายงานเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเติบโตของผลึกภายใต้อัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 10 sccm เป็น 100 sccm พบว่าผลึกนั้นมีข้อบกพร่องขึ้นเป็นจำนวนมากแสดงดังรูปที่ 2.39 โดยข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นได้รับรายงานเกี่ยวกับสาเหตุที่เกิดขึ้นว่าเกิดจากการสูญเสียความเสถียรระหว่างการเติบโตของผลึกที่มีผลมาจากอัตราการไหลของแก๊สที่สูงขึ้นไปเพิ่มอัตราการเติบโตของผลึก ในกรณีนี้อาจเกิดเนื่องจากอะตอมมีเวลาไม่เพียงพอที่จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งโครงสร้างผลึก (lattice) ที่ถูกต้อง ดังนั้นภายใต้สภาวะที่มีอัตราไหลของแก๊สสูง ผลึก  $\text{MoS}_2$  จึงมีแนวโน้มที่จะเติบโตภายใต้สภาวะจลน์มากกว่าแบบอุณหพลศาสตร์ [45]



รูปที่ 2.38 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ด้วยเทคนิค CVD และวิวัฒนาการของรูปทรงผลึก  $\text{MoS}_2$  ที่เปลี่ยนไป [45]



รูปที่ 2.39 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงวิวัฒนาการของรูปทรง  $\text{MoS}_2$  [45]

นอกจากรายงานเกี่ยวกับวิวัฒนาการของผลึก  $\text{MoS}_2$  แล้วยังมีรายงานเกี่ยวกับการจัดวาง substrate ในแนวทางที่แตกต่างกัน Ayberk Özden และคณะได้รายงานเปรียบเทียบแนวทางการจัดวาง substrate ที่ใช้กันโดยทั่วไปคือการเติบโตในแนวนอนและการเติบโตแบบคว่ำหน้าภายใต้สภาวะการเติบโตที่เหมือนกัน จากผลการวิจัยนั้นรายงานว่า การวางแบบคว่ำหน้าผลึก  $\text{MoS}_2$  ที่ได้จะมีขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่กว่าการวางแบบแนวนอนที่มีขนาดเล็กมาก การวางคว่ำหน้านอกจากผลึก  $\text{MoS}_2$  ที่ได้จะมีขนาดใหญ่แล้วยังปรากฏฟิล์มต่อเนื่องขนาดใหญ่ Ayberk Özden และคณะยังรายงานการวางแบบคว่ำหน้านั้นสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของผลึก  $\text{MoS}_2$  ได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง  $\text{S}:\text{MoO}_3$  ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของไอกามะถันและ  $\text{Mo}$  ในบริเวณเขตพื้นที่การเกิดของ  $\text{MoS}_2$  มีความสำคัญมากในการควบคุมรูปร่าง, ขนาดและความสม่ำเสมอของฟิล์ม [46]

Jiadong Cheng และคณะ ได้รายงานเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณ  $\text{MoO}_3$  และความสูงของช่องว่างอย่างเป็นระบบต่อความเข้มข้นและการกระจายตัวของสารตั้งต้น  $\text{Mo}$  ค้นพบว่าปัจจัยดังกล่าวนี้มีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาทางอุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ในการเติบโตของ  $\text{MoS}_2$  โดยพบว่าฟลักซ์ที่สูงของ  $\text{Mo}$  ที่ใช้นั้นส่งผลต่อการแพร่กระจายในขณะที่ฟลักซ์ต่ำนั้นส่งผลโดดเด่นต่อการครอบคลุมพื้นผิวในพื้นที่ขนาดใหญ่ [47]

จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ มีการรายงานเกี่ยวกับการพยายามที่จะปลูกฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ที่มีความหนา 1 ชั้นแบบต่อเนื่องให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่และเป็นเนื้อเดียวกัน Santhosh Durairaj และคณะ ได้รายงานว่าฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวแบบต่อเนื่องในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันทำได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งพื้นผิวในการสะสมไอเชิงเคมีและการใช้สิ่งกีดขวางทางกลนั้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมความเข้มข้นของไอ  $\text{Mo}$  ที่ตำแหน่งพื้นผิวและการทำให้ได้ฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ฟิล์มเดี่ยวที่เป็นเนื้อเดียวกันที่มีคุณภาพทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์สูง [48]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์วัสดุ  $\text{MoS}_2$  ด้วยเทคนิค CVD แล้วตรวจสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุ โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์

##### 3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปากกาหัวเพชร
- 2) เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner)
- 3) แหนบ/ทวิสเซอร์ (Tweezer)
- 4) ซ้อนตวงสาร
- 5) อลูมิเนียมฟอยล์
- 6) เครื่องชั่งสาร
- 7) ภาชนะควอตซ์ (Quartz boat)
- 8) ภาชนะอลูมินา (Alumina boat)
- 9) เครื่องสังเคราะห์ไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD)
- 10) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
- 11) กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดพิวอิมิชชัน (Field-Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)
- 12) รามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)
- 13) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM)

##### 3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) 300 nm thermal oxide Si / $\text{SiO}_2$  wafer
- 2) โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (Molybdenum dioxide:  $\text{MoO}_2$ )
- 3) กำมะถัน (S)
- 4) แก๊สอาร์กอน ( $\text{Ar}_2$ )
- 5) อะซิโตน (Acetone)
- 6) เมทานอล (Methanol)
- 7) แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

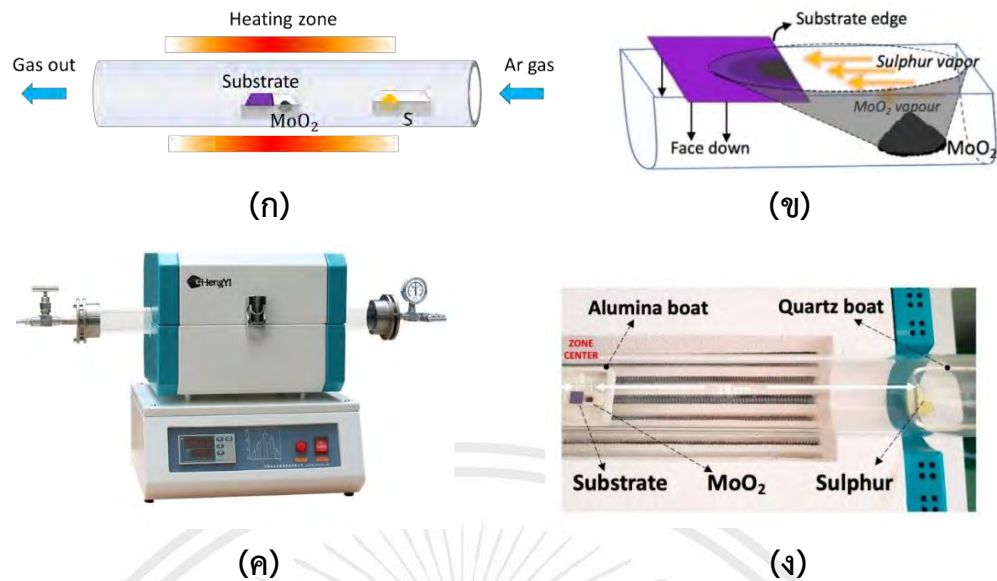
## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การตัดและล้างทำความสะอาด substrate

Substrate ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คือ 300 nm thermal oxide Si /SiO<sub>2</sub> wafer โดยจะตัดด้วยปากกาหัวเพชรให้มีขนาดประมาณ 10 mm×10 mm จากนั้นทำความสะอาด substrate ที่ตัดด้วยอะซิโตนภายในเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก หลังจากนั้นล้างอะซิโตนออกโดยใช้เมทานอลภายในเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 1 นาที ขั้นตอนสุดท้ายของการทำความสะอาดจะนำ substrate ที่ล้างเรียบร้อยแล้วไปเป่าให้แห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจน (ความบริสุทธิ์ 99.999%) เพื่อตรวจสอบว่า substrate ที่ล้างนั้นสะอาดพร้อมที่จะไปใช้จะนำ substrate ไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

### 3.2.2 การสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> ด้วยเทคนิค CVD

การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD เป็นวิธีทั่วไปสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์ม MoS<sub>2</sub> วิธีนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจเพราะสามารถผลิตวัสดุ 2 มิติ MoS<sub>2</sub> ได้พื้นที่ขนาดใหญ่และมีคุณภาพสูง งานวิจัยนี้จะใช้ CVD เต้าเผาโซนเดียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 50 mm ในการสังเคราะห์ MoS<sub>2</sub> สารตั้งต้นที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้สารตั้งต้นเป็นสารเคมี 2 ชนิดได้แก่ MoO<sub>2</sub> (ความบริสุทธิ์ 99.5%, Alfa Aesar) และ S (ความบริสุทธิ์ 99.5%, Alfa Aesar) โดยจะชั่งน้ำหนักแล้วใส่ลงในภาชนะแยกกันโดยสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub> จะใส่ลงในภาชนะอลูมินา (ขนาด 26 mm x 8 mm x 7 mm) ส่วนสารตั้งต้น S จะใส่ลงในภาชนะควอตซ์หลังจากเตรียมสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดใส่ลงในภาชนะเรียบร้อยแล้วขั้นตอนถัดไปจะนำ substrate ที่ผ่านการทำความสะอาดมาวางลงในภาชนะเดียวกันกับสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub> โดยจะวาง substrate คว่ำหน้าลงแล้ววางเหนือถัดไปจากสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub> ระยะห่างประมาณ 1 cm แสดงดังรูปที่ 3.1 (ข) จากนั้นจะใส่ลงในท่อบริเวณกลางเต้าเผาหลังจากนั้นจะใส่ S ตามเข้าไปในท่อโดยจะวางในตำแหน่งบริเวณที่แก๊สเข้าระยะห่างระหว่างสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub> และ S ระยะประมาณ 18 cm โดยแก๊สที่ใช้คือแก๊สอาร์กอน (ความบริสุทธิ์ 99.999%) แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก,ค)



รูปที่ 3.1 แสดงภาพการทดลอง (ก) แสดงแบบจำลองภายในท่อเตาเผา CVD (ข) แสดงแบบจำลองรูปแบบของการปลูก  $\text{MoS}_2$  (ค) CVD Single-zone (ง) ภาพถ่ายแสดงการจัดวางสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดภายในท่อเตาเผา CVD

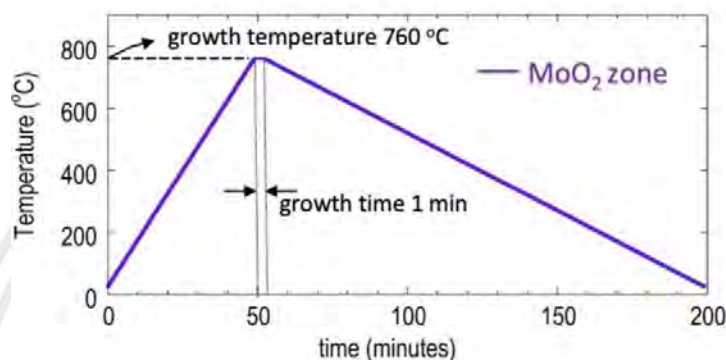
ก่อนเริ่มให้ความร้อนกับเตาเผาจะกำจัดแก๊สออกซิเจนภายในท่อโดยใช้แก๊สอาร์กอนภายใต้อัตราการไหลของแก๊ส 2000 sccm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สตามเงื่อนไขในการทดลองแล้วเริ่มให้ความร้อนกับเตาเผา งานวิจัยนี้จะทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  ให้มีคุณภาพที่ดีและมีความหนา 1 ชั้นขนาดใหญ่โดยจะกำหนดเงื่อนไขในการทดลองดังต่อไปนี้

#### 1) ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในปลูก $\text{MoS}_2$

กำหนดตัวแปรคงที่ดังนี้ปริมาณสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดโดยใช้สารตั้งต้น  $\text{MoO}_2$  3 mg และ S 10 mg ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สต่ำสุดที่ 10 sccm ใช้เวลาในการเผา 1 นาที ซึ่งอัตราการเพิ่มอุณหภูมิความร้อนให้กับเตาเผาอยู่ที่  $15^\circ\text{C}/\text{min}$  จะใช้เวลาประมาณ 50 นาทีที่อุณหภูมิ  $760^\circ\text{C}$  และโดยทั่วไปนั้นกัมมะถันจะระเหยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ  $180^\circ\text{C}$  หลังจากอุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดไว้แล้วภายหลังการเผาครบ 1 นาทีก็จะปล่อยให้อุณหภูมิเย็นตัวลงไปจนถึงอุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 3.2(ข) กำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

Gas Flow Rate	Variable; 10-2000 sccm
Gas Type	Ar, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
Sample position w.r.t MoO <sub>2</sub> source	Variable; 0-3 cm
Growth time	Variable; 1-30 min
Precursor Amount MoO <sub>2</sub>	Variable; 1-30 mg
Precursor Amount S	Variable; 1-500 mg

(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการทดลอง (ก) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (ข) กราฟแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

- 2) ผลของอุณหภูมิที่ใช้กับกำมะถัน
- 3) ผลของปริมาณสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub>
- 4) ผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้น
- 5) ผลของเวลาในปลุก MoS<sub>2</sub>
- 6) ผลของอัตราการไหลของแก๊ส
- 7) ผลของการกระจายสารตั้งต้น

### 3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของ MoS<sub>2</sub>

เพื่อการตรวจสอบคุณลักษณะของ MoS<sub>2</sub> เบื้องต้นสามารถตรวจสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (CX-40M microscope from Ningbo Sunny Instruments, Co., Ltd., Yuyao, China) ซึ่งจะใช้สำหรับถ่ายภาพของ MoS<sub>2</sub> และประเมินลักษณะโดยทั่วไป แล้วตรวจสอบคุณลักษณะระดับนาโนเพื่อยืนยันคุณภาพของ MoS<sub>2</sub> ด้วย micro-Raman spectra (Horiba LabRAM HR Evolution confocal Raman system) โดยใช้เลเซอร์แสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่นกระตุ้น 532 nm, Atomic Force Microscopy (AFM5500M system from Hitachi) ตรวจสอบความสูงของตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ Field-Emission Scanning Electron Microscope (SU8030 from Hitachi) ตรวจสอบ  
ลักษณะพื้นผิวของ  $\text{MoS}_2$



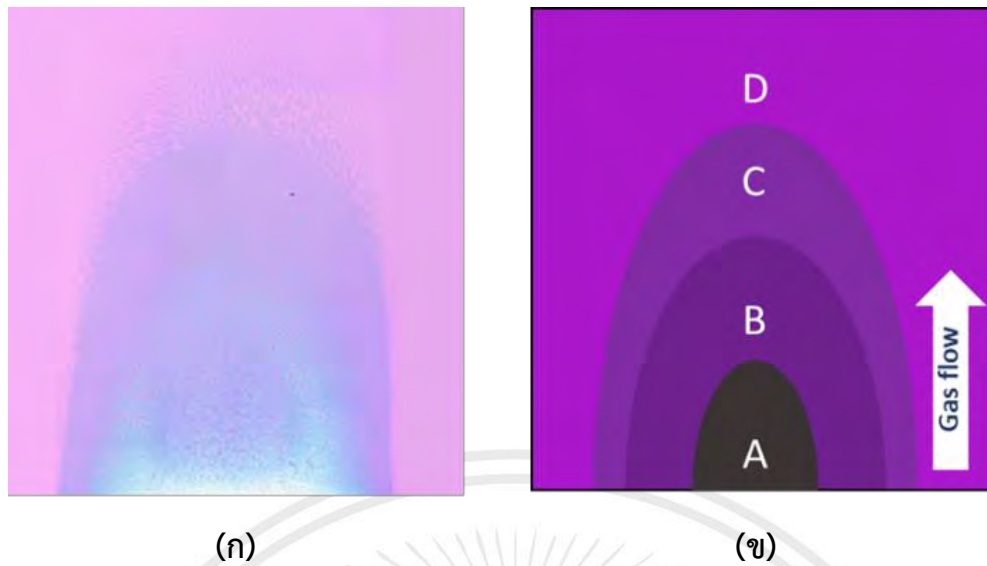
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดลอง

ปริมาณของ Mo มีผลสำหรับการเกิดนิวคลีเอชัน (Nucleation) และการก่อตัวของโดเมนที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเติบโตของ  $\text{MoS}_2$  ในขณะที่การกระจายตัวของเฟสแก๊ส S โดยทั่วไปทำด้วยวิธีการรักษากระยะห่างแหล่งกำเนิด S และสารตั้งต้น Mo สำหรับการปลูก (~18 cm ในการทดลอง) โดยทั่วไปแหล่งกำเนิด Mo จะถูกวางไว้ใกล้กับ substrate ส่งผลให้มีการกระจายความหนาแน่นตามทิศทางของแก๊สแสดงดังรูปที่ 4.1(ก)(ข) จะเห็นได้ว่าการไล่ระดับความหนาแน่นที่ลดลงบนพื้นผิวของ substrate เมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิด Mo เพิ่มขึ้นและรูปแบบการไล่ระดับความหนาแน่นนั้นมีลักษณะเป็นโซนการเกิด  $\text{MoS}_2$  แบบพาราโบลาที่ชัดเจนซึ่งมักพบในการทดลอง [25,45,47,49,50] รูปที่ 4.1(ก) การต่อภาพแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการก่อตัวของขอบเขตการเกิดที่มีรูปทรงพาราโบลาที่มีการเกิดแตกต่างกัน 4 โซน A ถึง D ซึ่งทำเครื่องหมายด้วยเส้นประ โซน A ซึ่งใกล้กับขอบ substrate มากที่สุดถูกปกคลุมด้วยวัสดุสีขาวที่มีลักษณะค่อนข้างหนา โซน B นั้นมีส่วนผสมของวัสดุสีขาวและโครงสร้างนาโนที่มีลักษณะเป็นแท่ง แล้วในส่วนโซน C เมื่อพิจารณาจากความเข้มทางแสงที่สม่ำเสมอแสดงถึงความหนาของชั้นเพียงชั้นเดียวของ  $\text{MoS}_2$  และในโซน D ถูกปกคลุมด้วยการก่อตัวของโดเมน  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียว โดยการไล่ระดับความหนาแน่นนั้นหมายความว่าอัตราส่วนระหว่าง Mo : S นั้นแตกต่างกันไปตามระยะของ substrate เพิ่มความน่าจะเป็นของวิวัฒนาการทางสัณฐานวิทยา [51] แล้วยังมีการก่อตัวของออกซีสัลไฟด์ (Oxysulfide) [25,50,48,53-55] และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโดเมน  $\text{MoS}_2$  [45] โดยมีปัจจัยในการทดลอง เช่น ปริมาณสารตั้งต้น, อัตราการไหลของแก๊ส, ตำแหน่งของสารตั้งต้นที่สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิด  $\text{MoO}_3$ , อุณหภูมิของการปลูกและอาจเป็นการกระจายตัวของสารตั้งต้น  $\text{MoO}_3$  ซึ่งทั้งหมดมีผลกระทบต่อฟลักซ์ Mo ที่พาไปยังพื้นผิว substrate



