

โครงการที่ 32/2562 (วศบ.อุตสาหกรรม)



การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างกราฟินด้วยเทคนิคพลาสมา
สปีดเตอริง

นางสาวณัฐวรา	ชั้นจุล	รหัสนักศึกษา 590610275
นางสาวลลันลลิต	อาชีวะนันท์	รหัสนักศึกษา 590610331

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2562

หัวข้อโครงการ	การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างฟิล์มกราฟีนด้วยเทคนิคพลาสมา สเปตเตอริง	
โดย	นางสาวณัฐวรา ชันธิกุล	รหัสนักศึกษา 590610275
	นางสาวลลันลลิต อาชีวะนันท์	รหัสนักศึกษา 590610331
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล	
ปีการศึกษา	2562	

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อนุมัติให้นับ
โครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ประธานกรรมการ

กรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.นิวิธ เจริญใจ)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์)

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการวิจัยเรื่อง การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างฟิล์มกราฟีนด้วยเทคนิคพลาสมาสเปตเตอร์สามารถดำเนินไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากหลายๆ ฝ่าย ซึ่งหากไม่มีบุคคลเหล่านี้โครงการวิจัยนี้อาจไม่ประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ที่เป็นประโยชน์ พร้อมทั้งตรวจทานแก้ไขโครงการวิจัยเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้จัดทำขอกราบขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความรู้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนบุคลากรทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณอาจารย์ บุคลากร และภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ รวมถึงศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่เอื้ออำนวยสถานที่อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรประจำห้องเครื่องมือกลาง ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และช่วยเหลือในการวิเคราะห์ชิ้นงาน

ขอขอบพระคุณ นายรณพณ วัชรวิสาร และนางสาวทิพวรรณ เมฆวิไล ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และเสนอแนวทางการแก้ไขปรับปรุง ตลอดจนคอยให้คำปรึกษาตลอดมา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายท่านที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยเป็นอย่างสูงในข้อบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้คงมีประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนผู้ที่สนใจต่อไป

ณัฐวรา ชันธิกุล

ลัคน์ลลิต อาชีวะนันท์

หัวข้อโครงการ	การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างฟิล์มกราฟีนด้วยเทคนิคพลาสมา สเปตเตอร์ริง	
โดย	นางสาวณัฐวรา ชันธิกุล	รหัสนักศึกษา 590610275
	นางสาวลลันลลิต อาชีวะนันท์	รหัสนักศึกษา 590610331
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล	
ปีการศึกษา	2562	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนบนกระจกด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี โดยศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 3 ปัจจัย โดยปัจจัยมี 2 ระดับ คือ 2^3 ปัจจัยการทดลอง ได้แก่ กำลังไฟฟ้า เวลาในการดิสชาร์จของพลาสมา และอัตราส่วนระหว่าง แก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ทำการทดลอง 2 ชั่วโมง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 บล็อก และทดสอบความเป็นเส้นโค้งกึ่งกลาง 5 ชั่วโมง ซึ่งชิ้นงานจะแบ่งเป็น 21 ชุด ตามเงื่อนไขการทดลอง ชุดละ 6 ชิ้น ขนาด 1×1 เซนติเมตร โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของการทดลองแต่ละเงื่อนไขด้วยการนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส วิเคราะห์เอกลักษณ์ของกราฟีนด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยมีผลการทดลอง หรือผลตอบ คือความหนาของฟิล์มกราฟีน

จากผลการทดลองพบว่า จากการสังเกตชิ้นงานหลังทำการประยุกต์พลาสมา การวัดค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานสามารถตรวจสอบได้เพียงว่าพื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ คือ เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา และกำลังไฟฟ้า โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการดิสชาร์จพลาสมา คือ เวลาในการดิสชาร์จ 10 นาที กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ และอัตราส่วนผสมระหว่างแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30 : 70 โดยมีค่าพยากรณ์ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 77.2873 นาโนเมตร

Project Title	Finding the Optimal Parameter for Generated Graphene by Plasma Sputtering
Name	Natwara Kanthikul 590610275 Lanlalit Acheewanunt 590610331
Department	Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
Project Advisor	Associate Professor Komgrit Leksakul, D.Eng.
Academic Year	2019

ABSTRACT

This research aims to study the Optimal Parameter for Generated Graphene by using Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) process. This study uses full factorial design of 3 factors. There are 2 levels which are 2^3 factorial design including Electric Power, the ratio of Acetylene (C_2H_2) and Hydrogen (H_2) and time of discharge. The experiment has 2 replicates, 1 block, and 5 center point tests. The total number of experiments is 21 experiments. Comparing the difference of each experiment by contact angle measurement identify the thin film by Raman spectroscopy and using Atomic Force Microscope for thickness measurement. The result of the experiment is the thickness of a thin film.

The results revealed that contact angle measurement can indicate only the changed surface of the sample. The factors that significantly affect the experiment are the time of discharging and electric power. The optimal factors for a plasma discharge are a time of discharging is 10 minutes, electric power is 50 Watt and the ratio between C_2 : H_2 is 30:70. The Forecast thickness of the thin film is 77.2873 nanometer.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีบท	
2.1 โครงสร้างคาร์บอน (Carbon Structure)	5
2.2 กราฟีน (Graphene)	8
2.3 ก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene : C_2H_2)	12
2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen : H_2)	13
2.5 อาร์กอน (Argon : Ar)	14
2.6 พลาสมา (Plasma)	14
2.7 การตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)	18
2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	22
2.9 การตรวจสอบลักษณะของวัสดุ	24
2.10 สรุปงานวิจัยที่ศึกษา	26
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทำวิจัย	
3.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล 2^k	29
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการสังเคราะห์กราฟีน	31
3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.4	การวิเคราะห์ชิ้นงาน	34
3.5	การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความหนา (Nanoscope SPM)	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล		
4.1	ผลการตรวจสอบค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวของชิ้นงาน	39
4.2	ผลการตรวจสอบลักษณะสัญญาณของชิ้นงาน	40
4.3	การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทป	41
4.4	ผลการวิเคราะห์อัตลักษณ์ของชิ้นงานด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี	47
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน		
5.1	อภิปรายผลการทดลอง	47
5.2	สรุปผลการดำเนินงาน	48
5.3	ข้อเสนอแนะ	49
5.4	ปัญหา และแนวทางการแก้ไข	50
บรรณานุกรม		52
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก ตารางอัตราส่วนผสมของก๊าซอะเซทิลีน และก๊าซไฮโดรเจนใน		53
การทำการทดลอง		
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง		55
ประวัติผู้เขียน		59

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	รายละเอียดของปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัย และสัญลักษณ์	28
3.2	การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล (2^k)	32
4.1	เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา) ของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการประยุกต์พลาสมา และทำการประยุกต์พลาสมาตามเงื่อนไขต่าง ๆ	38
4.2	การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	40
4.3	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสีนใจ (R-Square)	41
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบความหนาของฟิล์มบาง	41
4.5	ความหนาของฟิล์มบางในเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการทดลอง	45
5.1	ปัญหา และแนวทางการแก้ไข	48

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 การตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา	3
2.1 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) หรือบั๊กกี้บอล (Buckyballs)	6
2.2 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	6
2.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์	7
2.4 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเพชร	8
2.5 ความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของอัญรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้างกราฟีน	9
2.6 ความโปร่งแสงของกราฟีน 2 ชั้น และภาพจากกล้องจุลทรรศน์	10
2.7 แสดงความแตกต่างของสารในแต่ละสถานะ	15
2.8 กระบวนการการออกแบบการทดลอง	19
2.9 ลักษณะชิ้นงาน และการทดสอบในเครื่องวัดคุณสมบัติของหยดน้ำ	22
2.10 แผนภาพแสดงหลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	23
2.11 แผนภาพแสดงหลักการการทำงานของเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี	26
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวม	27
3.2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการดิสซาร์จ	30
3.3 แสดงการประยุกต์พลาสมาอะเซทิลีน และไฮโดรเจน	32
3.4 แสดงการหยุดของเหลวบนชิ้นงาน	34
3.5 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล (Raman Spectroscopy)	35
3.6 หน้าจอแสดงการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ความหนา (Nanoscope SPM)	36
3.7 การประมวลผลการวิเคราะห์บนหน้าจอคอมพิวเตอร์	36
4.1 กระจกสไลด์ที่ผ่านการประยุกต์พลาสมา	38
4.2 การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	39
4.3 กราฟความน่าจะเป็นแสดงผลกระทบต่อความหนาของฟิล์มหลังการประยุกต์พลาสมา	42
4.4 กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของผลตอบความหนาของฟิล์มกราฟีน	43
4.5 กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยสำหรับผลตอบความหนาของฟิล์มบาง	44
4.6 กราฟการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยวิธีรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงการ

ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ซิลิคอนมีบทบาทสำคัญอย่างมาก ซิลิคอนถูกนำไปใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น ชิป (Chip) ซึ่งก็คือแผงวงจรไฟฟ้าขนาดเล็กทำหน้าที่ประมวลผล เก็บข้อมูล และส่งข้อมูล เปรียบเสมือนสมองของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ถูกสร้างมาจากชิ้นส่วนที่เรียกว่าสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และส่วนใหญ่ถูกผลิตอยู่บนแผงซิลิคอน

ในขณะที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลังพบกับอุปสรรคต่อการพัฒนาแบบก้าวกระโดดตามกฎหมายของมัวร์ (Moore's Law) ที่คาดการณ์ไว้ใน ค.ศ. 1975 ว่า ในทุกสองปีคอมพิวเตอร์จะเร็วขึ้นเป็นสองเท่าตัว ซึ่งทรานซิสเตอร์ที่ทำจากซิลิคอนนั้นปัจจุบันมีขนาด 14 นาโนเมตร หากเป็นไปตามกฎหมายของมัวร์ ทรานซิสเตอร์ควรมีขนาดเล็กลงเหลือเพียง 2-3 นาโนเมตร หรือเท่ากับซิลิคอน 10 อะตอมเรียงต่อกัน ซึ่งจะทำให้พฤติกรรมของอิเล็กตรอนเกิดความไม่แน่นอนตามหลักควอนตัมฟิสิกส์ (Quantum Uncertainty) จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การหาวัสดุชนิดใหม่มาทดแทนซิลิคอนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นการค้นคว้าวิจัยที่สำคัญในปัจจุบัน และกราฟีนก็เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด

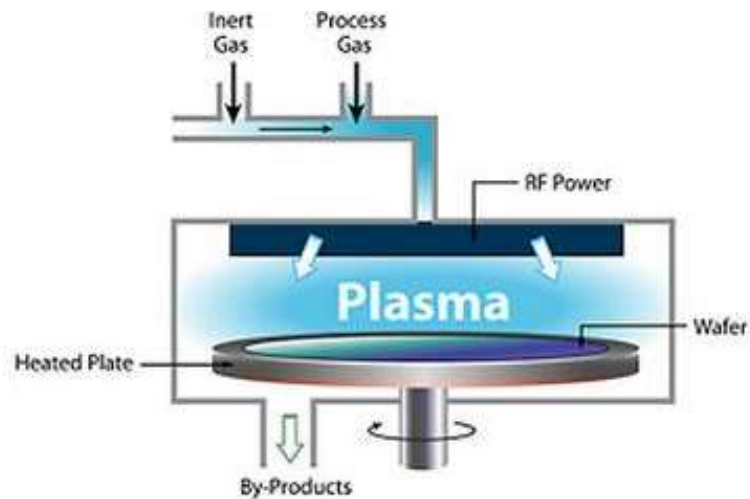
กราฟีน (Graphene) เป็นวัสดุแผ่นเสมือนสองมิติ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเรียงตัวต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง และเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะเหมือนกับรังผึ้ง คุณสมบัติของกราฟีน คือ เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าถึง 200 เท่า มีความโปร่งใส (Transparent) โดยแสงสามารถส่องผ่านได้กว่า 97 เปอร์เซ็นต์เป็นวัสดุที่บางที่สุดในโลก ดังนั้นจึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนั้นกราฟีนยังนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโลหะทองแดงถึง 4 เท่า เพราะการส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านความแข็งแรงจึงมีการนำกราฟีนคอมโพสิต (Graphene Composite) มาทำไม้เบดมินตัน

และไม่เหนียว ทำให้ได้อุปกรณ์กีฬาที่มีความแข็งแรงทนทานแต่น้ำหนักเบากว่าเดิม มีการนำไปทำเป็นเกราะกันกระสุนแทนเคฟลาร์ หน้าจอแบบสัมผัสที่โค้งงอได้ ขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ และวัสดุนำส่งยาระดับนาโนในทางการแพทย์ เป็นต้น

พลาสมา (Plasma) เป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เกิดจากการให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัว และกลายเป็นพลาสมาในที่สุด ปัจจุบันมีการนำมาพลาสมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในทางการแพทย์ และประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการเกษตรกรรม อาทิเช่น การสร้างสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นพลาสมาเพื่อใช้ทดแทนน้ำ หรือปุ๋ย สำหรับการเร่งการเจริญเติบโตของพืช ผัก และผลไม้ รวมทั้งการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาทั้งแบบสารละลาย และก๊าซในการล้างสารพิษตกค้างในผัก และผลไม้ นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้ในกรรมวิธีพื้นผิวที่ใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาเคมีเป็นหลัก เช่น การกัดกรวด (Etching) ของสารกึ่งตัวนำ และการเคลือบผิววัสดุ (Thin Film Coating) ที่ผิวหน้าพลาสติก เป็นต้น

เนื่องจากการเคลือบด้วยกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยความร้อนต้องทำให้อุณหภูมิสูงจึงไม่สามารถใช้กับงานบางประเภทได้ เช่น การผลิตชิปวงจรรวมต้องมีการเคลือบห่อหุ้มวงจรรวมด้วยสารเคลือบซิลิคอนไนไตรด์ เพื่อป้องกันระบบวงจรที่อยู่ภายในจากความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งขั้นตอนนี้ไม่สามารถใช้อุณหภูมิเกิน 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้ชิปวงจรรวมเสียหาย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาขึ้น

การตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : PECVD) เป็นกระบวนการที่ใช้พลาสมาในการสร้างปฏิกิริยาสะสมไอเคมี มีการเพิ่มขั้วไฟฟ้าเข้าไปในตัวเคลือบที่ใช้ความดันต่ำ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายระหว่างขั้วไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของไอเคมีที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นแตกตัวเป็นพลาสมา เนื่องจากสารตั้งต้นที่แตกตัว และอยู่ในสถานะพลาสมาจึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีจากการสร้างสารเคลือบเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติมาก



ภาพ 1.1 การตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา

ที่มา : <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu>

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค (Design of Experiment : DOE) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มกราฟีนด้วยเทคนิคพลาสมาสปัตเตอริง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างฟิล์มบาง 3 ปัจจัยคือ ความของดันก๊าซ เวลาในการดิซชาร์จพลาสมา และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับไฮโดรเจน กำหนดปัจจัยคงที่ คือ ขนาดของแผ่นกระจกสไลด์ และความดันอากาศที่ 10^{-1} ทอร์ มีการตรวจสอบค่ามุมสัมผัสด้วยวิธี Sessile Drop ตรวจสอบความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) และตรวจสอบเอกลักษณ์ของกราฟีนด้วยวิธีรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกราฟีนด้วยเทคนิคพลาสมาสปัตเตอริง (Plasma Sputtering)

1.2.2 เพื่อยืนยันเอกลักษณ์ของกราฟีนบนผิวเคลือบด้วยวิธีรามานสเปกโตรสโคปี (Raman - Spectroscopy)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองโดย กำลังไฟฟ้า 60 – 100 วัตต์ อัตราส่วนระหว่าง $C_2H_2 : H_2$ คือ 30:70 40:60 50:50 และระยะเวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 – 30 นาที ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเต็มจำนวน

1.3.2 ตรวจสอบความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยค่าที่ได้ต้องมีความใกล้เคียง 0.34 นาโนเมตร (ค่าที่ยอมรับได้ 0.5 – 1.0 นาโนเมตร)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวกราฟีนด้วยเทคนิคการตกเคลือบด้วยไอทางเคมีโดยอาศัยพลาสมา

บทที่ 2

ทฤษฎีบท

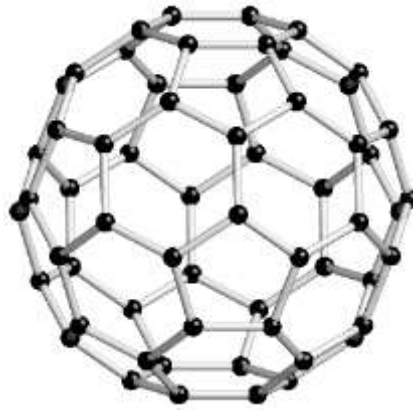
2.1 โครงสร้างคาร์บอน (Carbon Structure)

คาร์บอนเป็นธาตุอันดับที่ 6 ในตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 6 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12 และมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมแบบ $1s^2 2s^2 2p^2$ โดยอิเล็กตรอนจำนวน 2 ตัวจะถูกเติมในชั้นระดับพลังงาน $1s$ สำหรับโครงสร้างของคาร์บอนนั้นสามารถพบได้หลายแบบ โดยแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังนี้

2.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

มีโครงสร้างเป็นแบบก้อนเล็กอาจถือได้ว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติ หรือเป็นศูนย์มิติเรียกคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างแบบนี้ว่า ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) ตัวอย่างของฟูลเลอร์รีนที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ C_{60} แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอมมายึดจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าบั๊กกี้บอล (Buckyballs) นอกจากนี้ยังมีฟูลเลอร์รีนแบบอื่น ๆ ได้แก่ C_{70} และ C_{80} เป็นต้น

ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอน ตั้งชื่อตามสถาปนิกชาวอเมริกัน ชื่อว่า ริชาร์ด บัค มินสเตอร์ ฟูลเลอร์ (R. Buckminster Fuller) เป็นคนแรกที่สร้างโครงสร้างรูปครึ่งวงกลมขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยแผ่นวงแหวนหกเหลี่ยม (บางครั้งก็เป็นวงแหวนเจ็ดเหลี่ยม) กันไม่ให้แผ่นวงแหวนกลายเป็นแผ่นเรียบ มีลักษณะคล้ายลูกฟุตบอล ดังภาพ 2.1 เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ถ้ามีสารเจือปนปริมาณมากพอเหมาะจะสามารถเปลี่ยนสมบัติเป็นตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำ พบได้ตามธรรมชาติ เช่น ในเขม่าของเทียนไข และไส้ตะเกียงของน้ำมันก๊าด เป็นต้น

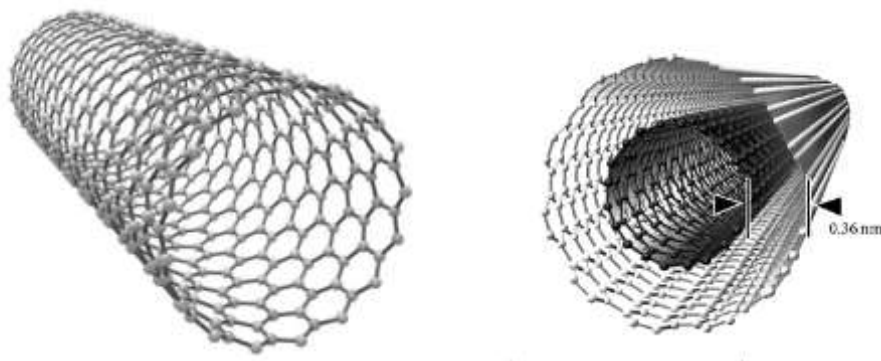


ภาพ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) หรือบั๊กกี้บอล (Buckyballs)

ที่มา : <https://steemit.com/information-fullerene-buckyballs>

2.1.2 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

มีลักษณะโครงสร้างเปรียบเสมือนแผ่นกราฟีนที่ม้วนตัวเข้าเป็นท่อ โดยท่อมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร และมีขนาดความยาวของท่อในระดับไมโครเมตร ดังภาพ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทำให้ดูเหมือนว่าเป็นเส้นยาว เมื่อเทียบกับความยาวของท่อในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube : CNTs) โครงสร้างประกอบด้วยแผ่นของแกรไฟต์ม้วนเป็นหลอด และปิดหัวท้ายด้วยครึ่งทรงกลมของฟูลเลอร์รีน ซึ่งสามารถนำมาเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงที่ดีในวัสดุผสม

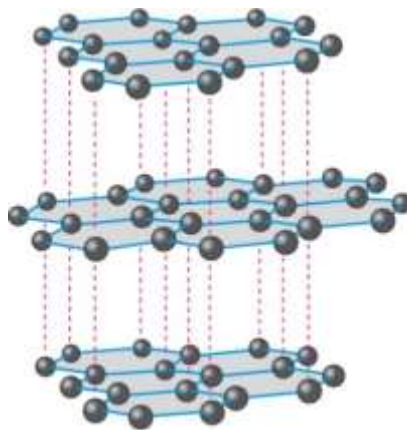


ภาพ 2.2 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

ที่มา : <https://www.researchgate.net>

2.1.3 โครงสร้างแบบสองมิติ

โครงสร้างแบบสองมิติมีลักษณะเป็นแผ่นของอะตอมคาร์บอนวางซ้อนทับกันในแนวระนาบ โดยในระนาบเดียวกันคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนอีกสามอะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ ส่วนพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) ดังนั้นระหว่างชั้นจะมีการยึดเกาะกันอย่างหลวม ๆ ดังภาพ 2.3 ส่งผลให้แต่ละชั้นสามารถเลื่อนไหลไปมาได้ ทำให้มีสมบัติในการหล่อลื่นได้ดี โครงสร้างนี้จะพบว่าเป็นโครงสร้างของแกรไฟต์ (Graphite) หรือที่เราที่รู้จักกันดีอีกชื่อหนึ่ง คือ ไส้ดินสอ



ภาพ 2.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์

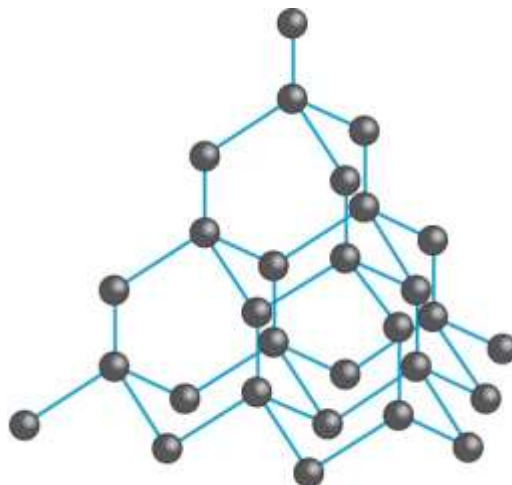
ที่มา : <https://chemju.wordpress.com>

แกรไฟต์มีโครงสร้างเป็นผลึกที่แตกต่างจากเพชรอย่างเด่นชัด อีกทั้งยังมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง และความดันที่หนึ่งบรรยากาศมากกว่าเพชร คุณสมบัติของแกรไฟต์มีหลายประการ เช่น ความแข็งแรง ความเสถียรทางเคมีที่สูง และบรรยากาศที่ไม่เกิดออกไซด์ มีการนำความร้อนที่ดี ดูดซับก๊าซได้ดี สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และทนต่อการแตกหักในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี เป็นต้น

2.1.4 โครงสร้างแบบสามมิติ

โครงสร้างรูปแบบนี้เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างรูปแบบนี้เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent - Bond) มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ sp^3 ทำให้โครงสร้างแบบสามมิตินี้มีความแข็งแรงเป็นอย่างมาก สามารถพบทั่วไปในรูปของเพชร ดังภาพ 2.4 จากโครงสร้างดังกล่าวจึงเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันว่าเพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมาก (เป็นวัสดุที่แข็งแรงที่สุด) และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ต่ำ

ลักษณะเหล่านี้มีผลจากลักษณะโครงสร้างผลึก และพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง นอกจากนี้เพชรยังมีความสามารถในการนำความร้อนได้สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุโลหะตัวอื่น ๆ มีความโปร่งใสต่อแสงขาวและอินฟราเรด มีดัชนีหักเหที่สูง ผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ของเพชรใช้ในงานอัญมณี ส่วนในทางอุตสาหกรรมใช้สำหรับงานขัด หรือใช้ตัดวัสดุอื่นที่มีความแข็งน้อยกว่า

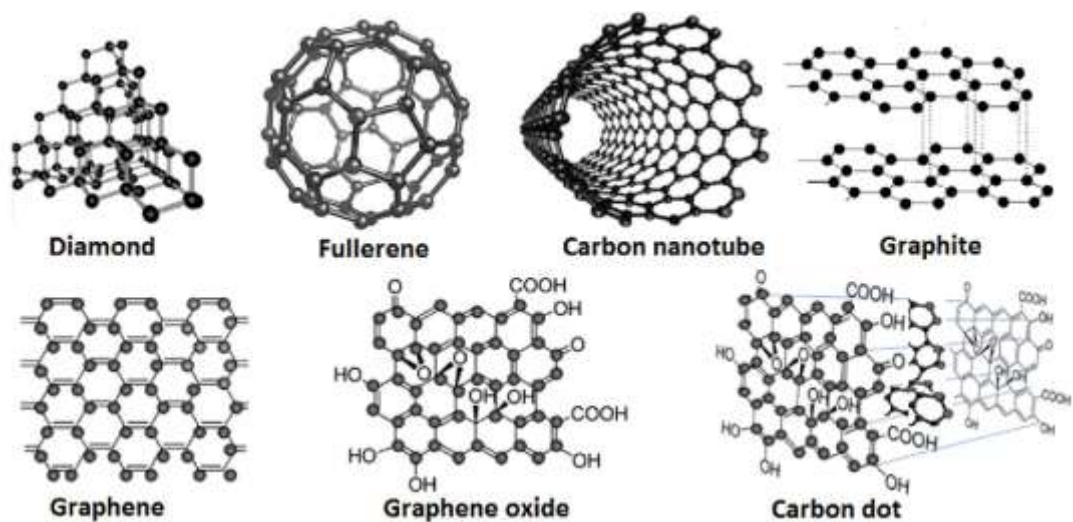


ภาพ 2.4 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเพชร

ที่มา : <https://www.minichemistry.com>

2.2 กราฟีน (Graphene)