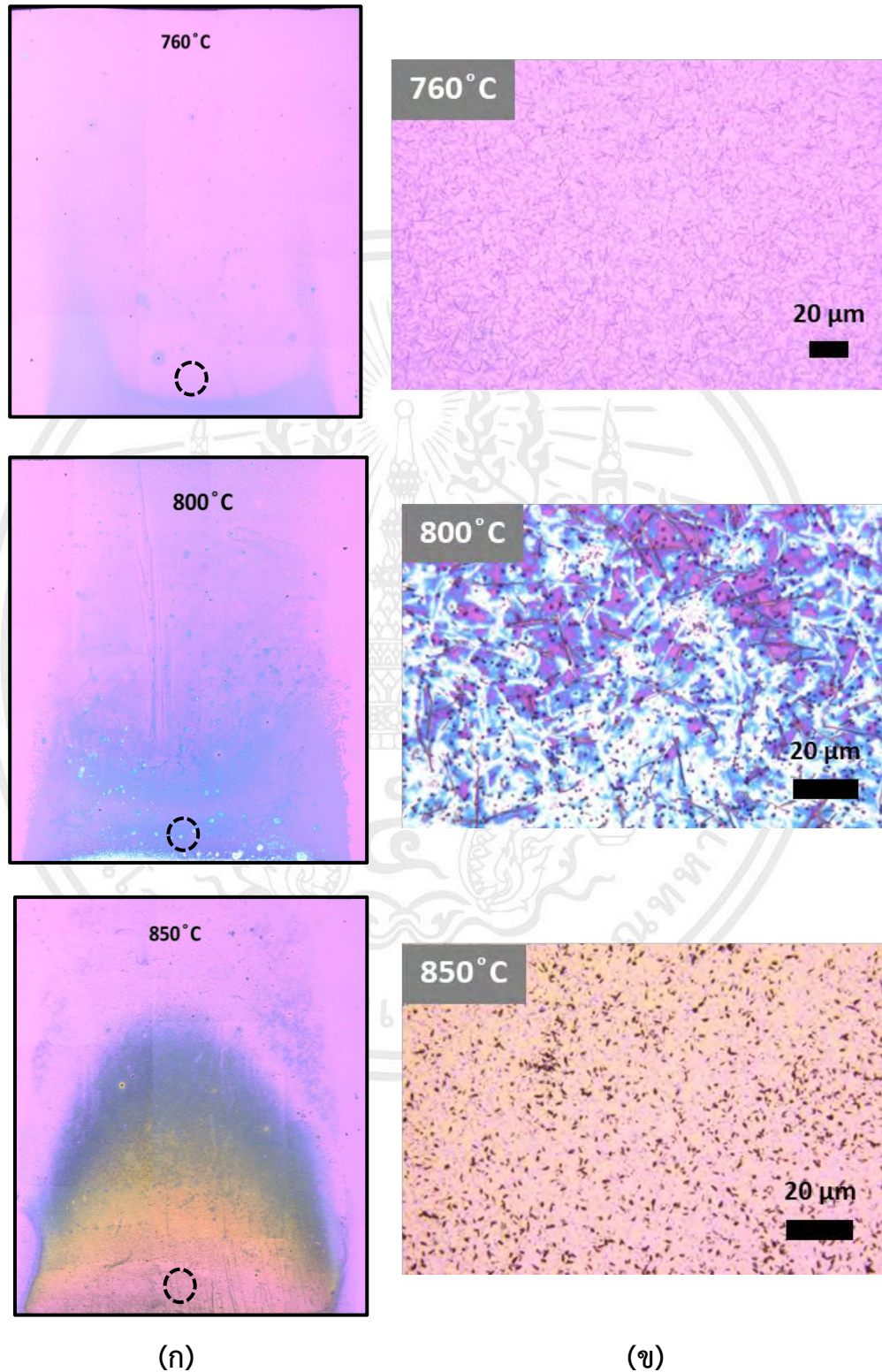
รูปที่ 4.1 (ก) ตัวอย่างภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะการเกิดของ MoS<sub>2</sub> (ข) ภาพจำลองแสดงการกระจายตัวไล่ระดับความหนาแน่นบนพื้นผิว substrate

#### 4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูก MoS<sub>2</sub>

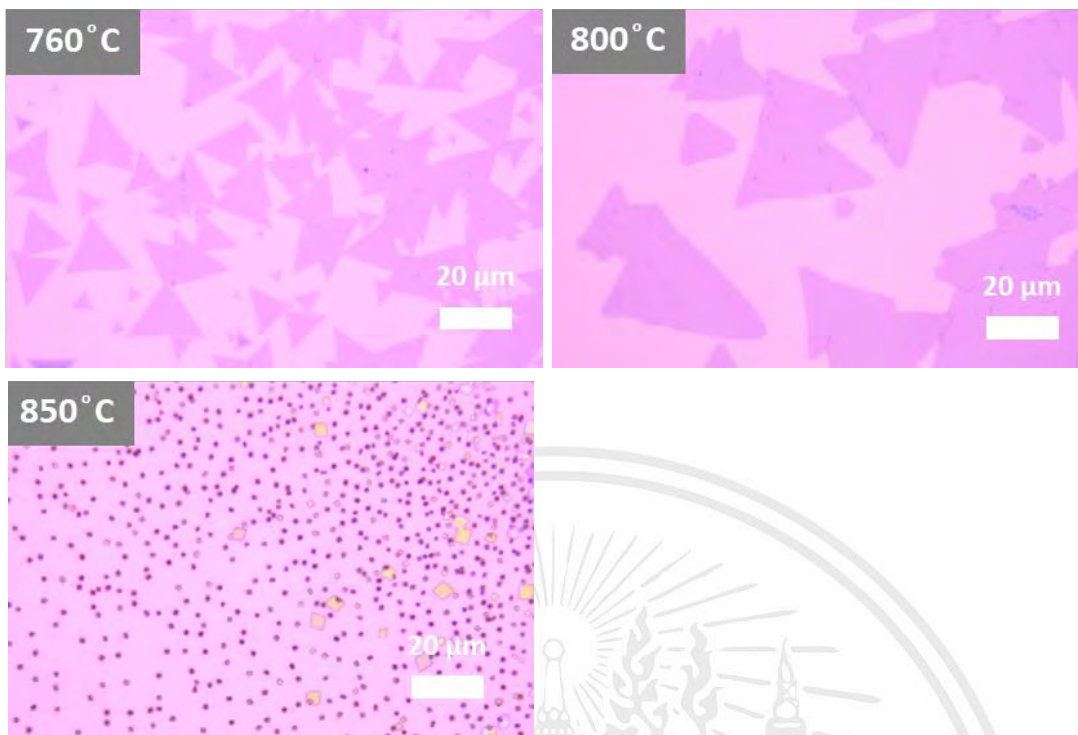
จากรูปแบบการไล่ระดับความหนาแน่นและวิวัฒนาการทางสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นดังกล่าว นั้น มีการทดลองโดยใช้สารตั้งต้น MoO<sub>3</sub> นั้น คาดหวังรูปแบบการเกิดที่เป็นไปในทางเดียวกัน โดยมีการทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกที่แตกต่างกันเพื่อยืนยันเกี่ยวกับวิวัฒนาการและรูปแบบในการเกิด เริ่มทดลองที่อุณหภูมิ 600 °C แล้วเพิ่มสูงสุดที่ 850 °C แล้วกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ MoO<sub>3</sub> 3 mg, S 10 mg ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สต่ำสุด 10 sccm และใช้ระยะเวลาในการปลูก 1 นาที จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิเย็นตัวลงเข้าสู่อุณหภูมิห้อง แม้ว่าเราจะไม่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเกิด MoS<sub>2</sub> อย่างครอบคลุมในเวลานี้ แต่เราพบว่าการลดอุณหภูมิต่ำกว่า 700 °C ส่งผลให้ได้ผลผลิต MoS<sub>2</sub> ต่ำโดยไม่มี การสร้างรูปแบบการไล่ระดับการเกิด ซึ่งรูปแบบการเกิดไล่ระดับความหนาแน่นนั้นพบได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 760 °C แสดงดังรูปที่ 4.2(ก) อย่างไรก็ตามสำหรับอุณหภูมิการปลูกที่สูงกว่า 800 °C เราพบว่าเกิดรูปแบบการไล่ระดับความหนาแน่นที่มีความหนาและไม่เท่ากันตลอดบริเวณที่มีการเกิด monolayer MoS<sub>2</sub> และสิ่งที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนคือมีความหนาแน่นของชั้นเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยสามารถเห็นความแตกต่างของความหนาแน่นได้ชัดเจนขึ้นจากภาพขยายบริเวณเดียวกันทั้ง 3 กรณี (บริเวณวงกลมประ) แสดงดังรูปที่ 4.2(ข) จากนั้นมาให้ความสนใจเกี่ยวกับโดเมนเมื่อตรวจสอบการเกิดของโดเมนของทั้ง 3 กรณีพบว่าที่อุณหภูมิ 760 °C นั้นเกิดโดเมนสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์ที่สุด แต่พบว่าที่อุณหภูมิ 850 °C นั้นไม่เกิดการเติบโตของโดเมนสามเหลี่ยมมีเพียงการเกิดนิวเคลียสและการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ชั้นกลาง MoOS<sub>2</sub> (รูปสี่เหลี่ยม) เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4.3 จากผลที่ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดของโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่สุดคือ อุณหภูมิ  $760^\circ\text{C}$  เราจึงเลือกใช้อุณหภูมิการปลูกนี้ในการทดลอง



รูปที่ 4.2 (ก) แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะการเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 760, 800 และ  $850^\circ\text{C}$  (ข) ภาพขยายบริเวณวงกลมประจําเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



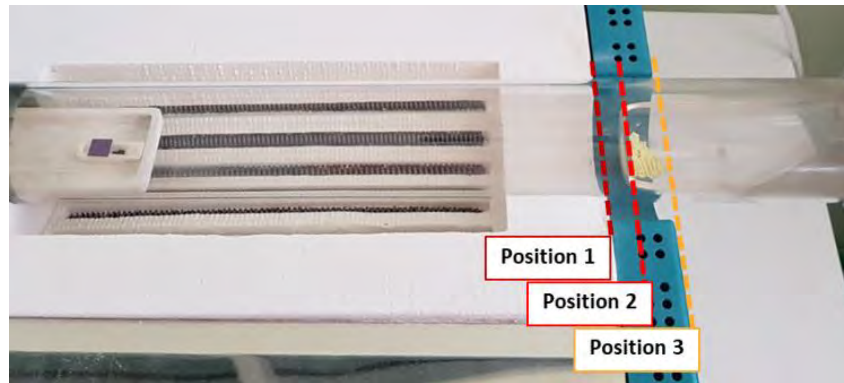
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายรูปทรงการเกิดของโดเมน  $\text{MoS}_2$  จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่อุณหภูมิ 760, 800 และ  $850^\circ\text{C}$

#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กับกำมะถัน

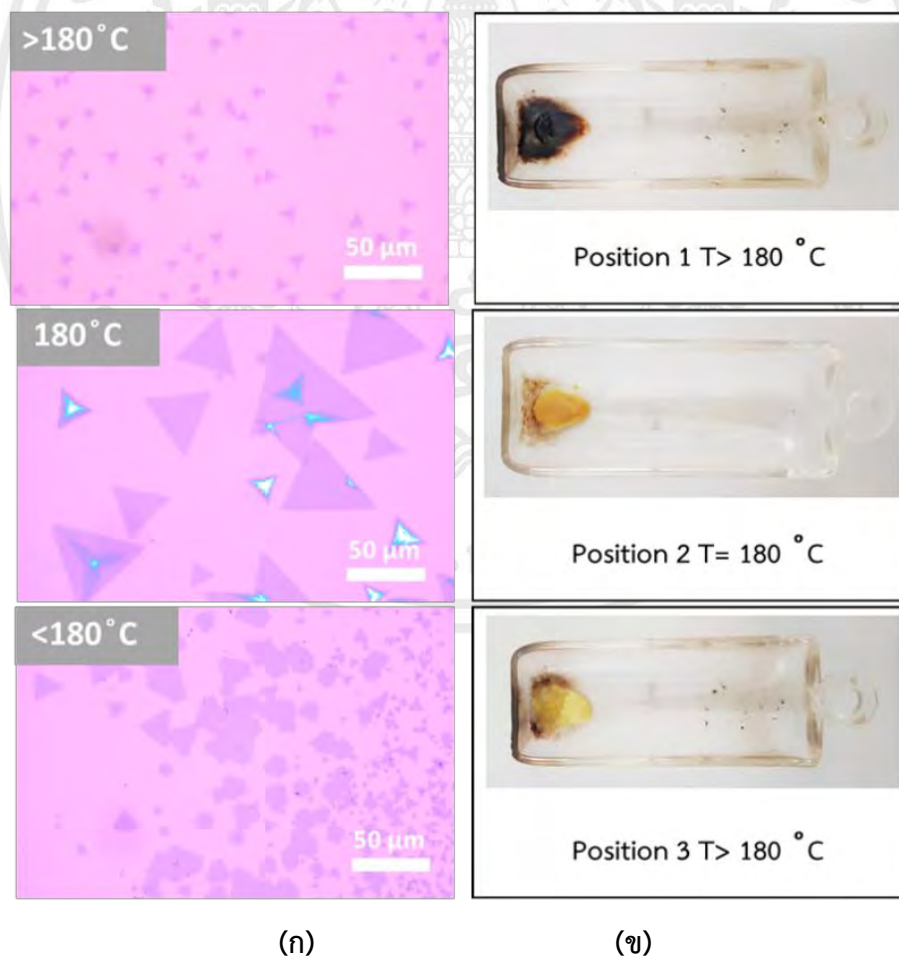
จากการทดลองก่อนหน้าเป็นการทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกที่ต่างกันซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความต่างกันอย่างชัดเจน เพื่อพิสูจน์เกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้มีผลต่อการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  จึงมีการทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้กับกำมะถันแต่เนื่องจากเตาเผาที่ใช้มีเพียงโซนเดียวจึงทดลองโดยวางกำมะถันทั้งหมด 3 ตำแหน่งแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยในการทดลองเลือกใช้อุณหภูมิในการเติบโต  $760^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดโดเมนสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์ที่สุดและกำหนดตัวแปรอื่นๆคงที่ หลังจากการทดลองพบว่าสีของกำมะถันนั้นมีสีที่ต่างกันทั้ง 3 กรณีและการเกิดของโดเมนก็มีลักษณะแตกต่างกันโดยตำแหน่งที่เกิดโดเมนสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์ที่สุดคือตำแหน่งที่ 2 สีของกำมะถันมีสีเหลืองเข้มเมื่อสังเกตตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่วางไว้ด้านในใกล้กับโซนความร้อนมากที่สุดสีของกำมะถันนั้นมีสีน้ำตาลเกือบดำ การเกิดของโดเมนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมขนาดเล็กเนื่องอุณหภูมิที่ได้ในตำแหน่งนี้สูงเกินไปและในตำแหน่งที่ 3 ซึ่งวางอยู่ห่างจากโซนให้ความร้อนที่สุดกำมะถันมีสีเหลืองอ่อน การเกิดของโดเมนมีหลายรูปร่างเกิดขึ้นได้แก่รูปสามเหลี่ยมขนาดเล็ก, รูปสามเหลี่ยมขนาดใหญ่, รูปสามเหลี่ยมถูกตัดทอนและรูปหกเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.5 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากำมะถันไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาทำให้โดเมนที่ได้มีลักษณะไม่สมบูรณ์ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติกำมะถันจะระเหยได้ดีที่อุณหภูมิ 160-180 °C โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการทดลองเกี่ยวกับสีของกำมะถันที่อุณหภูมิต่างๆดังนี้ สีแดงเข้ม  $T > 180$  °C, สีเหลืองเข้ม  $T = 180$  °C และสีเหลืองอ่อน  $T < 180$  °C



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายแสดงตำแหน่งการวางกำมะถัน 3 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายรูปทรงการเกิดของโดเมน  $\text{MoS}_2$  จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและสีของกำมะถัน

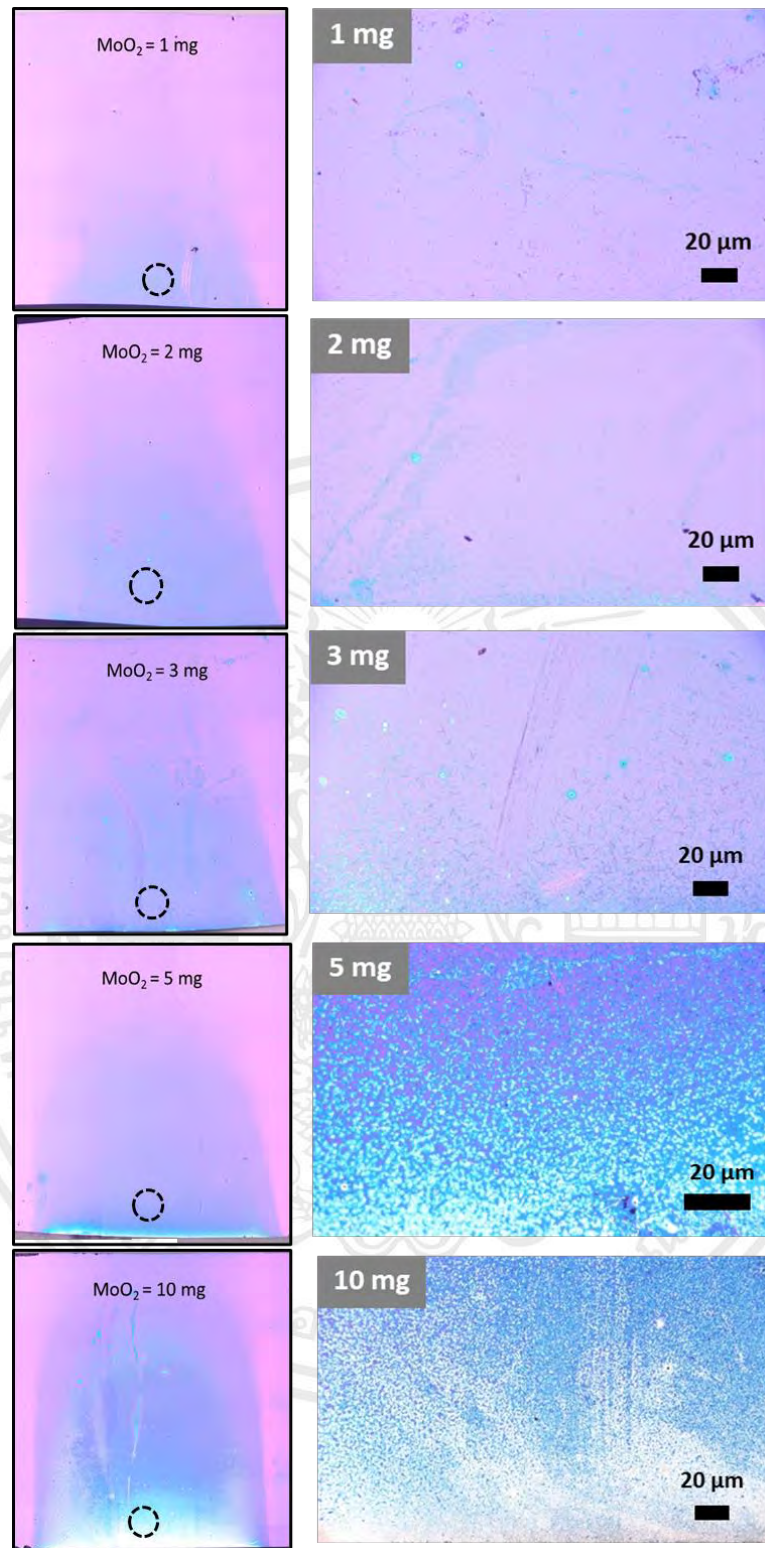
ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 ผลของปริมาณสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub>

จากการทดลองก่อนหน้าจะเห็นว่าปริมาณของสารตั้งต้นนั้นมีความสำคัญต่อการเกิดของโดเมน MoS<sub>2</sub> เพื่อแสดงความสำคัญของพลักซ์ Mo จึงทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณ MoO<sub>2</sub> ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สคงที่ 100 sccm การแพร่กระจายของไอ MoS<sub>2</sub> จากแหล่งกำเนิดไปยัง substrate สามารถหาปริมาณได้โดยใช้วิธีแก้ปัญหาร่วมกับสมการการแพร่กระจาย [56]

$$n(x, t) = n(0, t) \exp \left[ -\frac{x^2}{4Dt} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่  $t$  คือเวลา,  $D$  คือค่าคงที่การแพร่กระจาย,  $n(0, t)$  และ  $n(x, t)$  คือความเข้มข้นชนิดของแก๊สที่แหล่งกำเนิดและระยะห่าง  $x$  จากแหล่งกำเนิดตามลำดับ หลักฐานของการพึ่งพา  $n(0, t)$  สามารถดูได้จากผลการทดลองผลเจริญการเติบโตที่แสดงดังรูปที่ 4.6(ก) จะสังเกตเห็นการขยายตัวอย่างเป็นระบบของโซนการเกิด เนื่องจากปริมาณของสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub> 1 mg, 2 mg, 3 mg, 5 mg และ 10 mg สำหรับกรณีที่มีการใช้ MoO<sub>2</sub> 10 mg ขอบเขตการเกิดนอกสุดขยายตลอดความยาวของ substrate แม้การเพิ่มขึ้นของการครอบคลุมมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นอาจถือได้ว่าเป็นประโยชน์แต่การเพิ่มความหนาแน่นในการไล่ระดับความหนาแน่นนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากส่งผลให้บริเวณต่างๆ ของแผ่นเวเฟอร์ถูกปกคลุมไปด้วย MoS<sub>2</sub> ที่มีความหนาแน่นมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากบริเวณที่มีสีแตกต่างกัน และในทางกลับกันขณะที่การไล่ระดับสีที่เกิดขึ้นจากปริมาณ MoO<sub>2</sub> ที่น้อยที่สุด 1 mg ไม่ปรากฏให้เห็นชัดเจนพื้นที่ครอบคลุมของแผ่นเวเฟอร์นั้นต่ำอย่างเห็นได้ชัด โดยจะสามารถเห็นผลความแตกต่างของความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นจากภาพถ่ายบริเวณวงกลมประแสงดังรูปที่ 4.6(ข) และเมื่อตรวจสอบผลการเกิดของรูปทรงโดเมน MoS<sub>2</sub> พบว่าโดเมนที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปทรงสามเหลี่ยมที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อปริมาณของสารตั้งต้น MoO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่ารูปสามเหลี่ยมจะเริ่มมีลักษณะเว้าและเริ่มมีเกิดจุดสีขาวบนฟิล์มขึ้นที่ปริมาณ MoO<sub>2</sub> 10 mg แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่าง Mo:S มีความสำคัญต่อการเกิดของโดเมนสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์

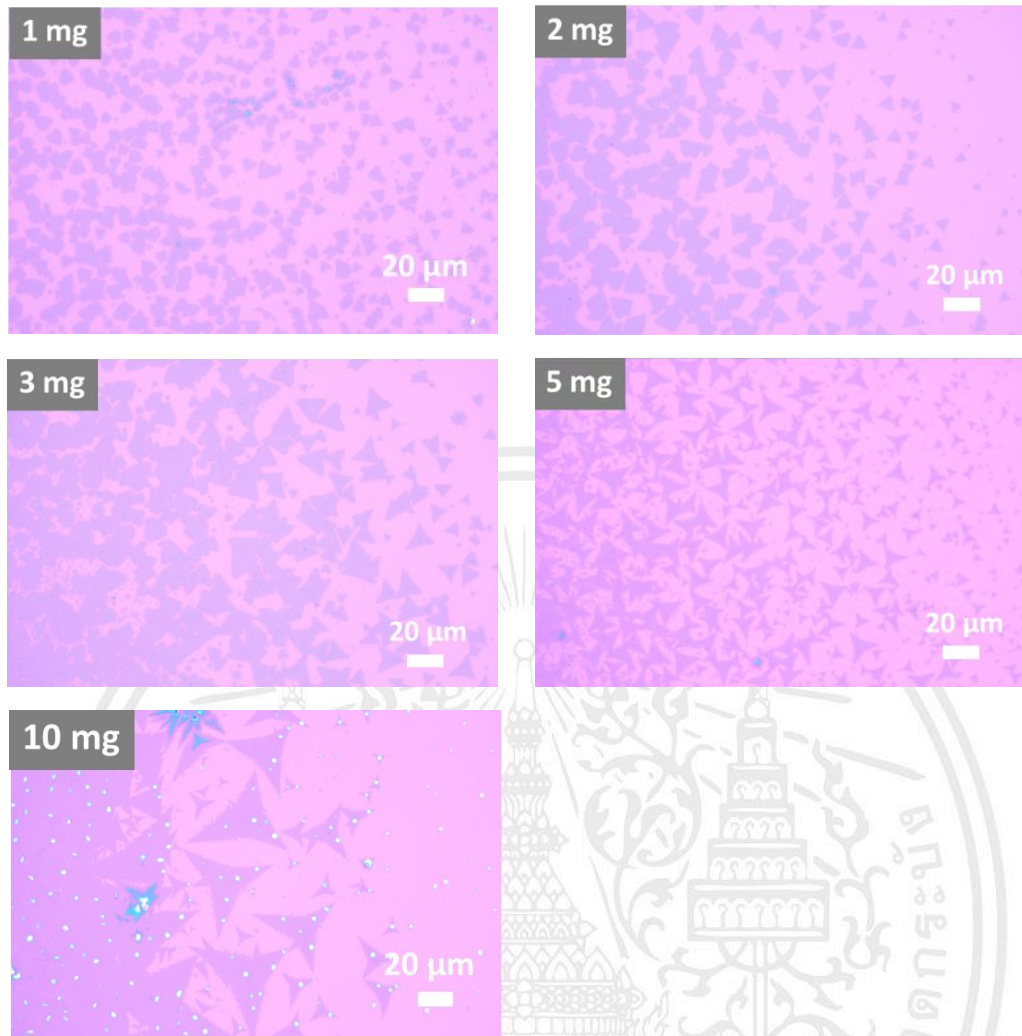


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงรูปแบบการเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นเนื่องจากปริมาณสารตั้งต้น  $\text{MoO}_2$  1, 2, 3, 5 และ 10 mg (ข) ภาพขยายบริเวณวงกลมประ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายรูปทรงการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ปริมาณสารตั้งต้น MoO<sub>3</sub> 1, 2, 3, 5 และ 10 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้น

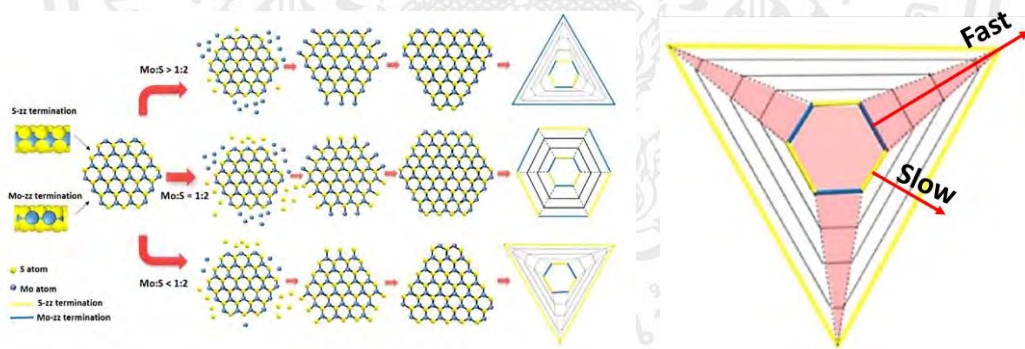
จากผลการทดลองที่ผ่านมาเมื่อหันมาสนใจที่รูปร่างของโดเมนจะสามารถสังเกตว่ารูปทรงของโดเมนนั้นมีลักษณะแตกต่างกันแสดงไว้ดังรูป 4.9 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดมีผลต่อรูปทรงของ  $\text{MoS}_2$  ที่เกิดขึ้นโดยในงานก่อนหน้านี้นี้เคยมีการศึกษาเกี่ยวกับวิวัฒนาการของรูปทรง  $\text{MoS}_2$  แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยทั่วไป  $\text{MoS}_2$  นั้นจะพบขอบ zz-Mo และ zz-S โดยจะเริ่มเกิดจากรูปทรงหกเหลี่ยมซึ่งรูปทรงของโดเมนจะถูกกำหนดด้วยขอบที่เกิดซ้ำๆ โดยขอบที่เกิดเร็วกว่านั้นจะหายไปแต่กรณีที่มีขอบใดขอบหนึ่งเกิดเร็วกว่ามากๆจะทำให้  $\text{MoS}_2$  นั้นเกิดข้อบกพร่องขึ้นทำให้รูปสามเหลี่ยมมีลักษณะเว้าและพบว่าบริเวณขอบมีลักษณะเป็นรอยหยักไม่เรียบเมื่อมีการใช้กำมะถันในปริมาณที่มากเกินไป ดังผลการทดลองโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่เกิดขึ้นนั้นรูปร่างใกล้เคียงกับรูปดาวมากกว่ารูปสามเหลี่ยมนี้เป็นเหตุที่ทราบดีว่ามาจากสภาวะการปลูกของ S-rich คือสภาวะที่มีปริมาณกำมะถันมากเกินไป [45,57] โดยในการทดลองเริ่มที่อัตราส่วนโมลาร์ค่าสูง S:Mo ที่ 100:1 อย่างไรก็ตามหากต้องการปรับรูปร่างของโดเมนสามารถทำได้โดยลดอัตราส่วนเพื่อสร้างโดเมนสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์ผลที่เกิดจากอัตราส่วนที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะสังเกตเห็นวิวัฒนาการอย่างเป็นระบบจากรูปดาวไปจนถึงโดเมนสามเหลี่ยม เนื่องจากอัตราส่วนโมลาร์ S:Mo ลดลงจาก 100:1 เป็น 1.7:1 เมื่ออัตราส่วนลดลงเหลือเพียง 1:1 จะเห็นผลการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือปรากฏโดเมนสามเหลี่ยมขนาดเล็กมากมาพร้อมกับสามเหลี่ยมที่ถูกตัดทอน การก่อตัวของโดเมนที่ถูกตัดทอนนั้นสอดคล้องกับสิ่งที่คาดหวังสำหรับสภาวะการปลูก S-deficient คือสภาวะที่ขาดกำมะถันไม่เพียงพอต่อการเกิด และได้รับรายงานก่อนหน้านี้นี้โดยงานอื่น [45,57-59] ที่ใช้  $\text{MoO}_3$  เป็นสารตั้งต้นและผลที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งที่ค้นพบในสภาวะที่ขาดกำมะถันนั้นส่งผลให้เกิดการก่อตัวของ Intermediate product ใกล้กับขอบ substrate แสดงดังรูปที่ 4.10 การค้นพบนี้บ่งบอกว่าอาจมีกลไกการแข่งขันของการเกิดที่เกี่ยวข้องกับการก่อตัวของทั้ง  $\text{MoS}_2$  และ  $\text{MoOS}_2$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสภาวะการเกิดที่กำมะถันไม่เพียงพอ

เป็นที่น่าสนใจที่อัตราส่วนโมลาร์ S:Mo ต่ำสุดที่ 1:1 และ 1.7:1 (สารตัวกลางแทบจะสังเกตไม่เห็นที่ค่านี้) ไม่พบการก่อตัวของผลิตภัณฑ์กลางจากการตรวจสอบการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  จากเงื่อนไข S:Mo อื่นทั้งหมด โดยทั่วไปนั้น  $\text{MoO}_2$  และ  $\text{MoOS}_2$  ต่างก็มีรูปทรงที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน (โดเมนสี่เหลี่ยม) เมื่อเปรียบเทียบกับ  $\text{MoS}_2$  และสามารถระบุผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้ด้วยการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ผลที่ได้ค่อนข้างน่าสนใจจากการค้นพบของเรานั้นตรงกันข้ามกับการค้นพบการทดลองก่อนหน้านี้นี้ที่ใช้  $\text{MoO}_3$  เป็นสารตั้งต้น Pondick และคณะ [25] รายงานว่าปริมาณการก่อให้เกิด  $\text{MoOS}_2$  ถูกสร้างขึ้นที่บริเวณขอบของ substrate แม้ว่าจะมีอัตราโมลาร์ที่กำหนดไว้ทั่วไปที่มีปริมาณมากถึง 187:1 Najmaei และคณะ [58] รายงานว่าจำเป็นต้องมีความเข้มข้นของ

กำมะถันมากกว่า 500 mg เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด oxysulfide ในทำนองเดียวกันในเอกสารอ้างอิง [60] ต้องใช้อัตราส่วนโมลาร์มากกว่า 170:1 เพื่อหลีกเลี่ยงผลผลิตชั้นกลาง

ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถข้ามปฏิกิริยาระหว่างกลางได้ควรใช้อัตราส่วน S:Mo ชั้นต่ำที่ 3:1 สำหรับการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  ที่ปราศจากผลผลิตชั้นกลางซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ผลลัพธ์ของการเกิดสามารถอธิบายได้โดยตรงในแง่ของอัตราส่วนที่กำหนดทั่วไปโดยการทดลองอาจบ่งชี้ถึงข้อสรุปที่ใกล้เคียงกว่ามากระหว่างอัตราส่วน S:Mo โดยทั่วไปและเฉพาะสำหรับปฏิกิริยาในบริบทนี้ Vapor-phase sulfurization (VPS) แบบขั้นตอนเดียวของ  $\text{MoO}_2$  อาจเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในการควบคุมพารามิเตอร์ของเทคนิค CVD เมื่อเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิมของการปลูก  $\text{MoS}_2$  โดยใช้ VPS ของ  $\text{MoO}_3$

เมื่อพูดถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญเหล่านี้แล้วควรสังเกตว่าการเปรียบเทียบโดยตรงของอัตราส่วนที่รายงานในงานนี้กับสิ่งที่ได้รับจากงานก่อนหน้านี้ควรได้รับการพิจารณาด้วยความถี่ถ้วนเนื่องจากสภาวะการทดลองของเทคนิค CVD อาจแตกต่างกันอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในขณะที่ระยะห่างระหว่างกำมะถันและสารตั้งต้นที่กำหนดไว้ในเอกสารอ้างอิง [25] นั้นใกล้เคียงกับค่าที่ใช้ในการศึกษาของเราแต่ขนาดท่อ CVD นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( 1-inch o.d. ในเอกสารอ้างอิง [25] เมื่อเทียบกับ 2-inch o.d. ในการทดลอง)



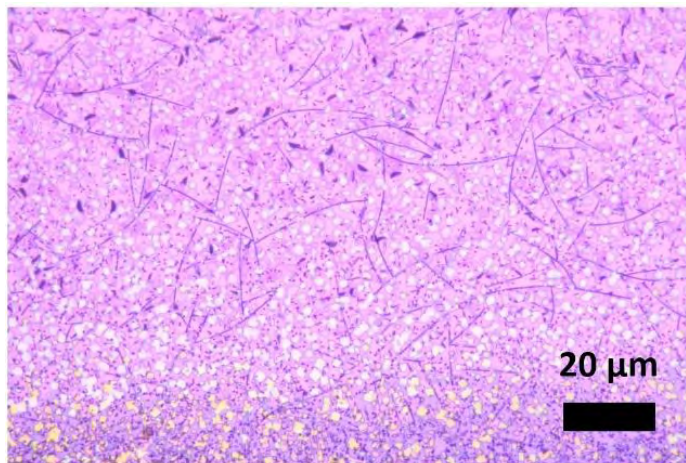
รูปที่ 4.8 แสดงภาพจำลองการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  ที่เริ่มจากขอบ zz-Mo และ zz-S [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายวิวัฒนาการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่าง S:Mo แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