กราฟีน โดยทั่วไปจะเรียกว่าเป็นวัสดุแผ่นเสมือนสองมิติ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเรียงตัวต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง และเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะเหมือนกับรังผึ้ง ดังภาพ 2.5 ทำให้มีความแข็งแรงกว่าเพชร และแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าถึง 200 เท่า กราฟีนนั้นโปร่งใส (Transparent) แสงสามารถส่องผ่านได้กว่า 97 เปอร์เซ็นต์ เป็นวัสดุที่บางที่สุดในโลก ซึ่งมีความบางกว่าเส้นผมของพวกเราเป็นล้านเท่า เพราะฉะนั้นเราจึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ขณะเดียวกันกราฟีนยังนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโลหะทองแดงถึง 4 เท่า เพราะการส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไปอย่างรวดเร็ว และในทางทฤษฎีกราฟีนที่มีน้ำหนักเพียงแค่ 1 กรัม จะมีพื้นที่ผิวมากถึง 2,360 ตารางเมตร จากสมบัติที่สำคัญ และโดดเด่นเหล่านี้ส่งผลให้นักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยสนใจนำกราฟีนมาพัฒนาเป็นวัสดุชนิดใหม่ และนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ เช่น จอภาพที่โค้งงอได้ ทรานซิสเตอร์เซ็นเซอร์ แบตเตอรี่ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ และวัสดุคอมโพสิต เป็นต้น



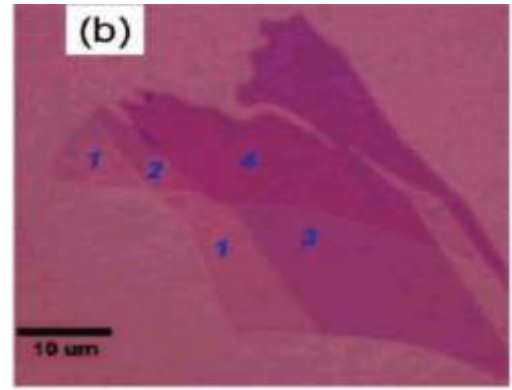
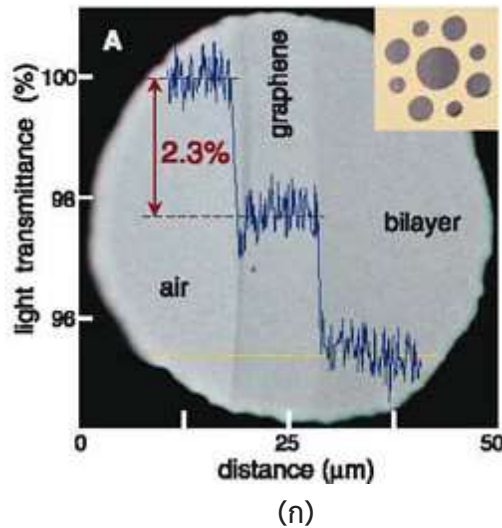
ภาพ 2.5 ความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของอัญรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้างกราฟีน
ที่มา : <https://www.nanorh.com>

2.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

แกรฟีนได้รับสมญานามว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุดในโลก แกรฟีนมีความแข็งแรงมาก โดยมีค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (Breaking Strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร ค่าความเครียดเชิงกลประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus) สูงถึง 1 เทระปาสกาล และค่าความแข็งแรงภายใน (Intrinsic Strength) สูงถึง 130 กิกะปาสกาล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

2.2.2 สมบัติทางแสง (Optical Properties)

การส่งผ่านแสง (Optical Transmittance) และการสะท้อนแสง (Reflectance) ของกราฟีน ในการวัดพบว่าความทึบแสงของกราฟีนแต่ละชั้นจะอยู่ที่ประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มแสงทั้งหมดที่เป็นอิสระของความยาวคลื่นแสงในโดเมน (Domain) โดยแทนค่าด้วย $\pi\alpha$ โดย α คือ การปรับโครงสร้างคงที่ (Fine Structure Constant) ดังนั้นทำให้กราฟีนไม่แสดงสีใด ๆ ดังภาพ 2.6



ภาพ 2.6 ความโปร่งแสงของกราฟีนและกราฟีน 2 ชั้น (ก) และภาพจากกล้องจุลทรรศน์ (ข)

ที่มา : Zhu et al., 2010

2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้า (Electronic Properties)

การนำไฟฟ้าส่วนใหญ่อาศัยโครงข่ายที่ต่อเนื่องกันตามแนวยาว และประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนอิสระในส่วนของออร์บิทัลไพ (π Orbital) โดยโฟนอนเสียง (Acoustic Phonon) มีความหนาแน่นของตัวนำไฟฟ้าอยู่ที่ $n = 1,012$ ต่อเซนติเมตร ความต้านทานของแผ่นสองมิติที่เรียกว่าความต้านทานต่อหน่วย (Resistance Per Square) จะมากกว่า 31 โอห์ม เมื่อใช้ชั้นของแผ่นกราฟีนแบบหนา การนำไฟฟ้าจะอยู่ที่ 0.96×10^6 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูงกว่าการนำไฟฟ้าของทองแดงซึ่งอยู่ที่ 0.60×10^6 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

2.2.4 การนำความร้อนของกราฟีน (Thermal Properties)

การนำความร้อนของกราฟีนถูกกำหนดโดยโฟนอน (Phonon) หรือความเร็วเสียงในกราฟีนมีค่าสูงมาก ความเร็วโฟนอนจะแปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อน ดังนั้นยิ่งความเร็วโฟนอนมีค่าสูงมากเท่าใดยิ่งส่งผลให้ค่าการนำความร้อนสูงมากไปด้วย สามารถวัดได้ประมาณ 5,000 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน โดยทองแดงสามารถนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 401 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ดังนั้นกราฟีนจึงสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดง 10 เท่า

2.2.5 การสังเคราะห์กราฟีน

การสังเคราะห์กราฟีนแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

1. กระบวนการจากเล็กไปใหญ่ คือ กระบวนการสร้างกราฟีนที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร การจัดเรียงของโมเลกุลอะตอมขนาดเล็กจนกลายเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ กระบวนการสร้างจากเล็กไปใหญ่ เช่น การสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนด้วยวิธีไอระเหยทางเคมีโดยใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน

(CH₄) คาร์บอนมอนอกไซด์(CO) อะเซทิลีน (C₂H₂) และเอทานอล (C₂H₅OH) เป็นต้น เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้โมเลกุลของก๊าซแตกตัวออกเป็นอะตอมของคาร์บอน และจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่เป็นร่างแหของแผ่นกราฟีนบนวัสดุฐาน ซึ่งสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนหนา 1-10 ชั้น ที่มีลักษณะเป็นแผ่นยาวต่อเนื่องก่อตัวบนวัสดุฐานไม่มีความผิดพลาดของผลึก และยังคงมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะฟิล์ม เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของก๊าซ สัดส่วนอะตอมของธาตุคาร์บอนต่อออกซิเจน และไฮโดรเจน (C:O:H) ในระบบวิธีอาร์คดิสชาร์จ วิธีใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมแท่งแกรไฟต์ 2 แท่งที่วางจ่อใกล้ ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม (He) หรือ อาร์กอน (Ar) เป็นต้น ทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหิดกลายเป็นไอ และควบแน่นกลายเป็นแผ่นกราฟีน มีลักษณะเป็นเกล็ดบริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ การควบคุมขนาด หรือจำนวนชั้นทำได้โดยควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการผสมผงโลหะสารตัวเร่งปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) หรือ โคบอลต์ (Co) อย่างใดอย่างหนึ่ง ข้อดีของกระบวนการสร้างจากเล็กไปใหญ่ คือ สามารถทำได้ง่ายกว่าการลดขนาดจากขนาดใหญ่จนเล็กในระดับนาโนเมตร ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง ผลึกของฟิล์มขนาดเล็ก สมบัติการนำไฟฟ้าสูง และพบความบกพร่องในโครงสร้างผลึกน้อยกว่า ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดการสลายตัวของก๊าซในปฏิกิริยา ต้นทุนสูง และใช้เวลานาน

2. กระบวนการจากใหญ่ไปเล็ก คือ กระบวนการสังเคราะห์กราฟีนที่มีขนาดนาโนเมตร โดยการบดย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดลดลงจนถึงในระดับนาโนเมตร กระบวนการจากใหญ่ไปเล็ก เช่น กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนจะเสร็จภายในขั้นตอนเดียว โดยใช้แท่งแกรไฟต์บริสุทธิ์เป็นขั้วอิเล็กโทรดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วแอโนดที่เป็นแท่งแกรไฟต์ และตกตะกอนสู่ฐานของหม้อปฏิกรณ์ ตะกอนจะถูกล้าง และทำให้แห้ง วิธีนี้เป็นการสังเคราะห์แผ่นกราฟีนที่มีความหนาเพียง 1 อะตอม ข้อดี คือ เป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์ไม่ใช้อุณหภูมิหรือก๊าซ แต่มีข้อเสีย คือ ใช้สารละลายไอออนิกสำหรับอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีราคาแพง นอกจากนี้ยังมีกระบวนการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวแตก และคลี่ออกเป็นแผ่น