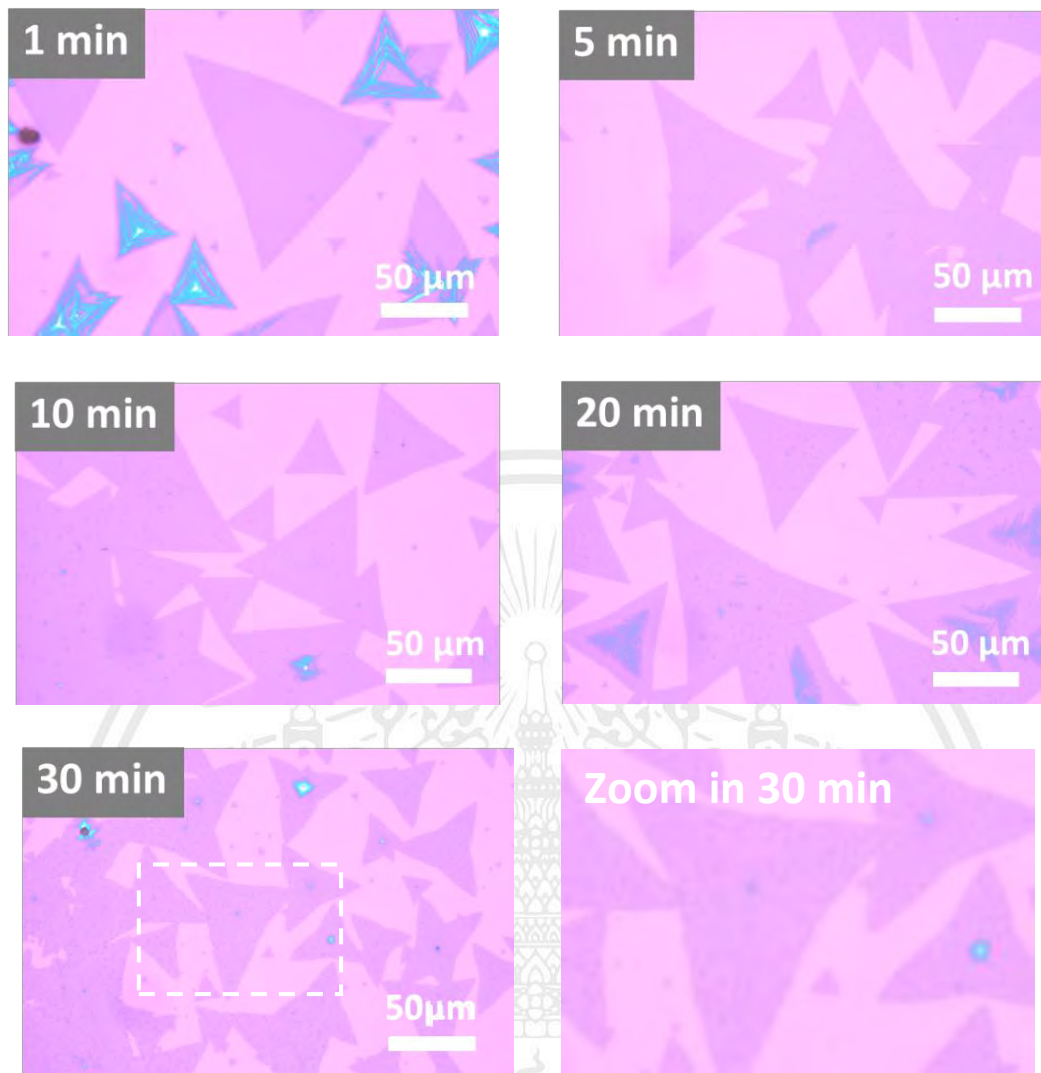


รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ผลชั้นกลางเกิดใกล้บริเวณขอบ substrate จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่อัตราส่วน 1:1

#### 4.1.5 ผลของเวลาในการปลูก $\text{MoS}_2$

รูปที่ 4.11 แสดงผลโดเมนเมื่อเพิ่มเวลาการเติบโตจาก 1 นาทีเป็น 30 นาทีเป็นเวลาที่สูงที่สุด ผลที่ตามมาที่สำคัญที่สังเกตได้คือการเร่งการสร้างเมล็ดนิวเคลียส (self-seeding nucleation sites) หรืออนุภาคระดับนาโน (nanoparticles) บนโดเมน  $\text{MoS}_2$  เมื่อเวลาการเติบโตเพิ่มขึ้น อนุภาคระดับนาโนเริ่มปรากฏเร็วสุด 5 นาทีและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบเมื่อเวลาเติบโตเพิ่มขึ้น มีรายงานการเกิดนิวเคลียสในตำแหน่งที่คล้ายกันซึ่งเกิดขึ้นบนโดเมน  $\text{MoS}_2$  [24,61] โดยในเอกสารอ้างอิง [24] มีรายงานว่ากลไกการเกิดเมล็ดพันธุ์นั้นเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิการปลูก ในขณะที่ในเอกสารอ้างอิง[61] พบว่าการเพิ่มเวลาการปลูกทำให้เกิดผลเช่นเดียวกัน เราพบว่าเมื่อเวลาการปลูก 1 นาที โดยปกติแล้วจะไม่เกิดอนุภาคนาโนเหล่านี้ ข้อกำหนดนี้ทำให้สามารถปลูกวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันและลดความเสี่ยงของการเกิดชั้นขึ้นเพิ่มเติมที่จะเกิดจากเมล็ดเหล่านั้น ในงานก่อนหน้าโดย I. Bilgin และคณะ [62] มีรายงานการก่อตัวอย่างรวดเร็วของชั้นที่สอง แม้ว่าจะมีอุณหภูมิการเติบโตที่สูงมากถึง  $950^\circ\text{C}$  นอกเหนือจากการเร่งความเร็วที่เกิดจากการไม่มีผลิตภัณฑ์กลางใน VPS โดยตรงของ  $\text{MoS}_2$  แล้วการค้นพบนี้เกิดจากจลนศาสตร์ (kinetics) ของการเติบโตที่เร็วขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น แม้ว่าโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่รายงานในงานของเรามักเผยให้เห็นความผิดปกติที่ขอบโดเมน (คาดว่าสำหรับสภาวะ S-rich) เราจะไม่สังเกตเห็นการก่อตัวของชั้นทุติยภูมิที่มีนัยสำคัญเมื่อดูโดเมนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง, การถ่ายภาพ SEM หรือการวัด AFM เราถือว่าสิ่งนี้มาจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ( $760^\circ\text{C}$ ) และเวลาการเติบโตระยะสั้นที่ใช้ในงานของเรานั้นสอดคล้องกับการค้นพบก่อนหน้านี [62] และเน้นย้ำถึงบทบาทสำคัญของอุณหภูมิการปลูก  $\text{MoS}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



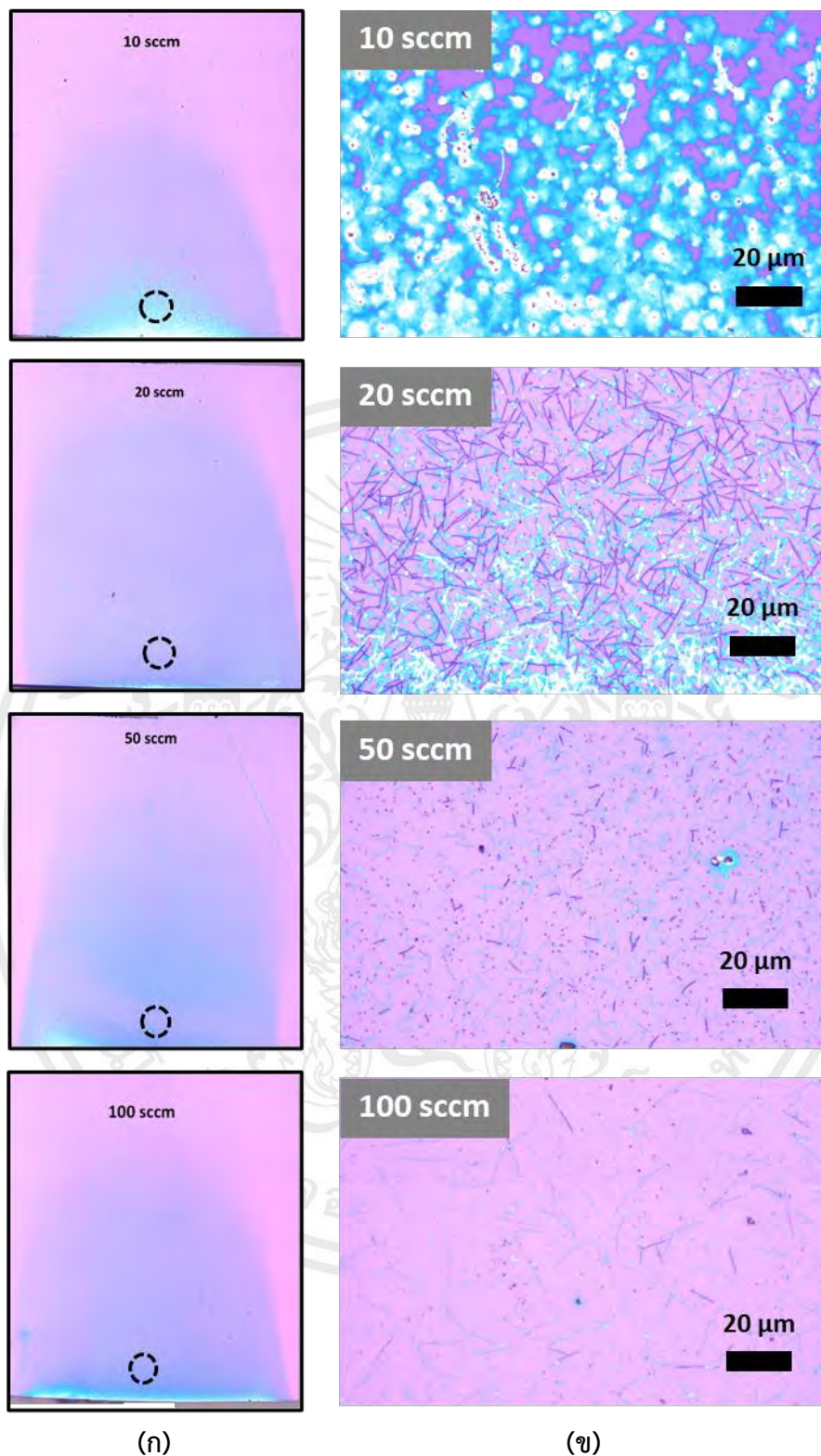
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายวิวัฒนาการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เกิดจากเวลาในการปลูกแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.6 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส

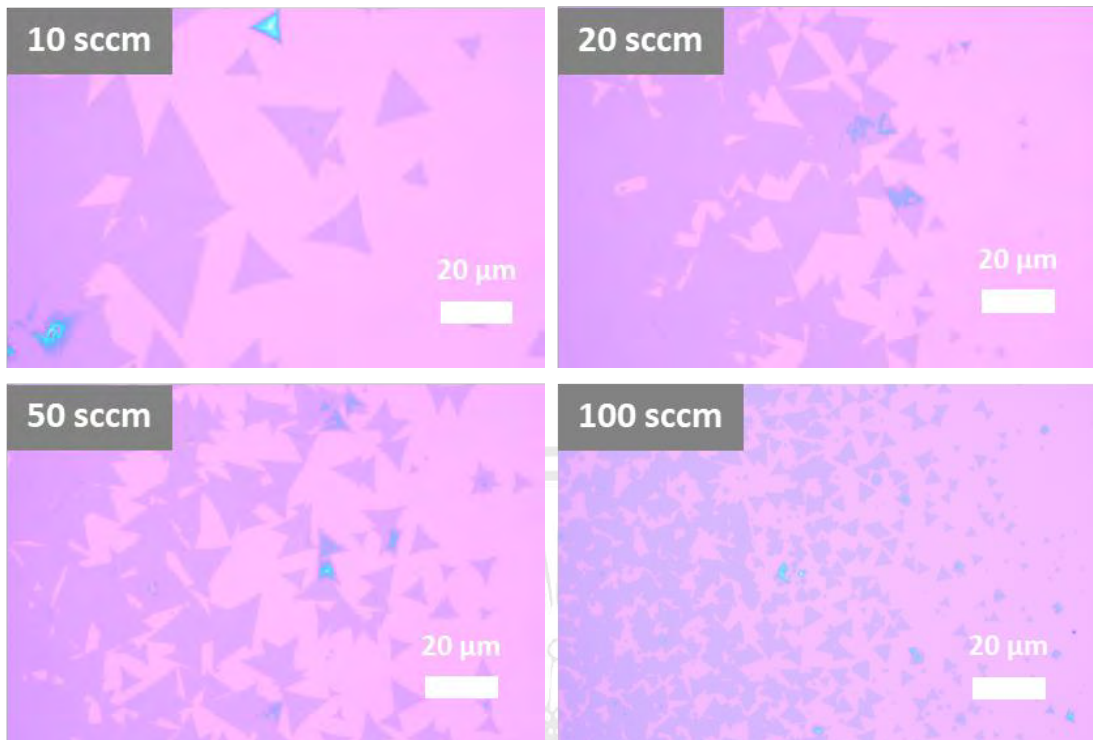
เพื่อตรวจสอบปรากฏการณ์เพิ่มเติมที่อาจจะส่งผลต่อการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  เราได้ทำการตรวจสอบโดยละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบของอัตราการไหลของแก๊สต่อสภาพการเกิด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถสังเกตได้ทันทีจากภาพถ่ายต่อติดกันจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงดังรูปที่ 4.12(ก) พบว่าบริเวณใกล้ขอบของ substrate การเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น สิ่งที่น่าสนใจคือการสังเกตการณ์เติบโตขอโครงสร้างนาโนสำหรับการเติบโตโดยใช้อัตราการไหลของแก๊สที่สูงขึ้นแสดงดังภาพถ่าย(บริเวณเส้นวงกลมประ) แสดงดังรูป 4.12 (ข) ที่สอดคล้องกับสภาวะอัตราการไหลของแก๊สที่ 20, 50 และ 100 sccm สำหรับสภาวะอัตราการไหลของแก๊สต่ำ 10 sccm โครงสร้างนาโนเหล่านี้ส่วนใหญ่หายไปและถูกรวมด้วยชั้นหนาของ  $\text{MoS}_2$  มีรายงานโครงสร้างนาโนที่คล้ายกันในงานก่อนหน้านี้ [49,51,63,64] โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{MoO}_3$  ตามที่ Vila และคณะ [51] รายงานว่าผลดังกล่าวขึ้นอยู่กับแรงดันบางส่วนของ  $\text{MoO}_x : \text{S}_2$  ที่มีการเกิดโครงสร้างนาโนเหล่านี้สามารถเป็นได้ทั้ง  $\text{MoO}_2$  หรือ  $\text{Mo}_2\text{O}_3$  ที่มีกำมะถันบางส่วนและ  $\text{MoS}_2$

นอกเหนือจากการสร้างสภาวะการปลูกที่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของโครงสร้างนาโนแล้ว อัตราการไหลของแก๊สยังมีบทบาทสำคัญในการกำหนดขนาดเฉลี่ยของแต่ละโดเมน  $\text{MoS}_2$  โดยพารามิเตอร์นี้สำคัญมากที่จะกำหนดคุณภาพของฟิล์มต่อเนื่องเนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 100 sccm ขนาดโดเมนเฉลี่ยจะลดลงจาก  $\sim 70 \mu\text{m}$  เหลือขนาดเพียง  $2 \mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 4.13 ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการเกิดของโดเมนกราฟีน [65] โดยมีข้อสังเกตว่าอัตราการไหลของแก๊สที่ต่ำกว่าจะกีดกันความหนาแน่นของนิวเคลียสซึ่งจะช่วยส่งเสริมการเกิดของโดเมนที่ใหญ่ขึ้น Z. Lin และคณะ[66] รายงานผลกระทบที่คล้ายคลึงกันกับขนาดโดเมนขึ้นกับความหนาแน่นของนิวเคลียสสำหรับ  $\text{MoS}_2$  ปลูกโดยใช้สารตั้งต้น  $\text{MoO}_3$  อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของนิวเคลียสที่รายงานเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสัมพัทธ์ของสารตั้งต้นกับแหล่งกำเนิดสารตั้งต้น



รูปที่ 4.12 (ก) แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงรูปแบบการเกิดแบบไล่ระดับความหนาแน่นเนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สแตกต่างกัน (ข) ภาพขยายบริเวณวงกลมประ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายวิวัฒนาการเกิดของโดเมนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เกิดอัตราการไหลของแก๊สในการปลูกที่แตกต่างกัน

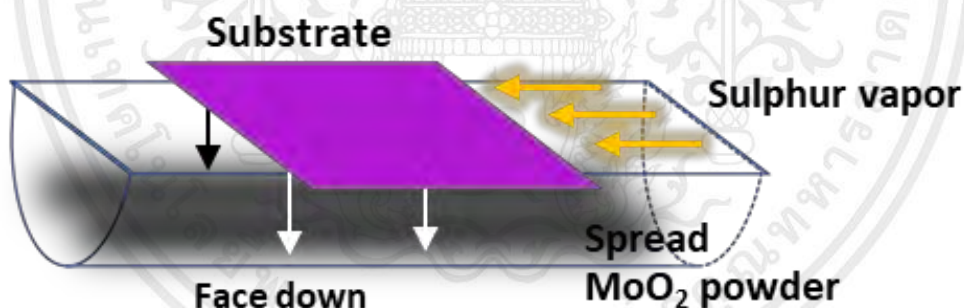
#### 4.1.7 ผลของการกระจายสารตั้งต้น

แม้ว่าผลลัพธ์ที่น่าเสนอในงานถือเป็นก้าวสำคัญแต่ยังไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเกิดของฟิล์มขนาดใหญ่ที่สามารถครอบคลุมทั่วเวเฟอร์หรือความสม่ำเสมอของ  $\text{MoS}_2$  ความหนาชั้นเดียวแบบต่อเนื่อง ในงานล่าสุดที่ใช้สารตั้งต้น  $\text{MoO}_3$  [67] มีการระบุกลไกการเกิด 2 ประเภทคือ ระบบการแพร่กระจายและระบบปฏิกิริยาพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกับการใช้สารตั้งต้น  $\text{MoO}_3$  ในปริมาณมากหรือน้อยสำหรับการเกิด ตามลำดับ ในขณะที่ในระบบการแพร่กระจายพบรูปแบบการเกิด แบบไล่ระดับซึ่งคล้ายกับงานนี้ ในระบบปฏิกิริยาพื้นผิวรายงานการเกิดของฟิล์มต่อเนื่องที่ครอบคลุมพื้นที่เวเฟอร์มากกว่า 90% ผู้เขียนเห็นว่าสิ่งนี้เป็นผลจากการลดปฏิกิริยาของเฟสแก๊สซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกโดยปริมาณสารตั้งต้น  $\text{MoO}_3$  ต่ำที่ใช้และสภาวะการเติบโตของ CVD แรงดันต่ำในการทดลองของเราดูเหมือนว่าจะไม่เปลี่ยนไปใช้ระบบปฏิกิริยาพื้นผิว แม้ว่าจะทำการทดลองด้วยปริมาณ  $\text{MoO}_2$  ที่ต่ำมาก (1 mg) อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากการบวนการ CVD ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ปัจจัยทางด้านอื่นๆ เช่น ความสูง, ระยะทางของช่องว่างระหว่างแหล่งที่มาของสารตั้งต้น อาจมีบทบาทสำคัญในการจำกัดการเกิดตามระบบการแพร่กระจาย

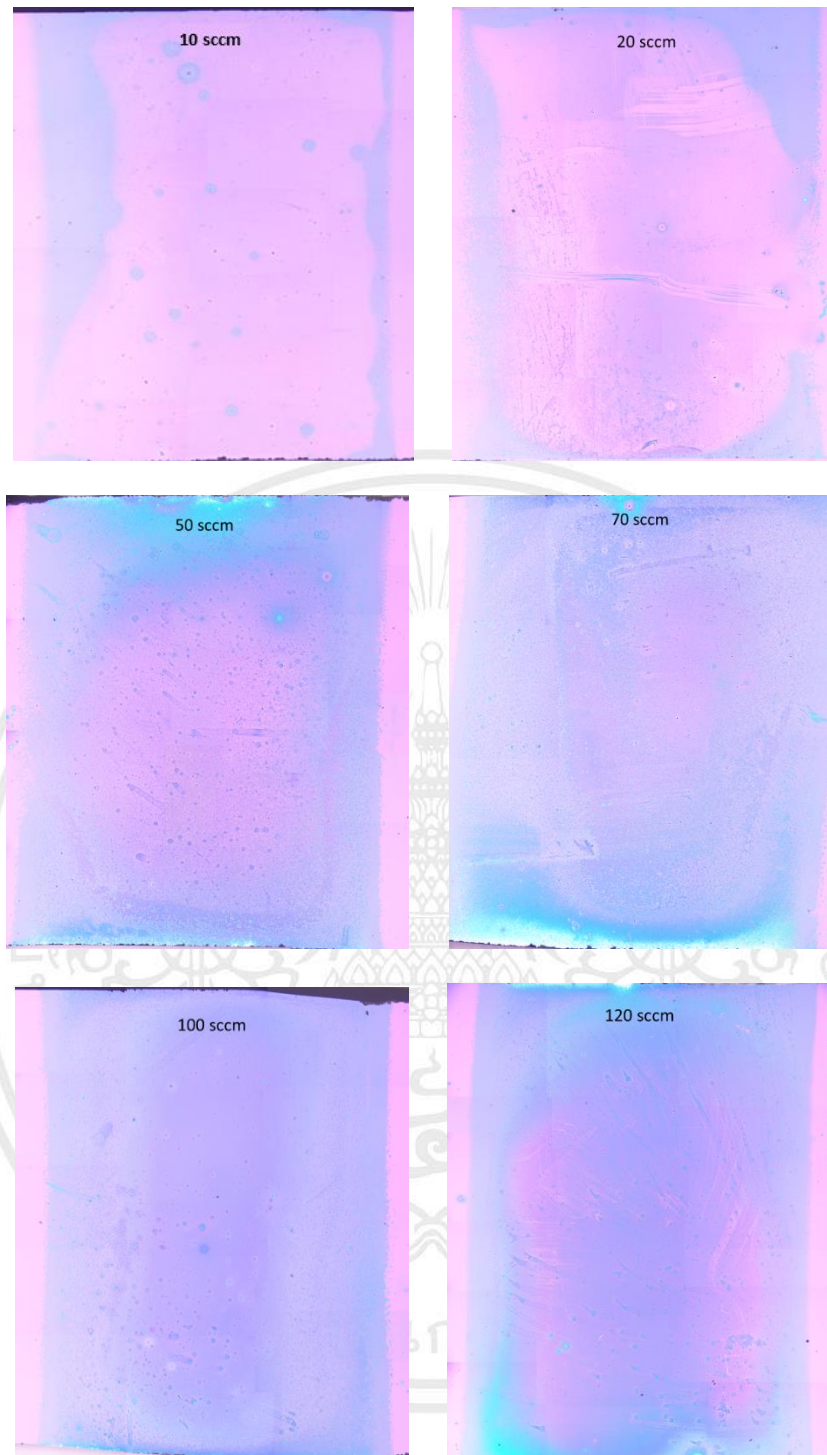
แม้ว่าจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมแต่ควรพิจารณาพารามิเตอร์อื่นๆ เพื่อในการปรับปรุงการครอบคลุมพื้นผิวของเวเฟอร์ด้วย ตัวอย่างเช่นมีการรายงานการเกิดระดับเวเฟอร์สเกล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย Q Wang และคณะ[68] เมื่อเร็ว ๆ นี้ มีการใช้เตาเผาที่ออกแบบมาเป็นพิเศษโดยมีแหล่งให้ความร้อนหลายแหล่ง ซึ่งทำให้มีการกระจายตัวของสารตั้งต้น Mo อย่างสม่ำเสมอเพื่อไปถึง substrate การเกิดสำหรับนิวเคลียส วิธีการอื่นๆ รวมถึงการเพิ่มช่องว่างจากแหล่งกำเนิด [66] การปรับทิศทางของ substrate ในแนวตั้ง [68] และการใช้สิ่งกีดขวาง [48] ส่งผลให้ได้ฟิล์มต่อเนื่อง

ในที่นี้เรานำเสนอแนวทางที่แตกต่างออกไปที่จะเกิด  $\text{MoS}_2$  ให้สามารถครอบคลุมทั่วแผ่นเวเฟอร์ในการพยายามที่จะกระจายสารตั้งต้น Mo อย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของภาชนะแสดงดังรูปที่ 4.14 ที่อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm แสดงรูปแบบผลการเกิดที่เปลี่ยนไปโดยที่พารามิเตอร์การปลูกอื่นๆ ทั้งหมดไม่เปลี่ยนแปลง รูปแบบการเกิดของฟิล์มสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าแตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากรูปแบบโซนที่สังเกตพบสำหรับกรณีอื่นๆ ทั้งหมดเมื่อวางสารตั้งต้นเป็นกองในตำแหน่งที่กำหนดก่อนหน้านี้และที่น่าสนใจจากผลดังกล่าวเห็นได้ชัดว่าการเกิดของฟิล์มเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเริ่มต้นจากขอบทั้งสองด้านของ substrate แล้วค่อยๆ เคลื่อนไปสู่ศูนย์กลางของเวเฟอร์แสดงดังรูปที่ 4.15 แต่อย่างไรก็ตามจากผลที่ได้จากการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  ด้วยการกระจายสารตั้งต้น  $\text{MoO}_2$  นั้นสามารถครอบคลุมพื้นที่บนเวเฟอร์ได้แต่คุณภาพและความสม่ำเสมอของ  $\text{MoS}_2$  ที่ได้ยังไม่ดีเท่าที่ควรซึ่งการทดลองนี้นั้นเป็นเพียงการทดลองที่ยังอยู่ในช่วงของการศึกษาดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก



รูปที่ 4.14 แสดงภาพจำลองการกระจายสารตั้งต้น  $\text{MoO}_2$



รูปที่ 4.15 แสดงภาพต่อติดกันถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงรูปแบบการเกิดเมื่อการกระจายสารตั้งต้น Mo อย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของภาชนะที่อัตราการไหลของแก๊สต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ข้อมูลการวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของ MoS<sub>2</sub>

จากผลการทดลองข้างต้นเป็นเพียงการตรวจสอบเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแล้วเพื่อยืนยันคุณภาพของ MoS<sub>2</sub> โดยการวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจสอบเชิงลึกได้

### 4.2.1 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

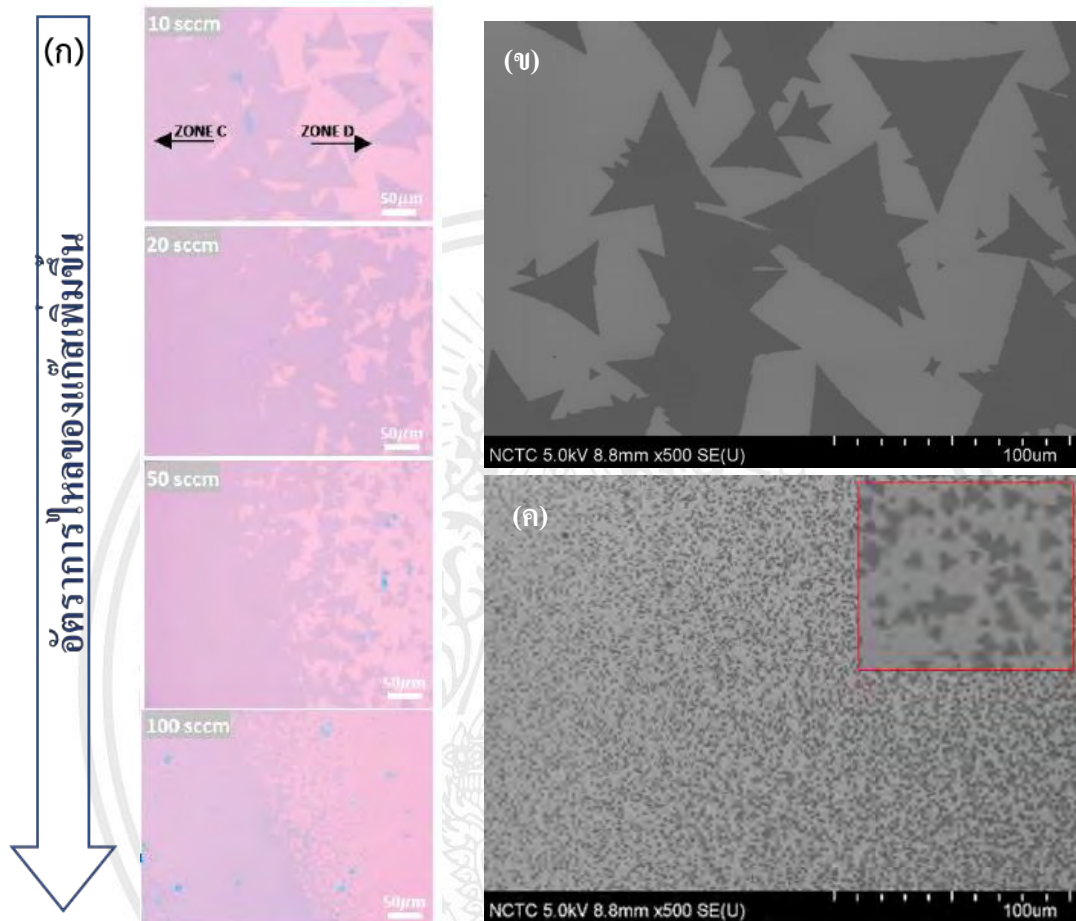
ตามที่ได้กล่าวไว้อัตราการไหลของแก๊สเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากซึ่งกำหนดคุณภาพของฟิล์มต่อเนื่องที่พบในโซน C เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 100 sccm ขนาดโดเมนเฉลี่ยจะลดลง การสแกน FESEM เปรียบเทียบระหว่างกรณี 10 และ 100 sccm แสดงในรูปที่ 4.16 (ข,ค) ตามลำดับ

เนื่องจากมีผลกระทบอย่างมากต่อขนาดโดเมนต่ออัตราการไหลของแก๊สจึงจำเป็นต้องตรวจสอบสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มต่อเนื่องดังรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบภาพ FESEM ของ MoS<sub>2</sub> ที่เกิดภายใต้อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm (รูปที่ 4.16 (ก-ค)) และ 100 sccm (รูปที่ 4.17(ง-ฉ)) โดยรูปที่ 4.17 (ก,ฉ) แสดงภาพที่ขอบแยกระหว่างฟิล์มต่อเนื่องและโดเมน (ภาพภายในแสดงตำแหน่งการสแกน) ขนาดของความแตกต่างในขนาดโดเมนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่ำและสูงนั้นมีความน่าสนใจมากดังที่แสดงในรูป 4.17 (ข,จ) แสดงภาพการขยายที่คล้ายกันของภาพที่แสดงในรูป 4.17 (ก,ง) แต่สำหรับพื้นที่ที่มีเฉพาะฟิล์มต่อเนื่องสำหรับอัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm เส้นขอบเขตของเกรนจะมองเห็นได้ทันทีและภาพที่ขยายเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.17(ค)) เผยให้เห็นว่าโดยเฉลี่ยแล้วการแยกขอบเขตเกรนจะอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30  $\mu\text{m}$  โดยบางพื้นที่อาจมีขนาดใหญ่กว่านี้ ความสม่ำเสมอของความหนาในพื้นที่ขนาดใหญ่เป็นไปได้โดยการเติบโตของขนาดโดเมนขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ถึงคุณภาพของฟิล์มที่เกิดขึ้น[58] ในทางกลับกันอัตราการไหลของแก๊สที่สูง 100 sccm จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของฟิล์มในขณะที่ภาพ FESEM กำลังขยายต่ำ (รูปที่ 4.17(จ)) เผยให้เห็นฟิล์มต่อเนื่องโดยไม่มีขอบเขตเกรนการตรวจสอบอย่างละเอียดด้วยกำลังขยายที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.17(ฉ)) แสดงถึงการมีอยู่ของการแยกของเกรนขนาดที่เล็กมากภายในฟิล์มโดยมีขนาดประมาณ 2  $\mu\text{m}$

ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นจะเร่งกระบวนการถ่ายโอนมวล ส่งผลให้อัตราการเกิดของผลึกเกิดเร็วขึ้น[45] ซึ่งนำความไม่เสถียรในกระบวนการเติบโตโดยไม่ยอมปล่อยให้อะตอมเคลื่อนเข้าไปนำไปสู่สิ่งที่เรียกว่า “การควบคุมทางจลนศาสตร์” สภาวะการเกิดที่ตรงข้ามกับสภาวะ “การควบคุมทางเทอร์โมไดนามิก” ได้รับการสนับสนุนภายใต้สภาวะอัตราการไหลของแก๊สต่ำ นอกเหนือจากผลกระทบของอัตราการไหลของแก๊สต่อการไล่ระดับความหนาแน่นและ

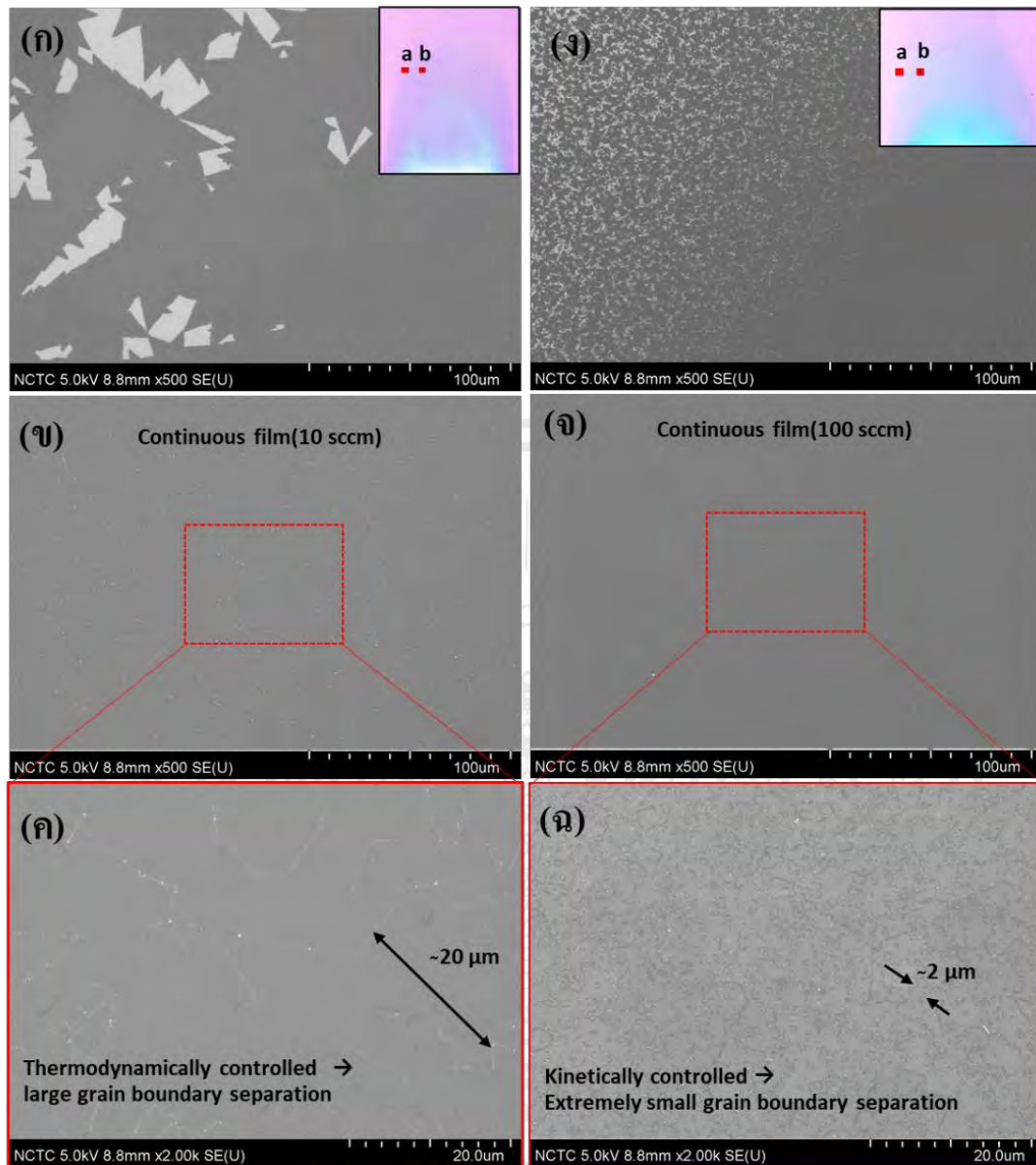
ขนาดโดเมนแล้วยังมีข้อสังเกตว่าการครอบคลุมของ substrate สามารถปรับปรุงได้ด้วยอัตราการไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแก๊สสูงขึ้น (เปรียบเทียบ 10 และ 20 sccm) อย่างไรก็ตามเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการไหลของแก๊สสูงสุดที่ 100 sccm ดังนั้นจึงมีข้อแลกเปลี่ยนระหว่างการครอบคลุมของเวเฟอร์ที่ดีกว่ากับการได้ฟิล์มต่อเนื่องที่มีขนาดโดเมนที่ใหญ่กว่า