2.3 ก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene : C₂ H₂)

2.3.1 สมบัติทางกายภาพของก๊าซอะเซทิลีน

อะเซทิลีนเป็นก๊าซที่มีความไวไฟมาก ไม่มีสี มีกลิ่น (ฉุนคล้ายกระเทียม) จากคุณสมบัติของอะเซทิลีนที่มีความสามารถละลายได้ดีในสารละลายอะซิโตน (300:1 โดยปริมาตรที่ 175 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ทำให้เราสามารถจัดจำหน่ายอะเซทิลีน โดยอาศัยสารละลายอะซิโตนได้ ดังนั้นในท่อก๊าซอะเซทิลีนจึงบรรจุวัสดุซึมซับที่สามารถจับสารละลายอะซิโตนไว้อยู่ภายใน ซึ่งทำให้ท่อก๊าซอะเซทิลีนแตกต่างไปจากท่อก๊าซทั่วไป

ก๊าซอะเซทิลีนใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงด้วยการผสมออกซิเจนกับอะเซทิลีน (Oxy-Acetylene Welding) ใช้ในงานตัด (Cutting) งานเจาะร่อง (Gouging) งานเชื่อม (Welding) การเผาให้ความร้อน งานทำความสะอาดด้วยเปลวไฟ เคลือบผิวแข็งที่ผิวหน้าโลหะ (Surface Hardening) ปิดเป่าผงฝุ่นจากโลหะ และอีกหลายกระบวนการ นอกจากนี้ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ (Atomic Absorption Spectrophotometer) ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรม และเป็นสารประกอบทางเคมีของสารเคมีต่าง ๆ เช่น ไวนิลคลอไรด์ (C₂H₃Cl)_n) ไวนิลอะซิเตด (C₄H₆O₂) เป็นต้น

2.3.2 ค่าคงที่ทางกายภาพ (Physical Constants)

1. มวลโมเลกุล 26.038
2. ความหนาแน่นที่ 0 องศาเซลเซียส 1.171 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
3. ปริมาตรจำเพาะที่ 15 องศาเซลเซียส 0.903 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม
4. ให้ความร้อนสูง 3,100 องศาเซลเซียส

2.3.3 ข้อควรระวังในการใช้อะเซทิลีน

อะเซทิลีนในสถานะก๊าซภายใต้ความดัน อาจเกิดการระเบิดขึ้นได้ ดังนั้น

1. อย่าใช้ก๊าซอะเซทิลีนอิสระที่ความดันในการใช้งานนอกท่อก๊าซเกิน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi.)
2. อย่าใช้ก๊าซอะเซทิลีนโดยตรงกับทองแดงที่ไม่มีโลหะเจือ (Alloy) ผสมอยู่
3. เมื่อปฏิบัติงานกับก๊าซอะเซทิลีนควรตั้งท่อก๊าซไว้ทุกครั้ง

2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen : H₂)

2.4.1 สมบัติทางกายภาพของก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่มีพิษ แต่ไวไฟ และเป็นอโลหะ เป็นก๊าซที่เบากว่าอากาศ ในบรรยากาศทั่วไปมีแก๊สไฮโดรเจนอยู่เพียงเล็กน้อยประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน (ppm.) ลูกติดไฟได้ง่ายในบรรยากาศ ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมักจะหายไปในเวลาอันรวดเร็ว เนื่องจากน้ำหนักที่เบาจึงทำให้ลอยขึ้นไปในอากาศ ดังนั้นเราจึงมักจะพบไฮโดรเจนอยู่ในน้ำ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยทั่วไปไฮโดรเจนในสภาวะปกติจะอยู่ในสถานะก๊าซ และจะกลายเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า -253 องศาเซลเซียส กลายเป็นของแข็งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า -259.15 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวของโมเลกุลเท่ากับ 436 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นเมื่อต้องการให้ไฮโดรเจนโมเลกุลทำปฏิกิริยาจึงต้องใช้พลังงานเพื่อทำลายความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวโมเลกุลดังกล่าว เพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

2.4.2 ค่าคงที่ทางกายภาพ (Physical Constants)

1. จุดหลอมเหลว 3.99 เคลวิน หรือ -259.16 องศาเซลเซียส
2. จุดเดือด 20.271 เคลวิน หรือ -252.879 องศาเซลเซียส
3. ความร้อนของการหลอมเหลว 0.117 กิโลจูลต่อโมล
4. ความร้อนของการกลายเป็นไอ 0.904 กิโลจูลต่อโมล
5. ความร้อนจำเพาะ 28.836 จูลต่อโมลต่อเคลวิน

2.4.3 การนำไปใช้ประโยชน์

1. การใช้กับรถยนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้
2. ใช้ในกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เพื่อสังเคราะห์น้ำมันจากพืชและน้ำมันจากสัตว์
3. ใช้ร่วมกับคลอรีน เพื่อผลิตไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl)
4. ใช้ร่วมกับออกซิเจน ในการตัดชิ้นงานใต้น้ำ
5. ไฮโดรเจนเหลวใช้เป็นเชื้อเพลิงของจรวด และเป็นส่วนผสมสำคัญในการสร้างปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น

2.5 อาร์กอน (Argon : Ar)

2.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซอาร์กอน

ก๊าซอาร์กอนประกอบเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ ของบรรยากาศของโลก ชื่ออาร์กอน มาจากภาษากรีกที่แปลว่า ไม่ว่องไว (Inactive) ในขณะที่มีการอ้างอิงถึงความจริงที่ว่า องค์ประกอบเกือบจะไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีออกเตตัสสมบูรณ์ (ครบ 8 อิเล็กตรอน) ในเปลือกนอกทำให้อะตอมอาร์กอนที่มีความเสถียรภาพ และความทนทานต่อพันธะกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อุณหภูมิสามจุดเท่ากับ 83.80 เคลวิน

2.5.2 ค่าคงที่ทางกายภาพ (Physical Constants)

1. จุดหลอมเหลว 83.80 เคลวิน หรือ -189.35 องศาเซลเซียส
2. จุดเดือด 87.30 เคลวิน หรือ -185.85 องศาเซลเซียส
3. ความร้อนของการหลอมเหลว 1.18 กิโลจูลต่อโมล
4. ความร้อนของการกลายเป็นไอ 6.43 กิโลจูลต่อโมล
5. ความร้อนจำเพาะ 20.786 จูลต่อโมลต่อเคลวิน

แม้ว่าอาร์กอนจะไม่ใช่พิษ แต่มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศถึง 38 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเป็นอันตรายเมื่ออยู่ในที่ปิด เพราะจะทำให้หายใจไม่ออกจนสลบ อาร์กอนนั้นยากที่จะตรวจจับได้ เพราะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส

2.5.3 การนำไปใช้ประโยชน์

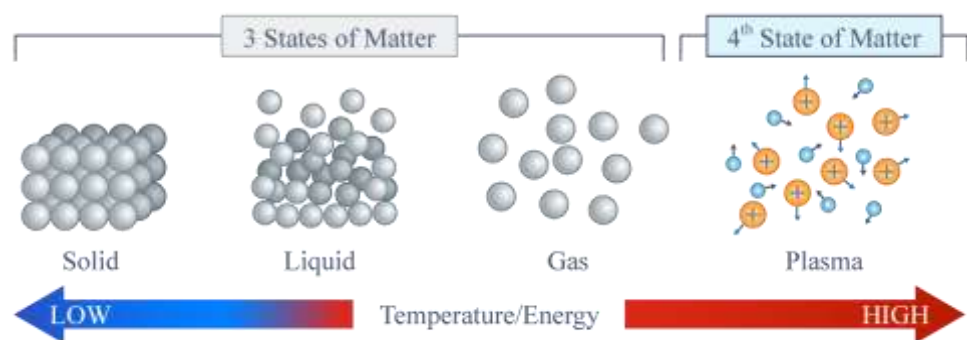
1. นำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมอุณหภูมิสูง
2. ใช้งานทางการแพทย์ในขั้นตอนการรักษาด้วยความเย็น เช่น การใช้อาร์กอนเหลวทำลายเนื้อเยื่อ เป็นต้น
3. เป็นแก๊สที่มีราคาถูกที่สุด ใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมถลุง และการเชื่อมโลหะ
4. ใช้ในหลอดไฟพิเศษ เช่น นีออน หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดไอ เป็นต้น

2.6 พลาสมา (Plasma)

พลาสมาจัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ ทั้งประจุบวก และลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasi-Neutral) ซึ่งหมายความว่า อิเล็กตรอน และไอออนในบริเวณนั้นโดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective Behavior) พฤติกรรมร่วมนี้ หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่

มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมรวมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน

พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัว และกลายเป็นพลาสมาในที่สุด ดังภาพ 2.7



ภาพ 2.7 แสดงความแตกต่างของสารในแต่ละสถานะ

ที่มา : <http://flatearthmatters.blogspot.com>

พลาสมามีสมบัติเฉพาะที่แตกต่างจากสถานะอื่น ๆ (ของแข็งของเหลว และก๊าซ) โดยมีคุณสมบัติ 3 ประการ ประการแรก ความยาวเดอบายต์ (Debye Length : A_D) ซึ่งเป็นระยะที่สนามจากประจุนั้นโดนกำบัง (Shielding) และโดยหลักพื้นฐานของพลาสมาระยะนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่าระยะระหว่างพลาสมามาก ๆ ($A_D \ll L$ คือ ระยะระหว่างพลาสมา) ประการที่สอง จำนวนอนุภาคภายในทรงกลมเดอบายต์ (Number of Particle) ซึ่งเป็นทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวเดอบายต์จะต้องมีอนุภาคอยู่จำนวนมาก และประการสุดท้าย ความถี่พลาสมา (Plasma Frequency : ω_p) คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เพื่อทำให้พลาสมากลับคืนสู่สภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าภายหลังจากที่พลาสมาถูกรบกวน กล่าวคือ เมื่อพลาสมาถูกรบกวนโดยศักย์ภายนอกมากจะทำให้ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีมวลน้อยกว่าไอออนมากเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งสมดุล พลาสมาจึงเสียความเป็นกลางทางไฟฟ้า ฉะนั้นเพื่อให้พลาสมากลับเข้าสู่สภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าตามเดิมจะเกิดแรงดึงดูดกระทำต่ออิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่กลับไปยังจุดสมดุล แต่เนื่องจากแรงเฉื่อยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เลยจุดสมดุล และเกิดการสั่นรอบจุดสมดุลนี้ด้วยความถี่เรียกว่า ความถี่ของ

พลาสมา และการสั่นนี้ก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนไอออนไม่มีเวลาที่จะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนี้จนสามารถพิจารณาได้ว่า ไอออนมีตำแหน่งคงที่

2.6.1 กระบวนการเกิดพลาสมา

1. การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

ในการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาในห้องสุญญากาศ ซึ่งมีก๊าซไหลผ่านในระดับคงที่ และความดันต่ำมาก โมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซในสุญญากาศอาศัยการชนกันของอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุล หรืออะตอม โดยคลื่นวิทยุ หรือคลื่นไมโครเวฟทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์ไปชนกับโมเลกุล หรืออะตอม ทำให้อะตอมกลายเป็นไอออน และเกิดการร่งแสง (Glow Discharge) เปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาจะได้ชนิดของก๊าซที่มีการเปล่งแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) ที่เกิดขึ้น ความถี่ในช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่น การร่งแสงของก๊าซอาร์กอนให้แสงสีชาวม่วงน้ำเงิน ดังแสดงในสมการ 2.1 – 2.3



2. การถูกกระตุ้น (Excitation)

พลังงานที่ส่งผ่านเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าทำให้อะตอมนั้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น กระบวนการนี้ คือ กระบวนการกระตุ้นสถานะของอะตอม ซึ่งแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าพลังงานในการแตกตัวเป็นไอออน ดังสมการ 2.4

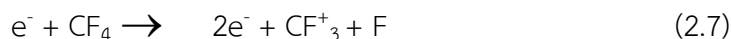


3. การแยกตัวออก (Dissociation)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่ก๊าซถูกกระทำโดยศักดิ์ของคลื่นความถี่วิทยุ เช่น กระบวนการแยกตัวออกของก๊าซออกซิเจน ซึ่งสามารถแยกตัวออกได้เป็นออกซิเจน 2 อะตอม ดังสมการ 2.5



ผลของการแยกตัวจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี คือ ผลผลิตที่ได้จะมีปฏิกิริยาความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าตอนที่อะตอมยังไม่แยกตัว การแยกตัว (Dissociation) อาจเกิดคู่กับการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) หรือไม่ก็ได้ ถ้าเกิดคู่กันจะเรียกว่า การแยกไอออน (Dissociative Ionization) ดังสมการ 2.6 -2.7



ผลของการรุกรังแสงของก๊าซที่ลดความดัน และศักย์ของคลื่นวิทยุที่ถูกกระตุ้นจะสังเกตเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงที่เรียกว่า เกิดการรุกรังแสง (Glow Discharge) ซึ่งหมายถึง แสงของพลาสมาที่เปล่งออกมาเนื่องจากพลังงานภายนอกที่ทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น โดยปกติอิเล็กตรอนสามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ ประมาณ 10^{-18} วินาที จากนั้นเวเลนซ์อิเล็กตรอนจะกลับสู่สภาวะพื้น และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความถี่ของแสงในช่วงที่มองเห็น (Visible Light)

2.6.2 การดัดแปรสมบัติเชิงผิววัสดุด้วยพลาสมา

การจุ่ม การอาบพลาสมา หรือประยุกต์พลาสมา คือ การที่นำก๊าซที่ต้องการทำให้กลายเป็นพลาสมา อยู่ในสถานะกระตุ้นอยู่ตลอดเวลาเกิดเป็นไอออนอิเล็กตรอน และอนุภาคลิอิสระต่าง ๆ ที่มีความเสถียรไม่สูง จากนั้นนำวัสดุต่าง ๆ ที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงผิว เช่น พอลิเมอร์ เข้าไปอยู่ในพลาสมา ซึ่งอนุภาคจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของผิววัสดุเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางระดับนาโนเมตร และเกิดการยึดติดระหว่างชั้นฟิล์มกับผิววัสดุด้วยกระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Plasma - Polymerization) โดยกระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นระหว่างผิววัสดุกับชั้นฟิล์มบางนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ เช่น การเชื่อมโยงข้าม (Cross-Linking) การแทนที่ (Deposition - Grafting) และแบบหมู่ฟังก์ชัน (Functionalization) การประยุกต์พลาสมาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงฟิสิกส์เคมีอย่างรวดเร็วกับผิว และโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ

การประยุกต์พลาสมาสามารถแบ่งตามความดันที่ใช้ออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

1. การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ (Vacuum Plasma Treatment)

การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศเป็นวิธีทั่วไปในการปรับสภาพผิววัสดุต่าง ๆ โดยพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นจากการผ่านก๊าซความดันต่ำเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ ก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของคลื่นเสียงรังสีไมโครเวฟ หรือพลังงานไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาอยู่ในรูปของไอออนอิเล็กตรอนอนุภาคลิอิสระต่าง ๆ โดยพื้นผิวที่สัมผัสพลาสมา

จะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเล็ก ๆ และมีการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคพลาสมาสู่ผิววัสดุก่อให้เกิดกระบวนการทางเคมี และฟิสิกส์ของพื้นผิวในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงในระดับนาโน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติ หรือไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุในส่วนอื่น ๆ การใช้ระบบความดันของก๊าซต่ำจะทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นคงที่ และสม่ำเสมอ

2. การประยุกต์พลาสมาในความดันปกติ (Atmospheric Plasma Treatment)

พลาสมาในภาวะความดันปกติ หรือสภาวะบรรยากาศ โดยทั่วไปการสร้างพลาสมาในความดันปกติจะมีการปล่อยประจุแบบอาร์คดิซาร์จ ซึ่งมีพลังงานความหนาแน่นอิเล็กตรอน และอุณหภูมิสูง จึงไม่เหมาะในการนำไปปรับผิววัสดุ เพราะพลาสมาจะไม่ปกคลุมทั่วพื้นผิว และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย ดังนั้นการประยุกต์พลาสมาในความดันปกติจึงต้องมีการปรับสภาวะ เพื่อช่วยให้สามารถนำพลาสมาไปปรับสภาพผิววัสดุได้

2.7 การตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD)