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของอัตราการไหลของแก๊สต่อขนาดเฉลี่ยของโดเมน MoS<sub>2</sub> ที่เกิดในโซน D (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบของขนาดโดเมนเฉลี่ยที่โซน C (ฟิล์มต่อเนื่อง) และโซน D (โดเมน) (ข,ค) ภาพถ่าย FESEM แสดงโดเมนเฉลี่ยสำหรับการทดลองอัตราการไหล 10 sccm และ 100 sccm ตามลำดับ ภาพสิ่งที่ใส่เข้าไป (ค) คือภาพขยายของพื้นที่ขนาดเล็กในภาพหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

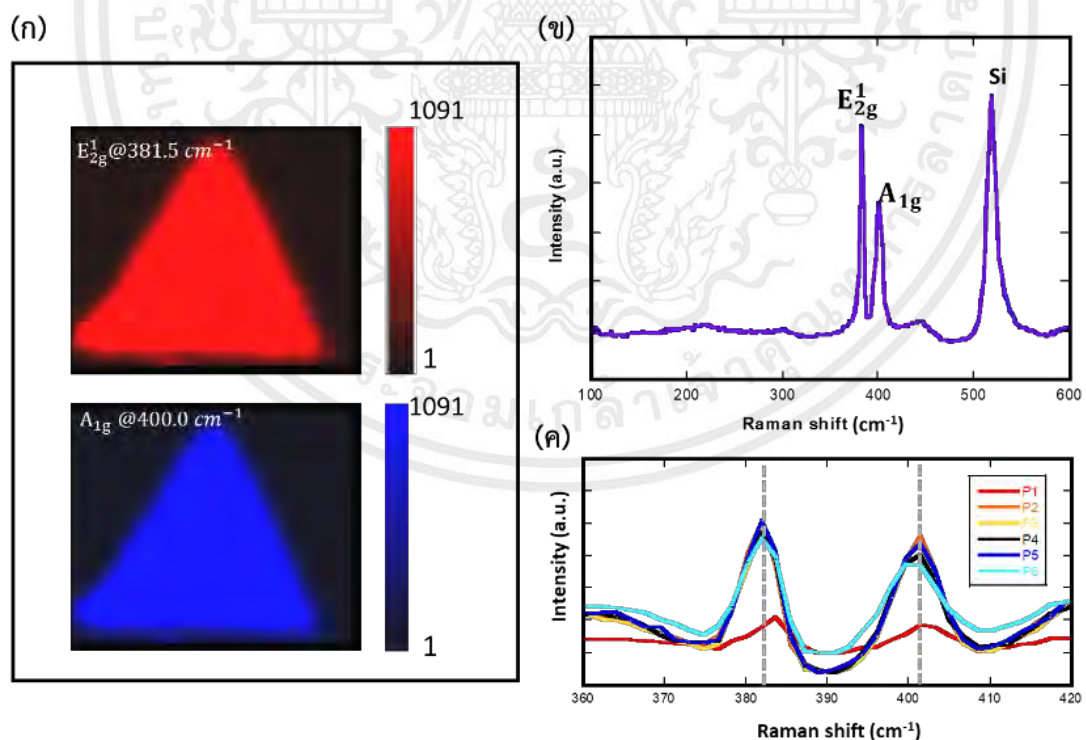


รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย FESEM แสดงความแปรผันทางสัณฐานวิทยาในฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวต่อเนื่องที่เกิดจากอัตราการไหลของแก๊สเปลี่ยนจาก (ด้านซ้าย) 10 sccm เป็น (ด้านขวา) 100 sccm (ก,ง) ภาพแสดงการแบ่งโซน C และ D สำหรับอัตราการไหลของแก๊สที่ 10 และ 100 sccm ตามลำดับ (ข,จ) ภาพถ่ายที่ตำแหน่งภายในโซน C (ค,ฉ) ภาพกำลังขยายสูงของ (ข,จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 Raman Spectroscopy

เพื่อยืนยันถึงคุณภาพของฟิล์มที่ได้เป็นฟิล์มที่มีคุณภาพที่ดีนั้นจำเป็นต้องตรวจสอบจำนวนความหนาของฟิล์มที่ได้ด้วยเทคนิครามาน รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมรามานที่ได้รับในช่วงสเปกตรัมกว้าง สำหรับโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่เลือกจากตำแหน่งสุ่มในโซน D และในบริเวณใกล้เคียงขนาดประมาณ  $100 \mu\text{m}$  โหมดการสั่นสะเทือนรามานที่โดดเด่น 2 โหมดซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของ  $\text{MoS}_2$  โหมด  $E_{2g}^1$  ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นในระนาบของอะตอม S และ Mo จะเห็นได้ที่เลขคลื่นประมาณ  $381.5 \text{ cm}^{-1}$  และโหมด  $A_{1g}$  ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นนอกระนาบของอะตอม S อยู่ที่ประมาณ  $400 \text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นผลต่างความถี่ ( $\Delta\omega$ ) ที่ได้ระหว่างสองโหมดจึงอยู่ที่ประมาณ  $18.5 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งยืนยันลักษณะชั้นเดียวของโดเมน  $\text{MoS}_2$  [69,70] นอกเหนือจากโหมดรามานสองโหมดของ  $\text{MoS}_2$  แล้วการสั่นสะเทือนสูงสุดอีกจุดหนึ่งที่สอดคล้องกับ Si จะถูกพบที่คลื่นความถี่  $516 \text{ cm}^{-1}$  แสดงดังรูป 4.17(ข) ความสม่ำเสมอของความหนาของโดเมน  $\text{MoS}_2$  นั้นวิเคราะห์โดยแผนภาพรามานแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 4.18(ก) เห็นได้ชัดว่าจากแผนภาพมีความเข้มของรามานที่สม่ำเสมอซึ่งได้จากโหมดการสั่นสะเทือน ( $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$ ) พิสูจน์ได้ว่าความหนาของโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่เกิดในโซน D มีความสม่ำเสมอและเพื่อยืนยันเพิ่มเติมจากโหมดการสั่นสะเทือนที่ขึ้นในตำแหน่งเดียวกันโดยการซูมเลือกจากแผนภาพรามานแสดงดังรูปที่ 4.17(ค)

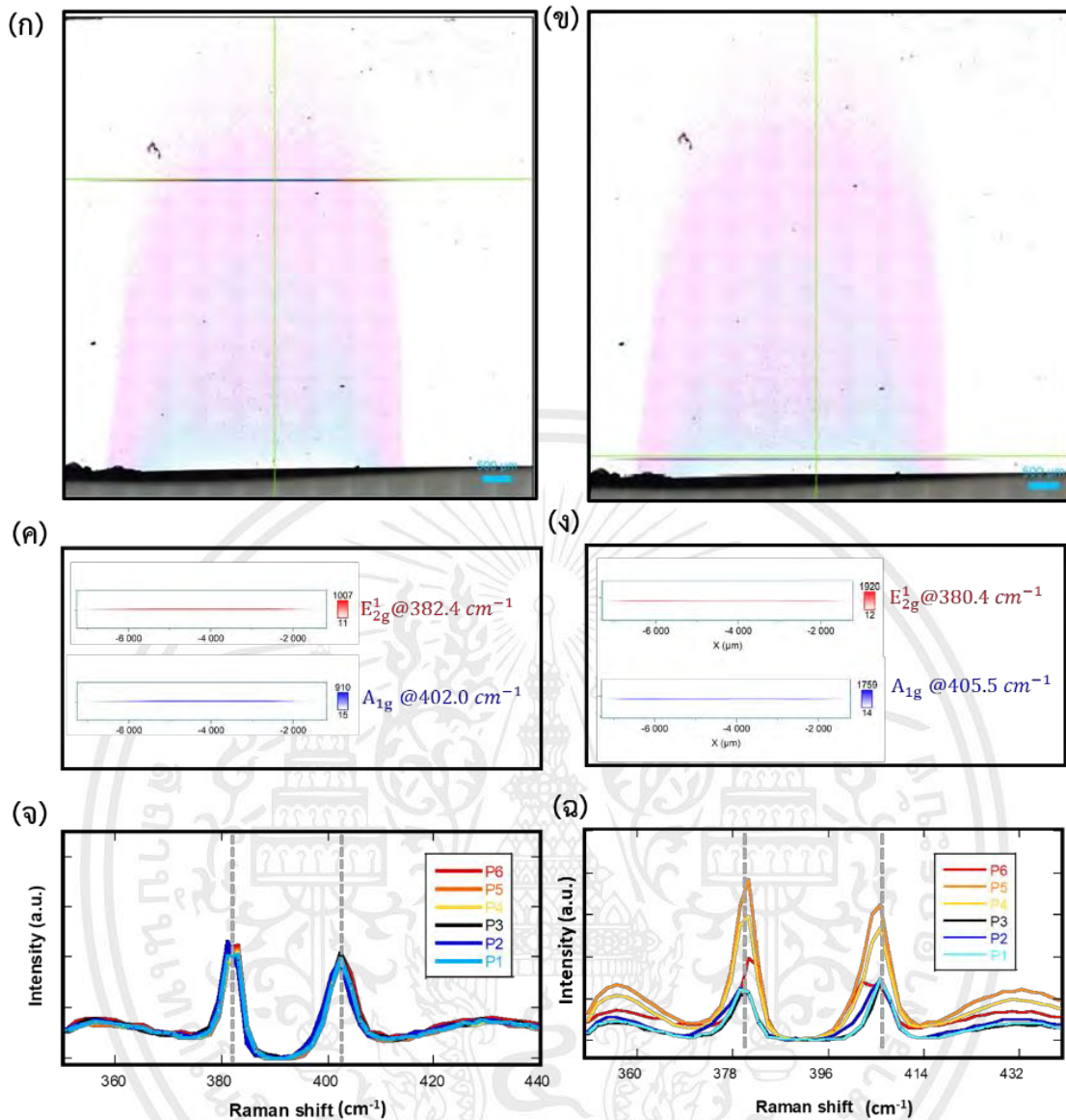


รูปที่ 4.18 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก) แสดงแผนภาพรามานจากโหมด  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  (ข) รามานสเปกตรัมของโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่พบบริเวณโซน D (ค) รามานสเปกตรัมรวบรวมที่ 6 ตำแหน่งจากแผนภาพรามาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มต่อเนื่อง  $\text{MoS}_2$  ที่เกิดในโซน C เราได้ทำการสแกนเส้นรามาน 25 จุดอย่างละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.18(ข) ในระยะทาง 4 mm ซึ่งตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4.19(ก) ความสม่ำเสมอของฟิล์มนั้นชัดเจนจากตำแหน่งโหมด  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  ที่ค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลงตลอดเส้น การสแกนเส้นเผยให้เห็นความแตกต่างของความถี่ในช่วง  $19-20 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งยืนยันถึงลักษณะฟิล์มต่อเนื่องที่เกิดขึ้นมีความหนาชั้นเดียว สเปกตรัมรามานที่สอดคล้องกันจะแสดงในรูปที่ 4.19(จ) สำหรับ 6 ตำแหน่งที่สุ่มเลือกตามทิศทางของการสแกนเส้น ความกว้างเต็มที่ที่ครึ่งหนึ่งของตำแหน่งสูงสุด (FWHM) ตามที่คำนวณคือประมาณ  $4.5$  และ  $6 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับพีค  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  ตามลำดับซึ่งบ่งชี้ถึงคุณภาพผลึกที่ดีของ  $\text{MoS}_2$  สแกนเส้นรามานครั้งที่ 2 เพื่อกำหนดองค์ประกอบของวัสดุสีขาวที่มีความหนาเกือบบริเวณโซน A โดยรูปที่ 4.19 (ง) แสดงผลการทำการสแกนในลักษณะเดียวกันโดยตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4.19(ข) ตรงกันข้ามกับผลลัพธ์จากการสแกนเส้นที่ 1 ความแตกต่างของความถี่ระหว่างพีค  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  ที่วิเคราะห์นี้มีความไม่สม่ำเสมอของชั้นแสดงดังเส้นสเปกตรัมโดยค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญประมาณ  $25-26 \text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นจึงสอดคล้องกับ  $\text{MoS}_2$  ที่มีความหนาหลายชั้น ดังที่เราได้พิสูจน์เพิ่มเติมในการอภิปรายต่อไปนี้โดยใช้สเปกตรัมที่เก็บรวบรวมในช่วงความถี่คลื่นที่กว้างกว่า วัสดุ  $\text{MoS}_2$  ที่มีชั้นหนาที่พบนี้แสดงถึงซิลเฟอไรต์ออกไซด์อย่างสมบูรณ์และไม่พบผลพลอยได้ชั้นกลางเช่น  $\text{MoOS}_2$  จะสังเกตว่าพีครามานที่ซ้อนทับกันที่เห็นในรูปที่ 4.18(ง) และ 4.19(ฉ) ดูเหมือนว่าจะมีการแพร่กระจายแบบสุ่มในความเข้มทั่วทั้งเส้นเราเชื่อว่าความแปรผันของความเข้มเหล่านี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความหนาหลายชั้นของ  $\text{MoS}_2$  ในตำแหน่งที่สแกน การแปรผันของความเข้มที่คล้ายคลึงกันนี้สังเกตพบมาก่อนและเป็นผลมาจากการรบกวนทางแสงที่เกิดขึ้นจากการมีอยู่ของชั้นออกไซด์ที่อยู่ชั้นล่าง [70]

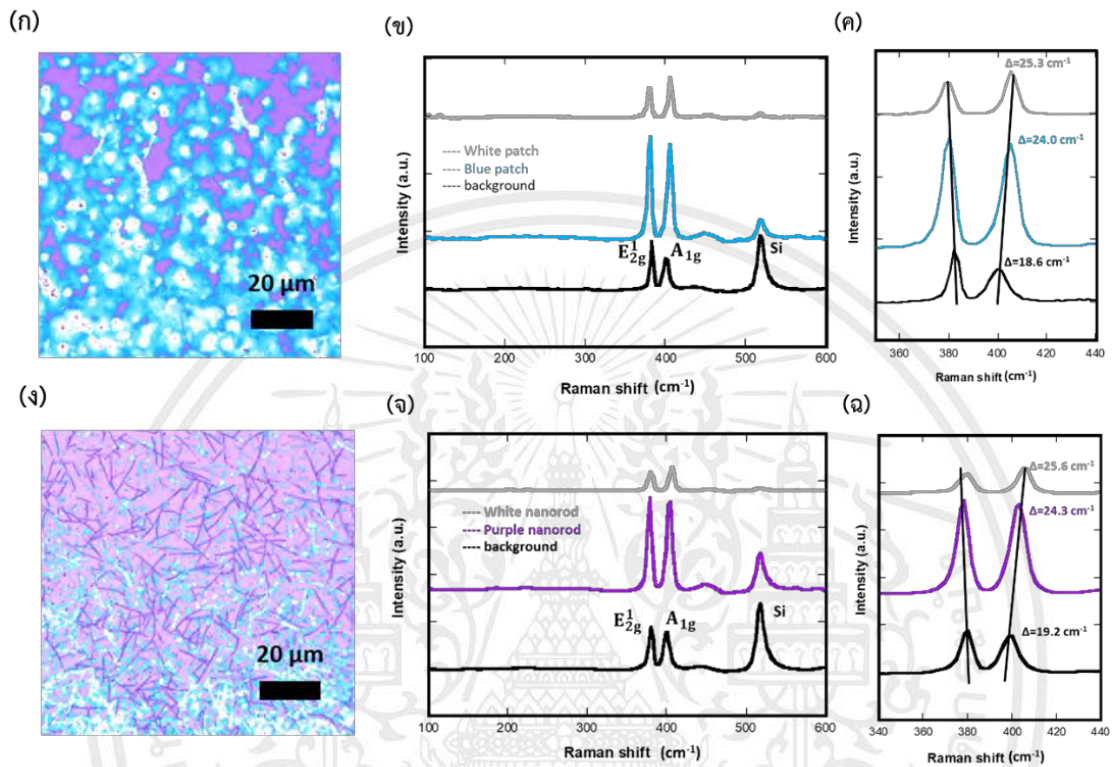
การก่อตัว  $\text{MoS}_2$  ที่มีชั้นหนาบริเวณโซน A สามารถเกิดจากความเข้มชั้นสูงของฟลักซ์ Mo ที่มาถึงขอบของ substrate เมื่อนิวคลีโอซันเคลื่อนตัวออกห่างจากขอบตัวอย่างมากขึ้น ความหนาแน่นของนิวคลีโอซันจะลดลงและเป็นประโยชน์ต่อการเกิดของโดเมนสามเหลี่ยมและการรวมตัวกันของฟิล์ม[58] ส่งผลให้โซน C ถูกปกคลุมด้วยฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.19 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก,ข) ตำแหน่งแสกนเส้นที่ 1 และ 2 (ค,ง) แผนภาพสเปกตรัมโหมด  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  ของการแสกนเส้นที่ 1 และ 2 (จ,ฉ) รามานสเปกตรัม 6 ตำแหน่งที่แสดงในแผนภาพ ตามลำดับ

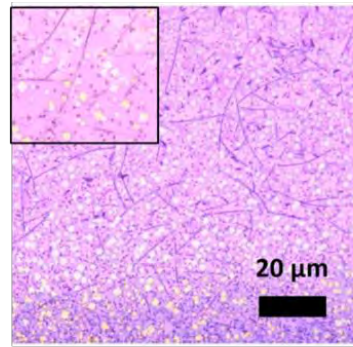
จากผลข้างต้นมีการตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุที่มีความหนาและโครงสร้างนาโน เราทำการวิเคราะห์รามานสำหรับกรณีเหล่านี้ดังที่เห็นได้จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.20 (ข,จ) การสแกนรามานที่ได้รับในช่วง  $100-600 \text{ cm}^{-1}$  เผยให้เห็น 2 พีกที่ปรากฏขึ้นคือ พีก  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$  ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวัสดุ  $\text{MoS}_2$  นอกเหนือจากพีกที่คาดไว้อย่างสังเกตเห็นพีก Si ที่คลื่นความถี่  $526 \text{ cm}^{-1}$  ไม่มีพีกที่สอดคล้องกับ  $\text{MoO}_2$  หรือ  $\text{MoOS}_2$  ที่ตำแหน่งใดๆใน 6 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดซัลเฟอร์โรเซชันที่สมบูรณ์ของ  $\text{MoO}_2$  ที่น่าสนใจคือพีกรามานที่ได้จากพื้นหลังเผยให้เห็นว่าบริเวณเหล่านี้ถูกปกคลุมด้วยฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวต่อเนื่อง โดยความแตกต่างของเอกสารนี้เป็นเอกลักษณ์สำหรับวัสดุที่มีการเชื่อมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้ชั้นเป็นเซมิคอนดักเตอร์ที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีคบ่งบอกวัสดุที่หนากว่าและโครงสร้างนาโนสามารถเกิดขึ้นหลังจากการก่อตัวของชั้นเริ่มต้นของ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียว

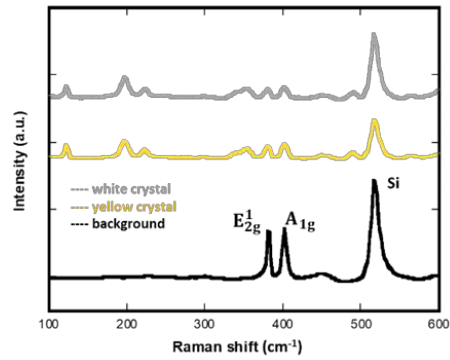


รูปที่ 4.20 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก,ง) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ผล (ข,จ) แสดงกราฟการสแกนรามานในช่วง  $100\text{-}600\text{ cm}^{-1}$  (ค,ฉ) แสดงความแตกต่างระหว่างพีค  $E_{2g}^1$  และ  $A_{1g}$

นอกจากโครงสร้างนาโนที่เกิดขึ้นภายหลังการเกิดของฟิล์มชั้นเดียว  $\text{MoS}_2$  แล้วนั้น ยังมีการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ชั้นกลางอันเนื่องมาจากการเกิดซัลเฟอร์ไรด์เซชันไม่สมบูรณ์จากการใช้อัตราส่วน S:Mo ที่ 1:1 และเพื่อเป็นการยืนยันวัสดุที่มีลักษณะเป็นผลึกสี่เหลี่ยมสีขาวและสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.21(ก) ที่เกิดขึ้นนั้นคือผลิตภัณฑ์ชั้นกลางสามารถยืนยันโดยการนำตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามาน ผลที่ได้พบว่าผลึกสี่เหลี่ยมดังกล่าวนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ชั้นกลาง  $\text{MoOS}_2$  เนื่องจากมีพีคอื่นปรากฏขึ้นนอกเหนือจากพีค  $E_{2g}^1$ ,  $A_{1g}$  และพีคของ Si แสดงดังรูปที่ 4.20 (ข)



(ก)

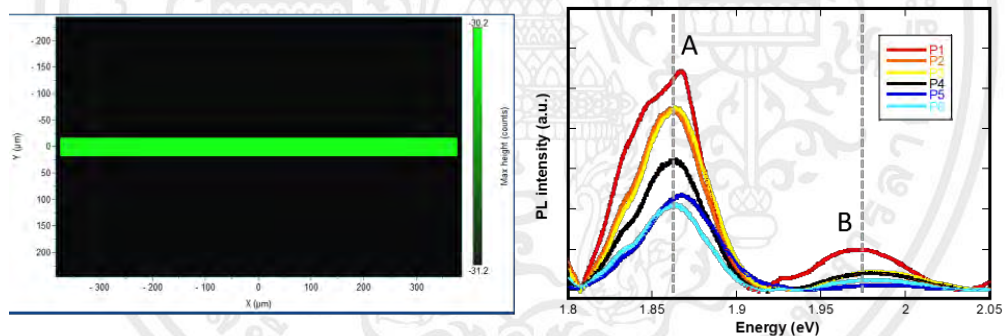


(ข)

รูปที่ 4.21 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (ก) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ผล (ข) แสดงกราฟการสแกนรามานในช่วง  $100\text{-}600\text{ cm}^{-1}$

#### 4.2.3 PL Spectroscopy

เพื่อยืนยันคุณภาพของฟิล์มจึงมีการตรวจสอบทางด้วยเทคนิค PL โดยสแกนเป็นเส้นวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนผ่านแบบกระตุ้นโดยตรงของ A และ B ที่เกิดขึ้นที่ประมาณ 1.86 และ 1.98 eV ตามลำดับและความเข้มสูงสุดของ A ที่ค่อนข้างใหญ่เป็นสิ่งยืนยันถึงฟิล์มชั้นเดียวและคุณภาพผลึกที่ดีของ  $\text{MoS}_2$  ที่เกิดขึ้น [64]



(ก)

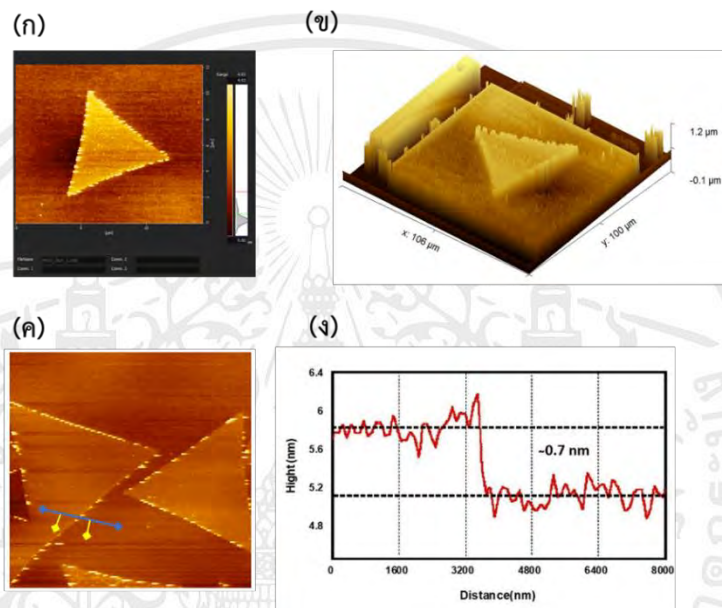
(ข)

รูปที่ 4.22 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PL (ก) สเปกตรัมการสแกนบนฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  (ข) กราฟ PL แสดงสถานะกระตุ้น A และ B ของ  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 Atomic Force Microscopy (AFM)

จากผลการวิเคราะห์ก่อนหน้าสามารถระบุความหนาจำนวนชั้นของ  $\text{MoS}_2$  ได้แต่ไม่สามารถเปิดเผยความหนาของชั้นได้จึงมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วยเทคนิค AFM เพื่อวัดความสูงโดยค่าที่สามารถวัดได้นั้นอยู่ที่ประมาณ 0.7 nm แสดงดังรูปที่ 4.22 (ค,ง) ค่านี้สอดคล้องกับความหนาของโครงสร้าง 0.615 nm สำหรับระบบ S-Mo-S ที่แยกออกมา ดังนั้นจึงยืนยันลักษณะชั้นเดียวของสามเหลี่ยม  $\text{MoS}_2$  เพื่อให้เห็นลักษณะสามเหลี่ยมที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนยิ่งขึ้นสามารถดูได้จากรูป 3 มิติแสดงดังรูปที่ 4.23 (ข)



รูปที่ 4.23 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM (ก) ภาพถ่าย AFM ของโดเมน  $\text{MoS}_2$  (ข) ภาพ 3 มิติของโดเมน  $\text{MoS}_2$  (ค) ตำแหน่งวัดความหนาของฟิล์ม (ง) กราฟแสดงความหนาของ  $\text{MoS}_2$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ AFM

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โดยผลสรุปแล้วเราได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการเกิดอย่างต่อเนื่องของ  $\text{MoS}_2$  ขึ้นเดี่ยวโดยใช้ VPS แบบขั้นตอนเดียวของ  $\text{MoO}_2$  แสดงรูปแบบโชนการเกิดอย่างชัดเจนในการไล่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของแหล่งกำเนิด Mo ที่อยู่บนพื้นผิว substrate ด้วยวิธีการต่อภาพที่ได้จากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีความละเอียดสูง เราสามารถระบุโชนการเกิดแตกต่างกันได้ทั้งหมด 4 โชน โดยด้านขอบบริเวณที่แก๊สเข้าของ substrate มีการเกิดที่ถูกปกคลุมด้วยวัสดุที่มีความหนาและมีวัสดุลักษณะเป็นแท่งก่อดำอยู่บน  $\text{MoS}_2$  ต่อเนื่อง ขณะที่ฟิล์มชั้นเดี่ยว  $\text{MoS}_2$  ขนาดใหญ่นั้นเกิดบริเวณเหนือขึ้นไปจากบริเวณที่แก๊สเข้าตามด้วยการเกิดของโดเมน  $\text{MoS}_2$  ที่โชนการเกิดด้านนอกสุด ซึ่งฟิล์มต่อเนื่อง  $\text{MoS}_2$  ที่เกิดในงาสนี้มีพื้นที่ขนาดใหญ่และเป็นเนื้อเดียวกันตามที่ได้รับ การตรวจสอบและยืนยันโดยการวิเคราะห์ด้วยรามานแล้วที่สำคัญไปกว่านั้นขนาดของเกรนโดเมนที่รวมตัวกันอย่างต่อเนื่องพบว่าพารามิเตอร์ที่มีบทบาทสำคัญนั้นเกิดจากอัตราการไหลของแก๊สที่ใช้ในการทดลองพบว่าเกรนมีขนาดลดลงจากประมาณ 30 เป็น 2  $\mu\text{m}$  จากการแยกขอบเกรนจาก SEM เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สเพิ่มจาก 10 เป็น 100 sccm ตามลำดับ จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ที่มีคุณภาพสูงนั้นเกิดได้ดีภายใต้เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สต่ำสุด ผลกระทบอันน่าทึ่งของอัตราการไหลของแก๊สแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นกระบวนการเกิดนั้นมีการเปลี่ยนจากการควบคุมทางเทอร์โมไดนามิกส์และกระบวนการเสถียรไปสู่การควบคุมทางจลนศาสตร์และไม่เสถียร การค้นพบที่สำคัญของงานนี้ก็คือช่วงกว้างของอัตราส่วนระหว่าง S:Mo ที่ผ่านการตรวจสอบวัสดุที่สังเคราะห์บนโชนการเกิดที่ระบุทั้งหมดพบว่าเป็น  $\text{MoS}_2$  เพียงอย่างเดียวตามที่ได้รับ การยืนยันโดยการวิเคราะห์รามานโดยไม่มีพีคของรามานเพิ่มเติมที่สอดคล้องกับสถานะชั้นกลางอื่น เช่น  $\text{MoOS}_2$  หรือ  $\text{MoO}_2$  ตรงกันข้ามกับรายงานก่อนหน้านี้ที่ใช้  $\text{MoO}_3$  เป็นสารตั้งต้นซึ่งพบว่าการก่อดำของสถานะชั้นกลาง  $\text{MoOS}_2$  เป็นผลลัพธ์ที่สำคัญของกระบวนการเกิด แม้ว่าจะมีอัตราส่วนโมลาร์ S:Mo ที่สูงมาก สิ่งนี้เป็นการยืนยันเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการใช้วิธีการ VPS ขั้นตอนเดียวสำหรับการสังเคราะห์  $\text{MoS}_2$  การทดลองของเราเปิดเผยว่าการก่อดำของสถานะชั้นกลางนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นโดยที่ทราบดีว่าอัตราส่วนโมลาร์ของ S:Mo ทั่วโลกที่ใช้ยังคงมากกว่า 3:1 ซึ่งจำเป็นต้องใช้ปริมาณสัมพันธ์โดยปฏิกิริยา VPS ของ  $\text{MoS}_2$  ท้ายที่สุดแล้วในขณะที่เรายังไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเกิดของ  $\text{MoS}_2$  แบบต่อเนื่องในระดับที่สามารถปกคลุมทั่วทั้งเวเฟอร์ได้โดยใช้ VPS โดยตรงของ  $\text{MoO}_2$  หลักการในการปรับปรุงให้ครอบคลุมพื้นที่ผ่านการกระจายแบบสม่ำเสมอของแหล่งกำเนิด  $\text{MoO}_2$  ได้รับการทดสอบและดูเหมือนว่าจะให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หรือในสื่ออื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการทำงานมากขึ้นเพื่อปรับปรุงและแก้ไขความเป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์มที่เกิดแล้ว เราเชื่อว่ากลไกปฏิกิริยาอย่างง่ายของ VPS ของ  $\text{MoO}_2$  และความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องของการใช้วัสดุนี้เป็นสารตั้งต้นทำให้เป็นทางเลือกที่มีแนวโน้มสำหรับผลิตฟิล์ม  $\text{MoS}_2$  ชั้นเดียวให้ได้พื้นที่ขนาดใหญ่ที่ไม่เพียงมีคุณภาพสูงเท่านั้นแต่ยังเข้ากันได้กับมาตรฐาน CMOS ที่มีอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz, Atomically Thin MoS<sub>2</sub>: A New Direct-Gap Semiconductor, *Phys. Rev. Lett.*, 105 (2010) 136805.
- [2] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis, Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors, *Nat. Nanotechnol.*, 6 (2011) 147-150.
- [3] O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic, A. Kis, Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS<sub>2</sub>, *Nature Nano*, 8 (2013) 497-501.
- [4] M.L. Tsai, S. H. Su, J.K. Chang, D.S. Tsai, C.H. Chen, C.I. Wu, L.J. Li, L.J. Chen, J.H. He, Monolayer MoS<sub>2</sub> Heterojunction Solar Cells, *ASC nano*, 8 (2014) 8317–8322
- [5] H. Li, Z. Yin, Q. He, H. Li, X. Huang, G. Lu, D.W. H. Fam, A.I.Y. Tok, Q. Zhang, H. Zhang, Fabrication of single- and multilayer MoS<sub>2</sub> film-based field-effect transistors for sensing NO at room temperature, *Small*, 8 (2012) 63-67.
- [6] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 306(2004) 666-669.
- [7] M. Ashton, J. Paul, S. B. Sinnott, R. G. Hennig, Topology-scaling identification of layered solids and stable exfoliated 2D materials, *Phys. Rev. Lett.*, 118 (2017) 106101.
- [8] C. Soldano, A. Mahmood, E. Dujardin, Production, properties and potential of graphene, *Carbon*, 48 (2010) 2127-2150.
- [9] M.J. Allen, V. C. Tung, R. B. Kaner, Honeycomb carbon: a review of graphene, *Chem. Rev.*, 110 (2009) 132-145.
- [10] S.Z. Butler, S.M. Hollen, L. Cao, Y. Cui, J. A. Gupta, H.R. Gutiérrez, T.F. Heinz, S.S. Hong, J. Huang, A.F. Ismach, Progress, challenges, and opportunities in two-dimensional materials beyond graphene, *ACS Nano*, 7 (2013) 2898-2926.
- [11] S. Stankovich, D.A. Dikin, G.H. Dommett, K.M. Kohlhaas, E.J. Zimney, E. A. Stach, R.D. Piner, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Graphene-based composite materials, *Nature*, 442 (2006) 282.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] D. Chimene, D.L. Alge, A.K. Gaharwar, Two-dimensional nanomaterials for biomedical applications: emerging trends and future prospects, *Adv. Mater.*, 27 (2015) 7261-7284.
- [13] K.H. Oh, D. Lee, M.J. Choo, K. H. Park, S. Jeon, S. H. Hong, J.K. Park, J.W. Choi, Enhanced durability of polymer electrolyte membrane fuel cells by functionalized 2D boron nitride nanoflakes, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6 (2014) 7751-7758.
- [14] A. F. Khan, E.P. Randviir, D. A. Brownson, X. Ji, G.C. Smith, C.E. Banks, 2D Hexagonal Boron Nitride (2D-hBN) Explored as a Potential Electrocatalyst for the Oxygen Reduction Reaction, *Electroanalysis*, 29 (2017) 622-634.
- [15] S. Wachter, D.K. Polyushkin, O. Bethge, T. Mueller, A microprocessor based on a two-dimensional semiconductor, *Nat. Commun.*, 8 (2017) 14948.
- [16] D. Jariwala, V.K. Sangwan, L.J. Lauhon, T.J. Marks, M. C. Hersam, Emerging device applications for semiconducting two-dimensional transition metal dichalcogenides, *ACS Nano*, 8(2014) 1102-1120.
- [17] K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz, Atomically Thin MoS<sub>2</sub>: A New Direct-Gap Semiconductor, *Phys. Rev. Lett.*, 105(2010)136805.
- [18] J. Sun, X. Li, W. Guo, M. Zhao, X.Fan , Y. Dong , C. Xu , Synthesis Methods of Two-Dimensional MoS<sub>2</sub>: A Brief Review, *Crystals*, 7(2017)198.
- [19] A. Castellanos-Gomez, M. Barkelid, A.M. Goossens, V.E. Calado, H. S. J. van der Zant, G. A. Steele, Laser-Thinning of MoS<sub>2</sub>: On Demand Generation of a Single-Layer Semiconductor, *Nano Lett.*, 12 (2012) 3187–3192
- [20] X.Fan, P. Xu, D. Zhou, Y. Sun, Y.C. Li, M.A.T. Nguyen, M. Terrones, T.E. Mallouk, Fast and efficient preparation of exfoliated 2H MoS<sub>2</sub> nanosheets by sonication-assisted lithium intercalation and infrared laser-induced 1T to 2H phase reversion, *Nano Lett.*, 15 (2015) 5956–5960.
- [21] K.K. Liu, W. Zhang, Y.H. Lee, Y.C. Lin, M.T. Chang, C.Y. Su, C.S. Chang, H. Li, Y. Shi, H. Zhang, C.S. Lai, L. Jong, Growth of Large-Area and Highly Crystalline MoS<sub>2</sub> Thin Layers on Insulating Substrates, *Nano Lett.*, 12 (2012) 1538–1544.