เป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางประเภทหนึ่ง มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Micro-Electronics) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และอุปกรณ์ระบบเครื่องกลและไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical System : MEMS) ในชิ้นส่วนขนาดจุลภาคเหล่านี้จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางของโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนไฟฟ้าซ้อนเรียงกันให้ได้สมบัติที่ต้องการ นอกจากจะมีการใช้เทคนิคการตกเคลือบด้วยไอเคมีในงานอิเล็กทรอนิกส์แล้วยังนำมาใช้สร้างผิวเคลือบแข็งบนชิ้นส่วนจักรกล และแม่พิมพ์ เพื่อลดการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนเหล่านั้น สาเหตุที่เทคนิคนี้มีชื่อว่า การตกเคลือบด้วยไอเคมี มาจากหลักการพื้นฐานของเทคนิคการเคลือบ ซึ่งต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สารเคลือบที่อยู่ในสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะไอ ทั้งนี้สารเคลือบที่ได้เป็นผลลัพธ์จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไอเคมีตั้งต้นกับพื้นผิวที่ต้องการเคลือบโดยตรง หรืออาจเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไอเคมีมากกว่าหนึ่งชนิดอยู่เหนือพื้นผิวแล้วเกิดเป็นสารเคลือบบนพื้นผิวที่ต้องการก็ได้ การได้สารเคลือบที่ต้องการต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในการออกแบบปฏิกิริยาเคมีเป็นอย่างดี โดยทั่วไปกระบวนการเคลือบด้วยไอเคมีเริ่มจากการนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบใส่เข้าไปในตู้เคลือบที่เป็นระบบปิดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของไอเคมี และลดการปนเปื้อนจากอากาศภายนอก จากนั้นจึงปั๊มอากาศภายในตู้ออกแล้วจ่ายไอเคมีเข้าสู่ตู้เคลือบจนถึงความดันที่ต้องการ ในขณะเดียวกันก็ให้ความร้อนภายในตู้เคลือบในระดับที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีการสังเคราะห์สารเคลือบไอเสียที่เกิดจากกระบวนการจะถูกดูดออก รวมถึงขอกหลีบต่าง ๆ บนผิวชิ้นงาน ส่งผลให้การเคลือบบนผิวเกิดได้อย่างทั่วถึง และมีความสม่ำเสมอสูง ถือว่าเป็น

จุดเด่นของการเคลือบด้วยไอเคมี และส่งผลให้เทคนิคนี้เป็นตัวเลือกหลักในการเคลือบฟิล์มบางบนชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยไอเคมีมีข้อด้อยที่ไอเคมี สารเคมีที่เข้มข้นมีความอันตราย และเป็นพิษ สารเคลือบที่ได้อาจมีสารตั้งต้นเจือปนอยู่ และปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อนค่อนข้างสูง (700 - 1,100 องศาเซลเซียส) ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคนิคการเคลือบด้วยไอเคมีให้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำลง เพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นงานจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ และมีการทดลองใช้สารเคมีตั้งต้นใหม่ ๆ เพื่อให้ได้สารเคลือบที่มีสมบัติตามต้องการมากขึ้น โดยทั่วไปเทคโนโลยีการเคลือบด้วยไอเคมีสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ ตามแหล่งพลังงานที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ การเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยความร้อน และการเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา

2.7.1 การตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition Processes) เป็นกระบวนการเคลือบด้วยไอเคมีที่อาศัยพลังงานความร้อนเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สารเคลือบ แบ่งเป็นสองประเภทหลักตามความดันไอที่ใช้ในตู้เคลือบ ได้แก่ การตกเคลือบด้วยไอเคมีที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric-Pressure Chemical Vapor Deposition : APCVD) และการตกเคลือบด้วยไอเคมีที่ความดันต่ำ (Low-Pressure Chemical Vapor Deposition : LPCVD)

2.7.2 การตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition Processes : PECVD) เนื่องจากการเคลือบด้วยกระบวนการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยความร้อน ต้องใช้อุณหภูมิสูงจึงไม่สามารถใช้กับงานบางประเภทได้ เช่น การผลิตชิปวงจรต้องมีการเคลือบห่อหุ้มตัววงจรด้วยสารเคลือบซิลิคอนไนไตรด์เพื่อป้องกันระบบวงจรที่อยู่ภายในจากความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งขั้นตอนนี้ไม่สามารถใช้อุณหภูมิเกิน 300 องศาเซลเซียสได้ เนื่องจากจะทำให้ชิปวงจรรวมเสียหาย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาขึ้นมา

ระบบของเทคนิคการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา มีการเพิ่มขั้วไฟฟ้าเข้าไปในตัวเคลือบซึ่งใช้ความดันไอต่ำ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายระหว่างขั้วไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของไอเคมีที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นแตกตัวเป็นพลาสมา เนื่องจากสารตั้งต้นที่แตกตัว และอยู่ในพลาสมามีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีการสร้างสารเคลือบเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติมาก ดังเช่นกรณีของสารเคลือบซิลิคอนไนไตรด์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิเพียง 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระบวนการเคลือบด้วยไอเคมีที่ความดันต่ำ และการตกเคลือบด้วยไอเคมีที่ความดันบรรยากาศ ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 750-900 องศาเซลเซียส นอกจากงานด้านอิเล็กทรอนิกส์แล้วยังมีการนำเทคนิคการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาไปใช้ผลิตสาร

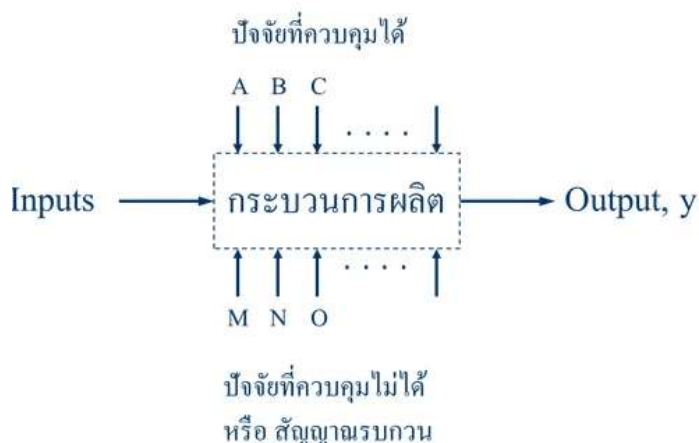
เคลือบแข็ง ได้แก่ พิล์มบางของเพชร โดยทั่วไปสังเคราะห์ขึ้นจากก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส) และความดันต่ำ โดยไฮโดรเจนอะตอมมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการเกิดพันธะแกรไฟต์ ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนที่เราไม่ต้องการส่งผลให้เกิดผลึกเพชร ปัจจุบันได้มีการนำพลาสมาไปใช้เพื่อกระตุ้นไอมีเทน และช่วยให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนอะตอมคู่ ส่งผลให้ได้อัตราการสร้างฟิล์มที่สูงขึ้น สารเคลือบเพชรนี้จะใช้เคลือบบนคมตัดในเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความแข็ง และลดการสึกหรอ สมบัติการนำความร้อนที่ดีของเพชรส่งผลให้สารเคลือบเพชรระบายความร้อนออกจากบริเวณสัมผัสได้ดี และมีการนำมาใช้เพื่อระบายความร้อนออกจากไมโครชิปในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย อีกรูปแบบหนึ่งของสารเคลือบคาร์บอนที่เป็นที่นิยม คือ สารเคลือบคาร์บอนคล้ายเพชร (Diamond-Like Carbon: DLC) ซึ่งเป็นสารเคลือบที่มีองค์ประกอบผสมระหว่างคาร์บอนที่อยู่ในรูปแบบของพันธะเพชร และพันธะแกรไฟต์ส่งผลให้มีสมบัติความแข็งของเพชร และความลื่นของแกรไฟต์ในการสังเคราะห์สารเคลือบ คาร์บอนคล้ายเพชรจะใช้ความพิเศษของระบบพลาสมาในการบังคับให้อิออนในพลาสมาพุ่งเข้าชนผิวเคลือบคาร์บอนที่กำลังสร้างขึ้นได้ ส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะเพชรขึ้นบางส่วน ในสารเคลือบปัจจุบันนี้มีการนำฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น เคลือบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ รวมถึงชิ้นส่วนทางกลที่ต้องรับภาระเสียดสี เป็นต้น

2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

ในการออกแบบการทดลองต้องทำการวางแผน และมีการควบคุมการดำเนินการอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสถิติ โดยมีจุดประสงค์ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระที่เรียกว่า ปัจจัย (Factors) ในกระบวนการ จากนั้นจะดูผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) ในกระบวนการนั้น ๆ โดยพิจารณาจากปัจจัยที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต (Input) หรือมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการ (Output) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือคุณภาพที่นิยมใช้กันในกรองปัจจัยที่มีอิทธิพล โดยการออกแบบจะต้องทำการทดลองตามรูปแบบที่ได้ถูกออกแบบไว้โดยใช้วิธีสุ่ม เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังภาพ 2.8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบประมาณการระหว่างค่าตัวแปรอิสระ แล้วจึงนำมาสร้างเป็นสมการทางสถิติ โดยทั่วไปจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพตัวแปรในกระบวนการ

และตัวแปรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประโยชน์ของการออกแบบการทดลองสามารถนำไปปรับใช้ในกระบวนการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่วางเป้าหมายไว้