- [22] A. M. van der Zande, P.Y. Huang, D.A. Chenet, T.C. Berkelbach, Y. You, G. H. Lee, T.F. Heinz, D.R. Reichman, D.A. Muller, J.C. Hone, Grains and grain boundaries in highly crystalline monolayer molybdenum disulphide, *Nat. Mater.*, 12 (2013) 554-561.
- [23] S. Wu, C. Huang, G. Aivazian, J.S. Ross, D.H. Cobden, X. Xu, Vapor–solid growth of high optical quality  $\text{MoS}_2$  monolayers with near-unity valley polarization, *ACS Nano*, 7(2013) 2768–2772.
- [24] D. Zhou, H. Shu, C. Hu, L. Jiang, P. Liang, X. Chen, Unveiling the growth mechanism of  $\text{MoS}_2$  with chemical vapor deposition: From two-dimensional planar nucleation to self-seeding nucleation., *Cryst. Growth Des.*, 18(2018) 1012–1019.
- [25] J.V. Pondick, J.M. Woods, J. Xing, Y. Zhou, J.J. Cha, Stepwise Sulfurization from  $\text{MoO}_3$  to  $\text{MoS}_2$  via Chemical Vapor Deposition, *ACS Appl. Nano Mater.*, 1 (2018) 5655–5661.
- [26] L. Tao, K. Chen, Z. Chen, W. Chen, X. Gui, H. Chen, X. Li, and J.B. Xu, Centimeter-Scale CVD Growth of Highly Crystalline Single-Layer  $\text{MoS}_2$  Film with Spatial Homogeneity and the Visualization of Grain Boundaries, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9 (2017) 12073–12081.
- [27] Y. Zhan, Z. Liu, S. Najmaei, P. M. Ajayan, and J. Lou, Large-Area Vapor-Phase Growth and Characterization of  $\text{MoS}_2$  Atomic Layers on a  $\text{SiO}_2$  Substrate, *Small*, 8 (2012) 966–971.
- [28] Y. Ding, Y. Wang, J. Ni, L. Shi, S. Shi, and W. Tang, First principles study of structural vibrational and electronic properties of graphene-like  $\text{MX}_2$  ( $\text{M}=\text{Mo}, \text{Nb}, \text{W}, \text{Ta}$ ;  $\text{X}=\text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) monolayers, *Phys. B: Condens. Matter*, 6(2011)2254–2260.
- [29] W. Zhao, J. Pan, Y. Fang, X. Che, D. Wang, K. Bu, and F. Huang, Metastable  $\text{MoS}_2$ : crystal structure, electronic band structure, synthetic approach and intriguing physical properties, *Chem. Eur. J.*, 24 (2018) 15942-15954.
- [30] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, C. Y. Chim, G. Galli, and Feng Wang, Emerging Photoluminescence in Monolayer  $\text{MoS}_2$ , *Nano Lett.*, 10 (2010) 1271–1275.
- [31] S. Ahmad, S. Mukherjee, A Comparative Study of Electronic Properties of Bulk  $\text{MoS}_2$  and Its Monolayer Using DFT Technique: Application of Mechanical Strain on  $\text{MoS}_2$  Monolayer, *Graphene*, 10 (2021)6.
- [32] A. Kuc, N. Zibouche, T. Heine, Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide  $\text{TS}_2$ , *Phys. Rev. B*, 83 (2011) 245213.

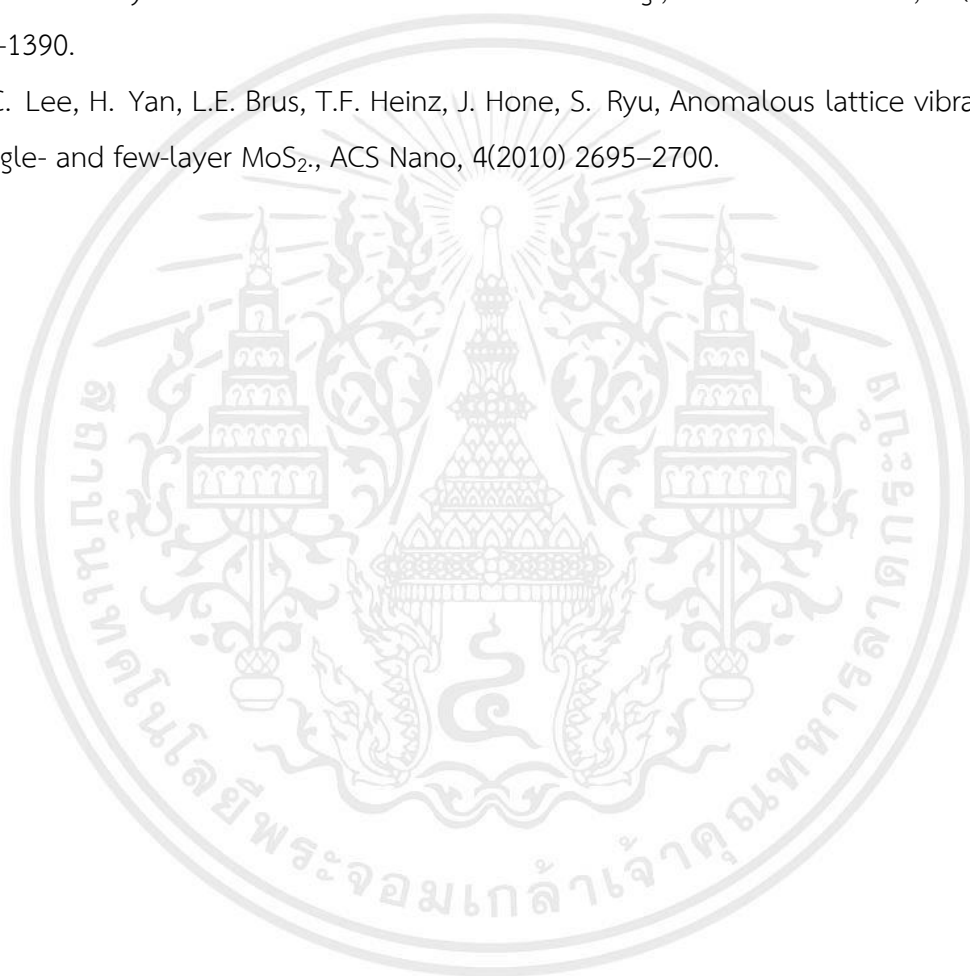
- [33] Y. Yoon, K. Ganapathi, and S. Salahuddin, How Good Can Monolayer MoS<sub>2</sub> Transistors Be?, *Nano Lett.* 11 (2011) 3768–3773.
- [34] K. Kaasbjerg, K. S. Thygesen, K. W. Jacobsen, Phonon-limited mobility in n-type single-layer MoS<sub>2</sub> from first principles, *Phys. Rev. B*, 85 (2012)115317.
- [35] K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T. F. Heinz, Atomically Thin MoS<sub>2</sub>: A New Direct-Gap Semiconductor, *Phys. Rev. Lett.*, 105 (2010)136805.
- [36] G. Eda, H. Yamaguchi, D. Voiry, T. Fujita, M. Chen, M. Chhowalla, Photoluminescence from Chemically Exfoliated MoS<sub>2</sub>, *Nano Lett.* ,11, 12 (2011) 5111–5116.
- [37] L. Chen, F. Xue, X. Li, X. Huang, L. Wang, J. Kou, Z. L. Wang, Strain-Gated Field Effect Transistor of a MoS<sub>2</sub>–ZnO 2D–1D Hybrid Structure, *ACS Nano*, 10 (2016)1546–1551.
- [38] Z. Yin, H. Li, H. Li, L. Jiang, Y. Shi, Y. Sun, G. Lu, Q. Zhang, X. Chen, H. Zhang, Single-Layer MoS<sub>2</sub> Phototransistors, *ACS Nano*, 6 (2012) 74–80.
- [39] P. Ni, A. D. L. Bugallo, X. Yang, V. Arreola, M. F. Salazar, E. Strupiechonski, B. Alloing, C. Shan, P. Genevet, Hybrid MoS<sub>2</sub>-gap-mode metasurface photodetectors, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52 (2019) 374001.
- [40] P. Lemmer, M. Gunkel, D. Baddeley, R. Kaufmann, A. Urich, Y. Weiland, J. Reymann, P. Müller, M. Hausmann, C. Cremer, SPDM: light microscopy with single-molecule resolution at the nanoscale, *Appl. Phys. B.*, 93 (2008) 1–12.
- [41] J. Pawley, The development of field emission scanning electron microscopy for imaging biological surfaces, *Scanning*, 19 (1997) 324–336.
- [42] Z. Li, M. J. Deen, S. Kumar, P.R. Selvaganapathy, Raman Spectroscopy for In-Line Water Quality Monitoring — Instrumentation and Potential, *Sensors*, 14 (2014)17275–17303.
- [43] Y. Cao, Z. Wang, Q. Bian, Z. Cheng, Z. Shao, Z. Zhang, H. Sun, X. Zhang, S. Li, H. Gedeon, L. Liu, X. Wang, H. Yuan, and M. Pan, Phonon modes and photonic excitation transitions of MoS<sub>2</sub> induced by top-deposited graphene revealed by Raman spectroscopy and photoluminescence, *Appl. Phys. Lett.*, 114(2019)133103.
- [44] G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber, Atomic Force Microscope, *Phys. Rev. Lett.*, 56 (1986)930.

- [45] S. Wang, Y. Rong, Y. Fan, M. Pacios, H. Bhaskaran, K. He, J.H. Warner, Shape Evolution of Monolayer MoS<sub>2</sub> Crystals Grown by Chemical Vapor Deposition, *Chem. Mater.*, 26 (2014) 6371–6379.
- [46] A. Özden, F. Ay, C. Sevik and N. K. Perkgöz, CVD growth of monolayer MoS<sub>2</sub>: Role of growth zone configuration and precursors ratio, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56 (2012)
- [47] J. Cheng, C. Shen, Y. He, H. Wei, S. Liu, P. Qiu, Y. Song, S. Wei, Z. Wang, X. Zheng, M. Peng, Reaction mechanism transformation of LPCVD-grown MoS<sub>2</sub> from isolated triangular grains to continuous films, *J. Alloys Compd.*, 853 (2021) 157374.
- [48] S. Durairaj, P. Krishnamoorthy, N. Raveendran, B. D. Ryu, C. H. Hong, T. H. Seoc and S. Chandramohan, Barrier-assisted vapor phase CVD of large-area MoS<sub>2</sub> monolayers with high spatial homogeneity, *Nanoscale Adv.*, 2(2020)4106.
- [49] s. Kataria, S. Wagner, T. Cusati, A. Fortunelli, G. Iannaccone, H. Pandey, G. Fiori, M.C. Lemme, Growth-induced strain in chemical vapor deposited monolayer MoS<sub>2</sub>: Experimental and theoretical investigation. *Adv. Mater. Interfaces*, 4 (2017) 1–9.
- [50] W.C. Cho, K.L. Wu, P.S. Yip, X. Wang, Y. Chai, K.M. Lau, Selectable synthesis of 2-D MoS<sub>2</sub> and its electronic devices: From isolated triangular islands to large-area continuous thin film. *IEEE, Trans. Nanotechnol.*, 15 (2016) 310–317.
- [51] R. A. Vilá, K. Momeni, Q. Wang, B.M. Bersch, N. Lu, M.J. Kim, L.Q. Chen, J.A. Robinson, Bottom-up synthesis of vertically oriented two-dimensional materials. *2D, Mater.*, 3(2016)
- [52] N. Kumar, R. Tomar, N. Wadehra, M.M. Devi, B. Prakash, S. Chakraverty, Growth of highly crystalline and large-scale monolayer MoS<sub>2</sub> by CVD: The role of substrate position., *Cryst. Res. Technol.*, 53(2018)1–7.
- [53] J.R. Lince, M.R. Hilton, A.S. Bommannavar, Oxygen substitution in sputter deposited MoS<sub>2</sub> films studied by extended X-ray absorption fine structure, X-ray photoelectron spectroscopy and X-ray diffraction., *Surf. Coat. Technol.*, 43–44(1990)640–651.
- [54] X.L. Li Y.D. Li, Formation of MoS<sub>2</sub> inorganic fullerenes (IFs) by the reaction of MoO<sub>3</sub> nanobelts and S. *Chem. A Eur. J.*, 9(2003)2726–2731.
- [55] T. Weber, J.C. Muijsers, J.H.M.C. Van Wolput, C.P.J. Verhagen, J.W. Niemantsverdriet, Basic reaction steps in the sulfidation of crystalline MoO<sub>3</sub> to MoS<sub>2</sub>, as studied by X-ray photoelectron and infrared emission spectroscopy., *J. Phys. Chem.* 100(1996)14144–14150.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [56] D.M. Dobkin, M.K. Zuraw, Principles of Chemical Vapor Deposition; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003; ISBN 978-94-017-0369-7.
- [57] S.Y. Yang, G.W. Shim, S.B. Seo, S.Y. Choi, Effective shape-controlled growth of monolayer MoS<sub>2</sub> flakes by powder-based chemical vapor deposition., *Nano Res.*, 10(2017) 255–262.
- [58] S. Najmaei, Z. Liu, W. Zhou, X. Zou, G. Shi, S. Lei, B.I. Yakobson, J.C. Idrobo, P.M. Ajayan, J. Lou, Vapour phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers., *Nat. Mater.*, 12(2013) 754–759
- [59] T. Han, H. Liu, S. Wang, W. Li, S. Chen, X. Yang, M. Cai, Research on the factors affecting the growth of large-size monolayer MoS<sub>2</sub> by APCVD., *Materials*, 11(2018) 2562.
- [60] V. Senthikumar, L.C. Tam, Y.S. Kim, Y. Sim, M.J. Seong, J.I. Jang, Direct vapor phase growth process and robust photoluminescence properties of large area MoS<sub>2</sub> layers., *Nano Res.*, 7(2014)1759–1768.
- [61] S.K. Kang, H.S. Lee, Study on growth parameters for monolayer MoS<sub>2</sub> synthesized by CVD using solution-based metal precursors., *Appl. Sci. Conver. Technol.*, 28(2019) 159–163.
- [62] I. Bilgin, F. Liu, A. Vargas, A. Winchester, M.K.L. Man, M. Upmanyu, K.M. Dani, G. Gupta, S. Talapatra, Mohite, A. D.; et al. Chemical vapor deposition synthesized atomically thin molybdenum disulfide with optoelectronic-grade crystalline quality., *ACS Nano*, 9(2015) 8822–8832.
- [63] J. Shi, D. Wu, X. Zheng, D. Xie, F. Song, X. Zhang, J. Jiang, X. Yuan, Y. Gao, H. Huang, From MoO<sub>2</sub>@MoS<sub>2</sub> Core–Shell Nanorods to MoS<sub>2</sub> Nanobelts., *Phys. Status Solidi Basic Res.*, 255(2018) 1–7.
- [64] S. Hu, J. Li, X. Zhan, S. Wang, L. Lei, Y. Liang, H. Kang, Y. Zhang, Z. Chen, Y. Sui, et al., Aligned monolayer MoS<sub>2</sub> ribbons growth on sapphire substrate via NaOH-assisted chemical vapor deposition., *Sci. China Mater.*, 63(2020)1065–1075.
- [65] L. Gao, W. Ren, H. Xu, L. Jin, Z. Wang, T. Ma, L.P. Ma, Z. Zhang, Q. Fu, L.M. Peng, et al., Repeated growth and bubbling transfer of graphene with millimetre-size single-crystal grains using platinum. *Nat. Commun*, 3(2012) 699.
- [66] Z. Lin, Y. Zhao, C. Zhou, R. Zhong, X. Wang, Y.H. Tsang, Y. Chai, Controllable growth of large-size crystalline MoS<sub>2</sub> and resist-free transfer assisted with a Cu thin film. *Sci. Rep.*, 5(2015)1–10.

- [67] Q. Wang, N. Li, J. Tang, J. Zhu, Q. Zhang, Q. Jia, Y. Lu, Z. Wei, H. Yu, Y. Zhao et al, Wafer- Scale Highly Oriented Monolayer MoS<sub>2</sub> with Large Domain Sizes. *Nano Lett*, 20 (2020)7193–7199.
- [68] S. Wang, M. Pacios, H. Bhaskaran, J.H. Warner, Substrate control for large area continuous films of monolayer MoS<sub>2</sub> by atmospheric pressure chemical vapor deposition. *Nanotechnology*, 27(2016) 085604.
- [69] H. Li, Q. Zhang, C.C.R. Yap, B.K. Tay, T.H.T. Edwin, A. Olivier, D. Baillargeat, From bulk to monolayer MoS<sub>2</sub>: Evolution of Raman scattering., *Adv. Funct. Mater.*, 22(2012) 1385–1390.
- [70] C. Lee, H. Yan, L.E. Brus, T.F. Heinz, J. Hone, S. Ryu, Anomalous lattice vibrations of single- and few-layer MoS<sub>2</sub>., *ACS Nano*, 4(2010) 2695–2700.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวติณณา เชี่ยวชาญ
วัน/เดือน/ปีเกิด	25 มิถุนายน 2539
ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน	80 ม.6 ต.ป่าสะแก อ.เดิมบางนางบวช จ.สุพรรณบุรี 72120
ประวัติการศึกษา	ปีที่จบการศึกษา พ.ศ.2562 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.06 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีที่จบการศึกษา พ.ศ.2564 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์- ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.75 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย
ผลงานการตีพิมพ์	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 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 <b>Tinna Chiawchan</b>, Harihara Ramamoorthy, Kanokwan Buapan and Ratchanok Somphonsane Nanomaterials 11(10),2642(2021), Q1, IF 5.076</li> <li>2. Exploration of the temperature-dependent correlations present in the structural, morphological and electrical properties of thermally reduced free-standing graphene oxide papers Harihara Ramamoorthy, Kanokwan Buapan, <b>Tinna Chiawchan</b>, Krongtham Thamkrongart and Ratchanok Somphonsane Journal of Materials Science 56, 15134–15150 (2021); Q1, IF 4.22</li> <li>3. Versatile, Low-Cost, and Portable 2D Material Transfer Setup with a Facile and Highly Efficient DIY Inert-Atmosphere Glove Compartment Option Kanokwan Buapan, Ratchanok Somphonsane, <b>Tinna Chiawchan</b> and Harihara Ramamoorthy ACS Omega 6, 28, 17952–17964 (2021), Q1, IF 3.512</li> </ol>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้