ภาพ 2.8 กระบวนการการออกแบบการทดลอง

ที่มา : <https://piu.ftpi.or.th>

ในการออกแบบการทดลองต้องคำนึงถึงสิ่งที่ถูกจำกัด อย่างเช่น ในเรื่องของเวลา ต้นทุนในการทดลอง บุคลากร วัสดุที่ใช้ในการทดลอง และอื่น ๆ ดังนั้นในการทดลองจะต้องวางแผน และมีการควบคุมการดำเนินการอย่างเป็นระบบจะช่วยให้ได้ข้อมูลที่สำคัญสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ และการทดลองที่มีการออกแบบมาอย่างดีจะช่วยให้การสืบค้นมีประสิทธิภาพในการหาตัวแปรในกระบวนการ (Process Variable) ตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product Variable) องค์ประกอบของกระบวนการ และผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพ และประสิทธิภาพในการผลิตสำหรับการออกแบบการทดลองที่ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการนั้น ผู้ดำเนินการต้องทำความเข้าใจกับปัญหาที่ทำการศึกษารายละเอียด การกำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน การเลือกผลลัพธ์ (Y) ของกระบวนการ การกำหนดปัจจัย (X) ที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ (Y) จากนั้นวางแผน และควบคุมการดำเนินการตามขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะต้องทำการเก็บข้อมูลที่จำเป็น และมีความสำคัญเพื่อนำไปทำการทดลอง โดยมีรูปแบบของการออกแบบการทดลองที่จะนำไปใช้ ได้แก่ การทดลองแบบแฟคทอเรียล การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย และอื่น ๆ เมื่อผู้ดำเนินการได้ทำการออกแบบการทดลอง และนำข้อมูลที่ได้ไปทำการทดลองเรียบร้อยแล้วจะนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อทำการยืนยันผล จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ไปปรับใช้ในกระบวนการ

ในการวิเคราะห์จะต้องมีองค์ประกอบ 5M 1E คือ คน (Man) ทำงานร่วมกับเครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Methods) กระบวนการวัดค่า (Measurement - Method) และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (Environment) ผลิออกมาเป็นผลผลิต (Output) ยกตัวอย่างความสัมพันธ์ของปัจจัยกระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง ในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง

สำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ในการออกแบบการทดลองนั้นจะเรียกว่า ตัวแปรสัญญาณรบกวน (Noise) และตัวแปรบางตัวที่มีผลต่อกระบวนการมากกว่าตัวแปรสัญญาณรบกวน เรียกว่า ตัวแปรนำเข้ากระบวนการที่สำคัญ (Key Process Input Variable : KPIV) เป็นตัวแปรที่ต้องควบคุมและเปลี่ยนแปลงตัวแปรให้อยู่ในตำแหน่งที่ส่งผลเสียต่อกระบวนการให้น้อยที่สุด ตัวชี้วัดจะทำให้เรารู้ประสิทธิภาพ หรือความเป็นไปได้ของกระบวนการ ซึ่งการวัดตัวชี้วัดในกระบวนการอาจวัดด้วยตัวชี้วัดเพียงหนึ่งตัว หรือมากกว่า 1 ตัวก็ได้ โดยวิธีการวัดมีทั้งการวัดด้วยเครื่องมือ และการวัดด้วยการนับ สำหรับการวัดด้วยเครื่องมือค่าที่ได้จะเป็นค่าต่อเนื่อง (Continuous Data) ที่เรียกว่าตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) และสำหรับการวัดด้วยการนับจะเป็นการสังเกตซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่เรียกว่าตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) การวัดตัวชี้วัดไม่สามารถวัดผลลัพธ์ของกระบวนการได้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องวัดเฉพาะตัวแปรที่สื่อถึงประสิทธิภาพ หรือผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ดีที่สุด ตัวแปรที่มีการคัดเลือก เรียกว่า ตัวแปรผลลัพธ์ของกระบวนการที่สำคัญ (Key Process Output Variable : KPOV) ซึ่งการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยใด หรือตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมาโดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้

1. เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ข้อเท็จจริง การพิสูจน์จากความเชื่อของประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่มีการอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต
2. เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) เป็นการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขรูปแบบใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

2.8.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล สามารถกล่าวว่า ปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็ม

จำนวน (2^k) ที่มีรูปแบบการซ้ำ n จำนวน จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบแล้ววิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residue) เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอหรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง เพื่อจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟ และผลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ขึ้น โดยที่ผลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น และอิทธิพลร่วมหรือผลอันตรรกยะ (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่น

1. การทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1} Fractional Factorial Design)

การออกแบบเศษส่วนแฟกทอเรียล เป็นวิธีการทดลองที่ไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากจะมีจำนวนปัจจัยที่ใช้ดำเนินการ (Run) มากจนเกินไปจนไม่สามารถดำเนินการได้ และอาจมีข้อจำกัดบางประการ ซึ่งในเชิงทฤษฎีความแม่นยำของวิธีการออกแบบเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) จะไม่เท่ากับการใช้การทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial) แต่ในทางปฏิบัติการทดลองด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบอาจจะได้ผลที่ไม่ดีเท่าการทดลองแบบเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล เนื่องจากยังมีปัจจัยจำนวนมาก และยังมีจำนวนการทดลองมากจะทำให้ยากต่อการควบคุมการทดลองความผิดพลาดจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น

2. การทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน (2^k Full Factorial Design)

การทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน คือ วิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และเป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด และเพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง หรือเชิงเส้นโค้ง เนื่องจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน

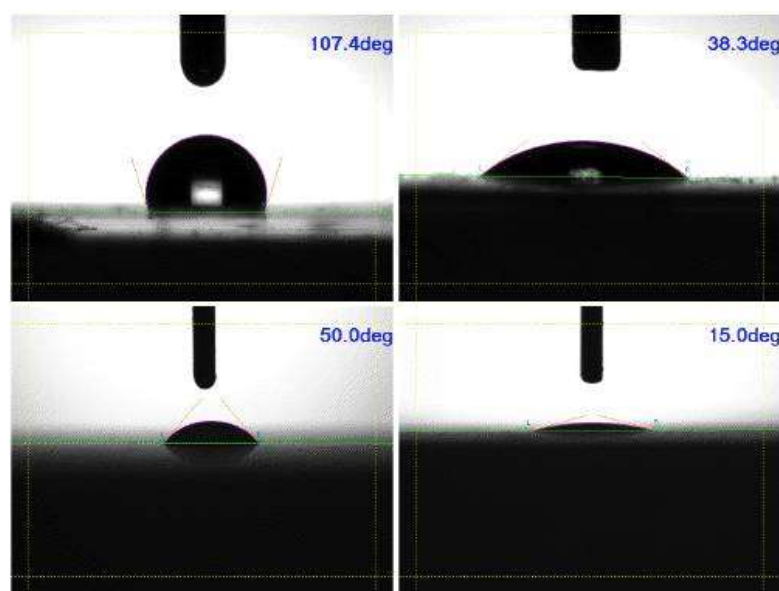
การกำหนดระดับของปัจจัยการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัยเริ่มต้น จะต้องกำหนดระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) ของแต่ละปัจจัย การกำหนดระดับของปัจจัยมีผลมากต่อผลการวิเคราะห์ และผลสรุปการกำหนดระดับของปัจจัย โดยพิจารณาระดับปกติ หรือค่ากลางของแต่ละปัจจัย ซึ่งระดับปกติหรือค่ากลางได้มาจากการสอบถามผู้รู้ และการวิจัยค้นคว้าหลังจากกำหนดค่ากลางแล้วเพิ่ม และลดระดับของปัจจัยจากค่ากลางเพื่อหาช่วงของปัจจัยที่เป็นไปได้ หรือสามารถทำ

การทดลองได้จากช่วงที่เป็นไปได้ของปัจจัย เลือกระดับสูงต่ำให้เหมาะสมกับข้อจำกัดในการทำการทดลอง เช่น ข้อจำกัดของวัสดุอุปกรณ์ และงบประมาณในการทดลอง เป็นต้น

2.9 การตรวจสอบลักษณะของวัสดุ

2.9.1 เครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Wetting Angle Measurement)

เป็นเทคนิคในการศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการหยดสารละลาย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ หรือสารเคมีอื่น ๆ ลงบนพื้นผิว และวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น การโค้งงอของผิวของเหลวจะเห็นว่าผิวของเหลวกับผิวของแข็งจะทำมุมกัน มุมระหว่างผิวของเหลวกับผิวของแข็ง ณ จุดสัมผัส เรียกว่า มุมสัมผัส (Contact Angle) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 – 180 องศา มุมสัมผัสจะบอกให้ทราบว่า เมื่อของเหลวอยู่บนพื้นผิวของเหลวนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยด (ไม่ทำให้พื้นผิวเปียก) หรือแผ่กระจาย (ทำให้พื้นผิวเปียก) โดยพิจารณาดังนี้ มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 0 – 90 องศา ของเหลวจะแผ่กระจาย และเปียกพื้น มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 90 – 180 องศา ของเหลวจะเป็นก้อน และไม่เปียกพื้น ดังภาพ 2.9



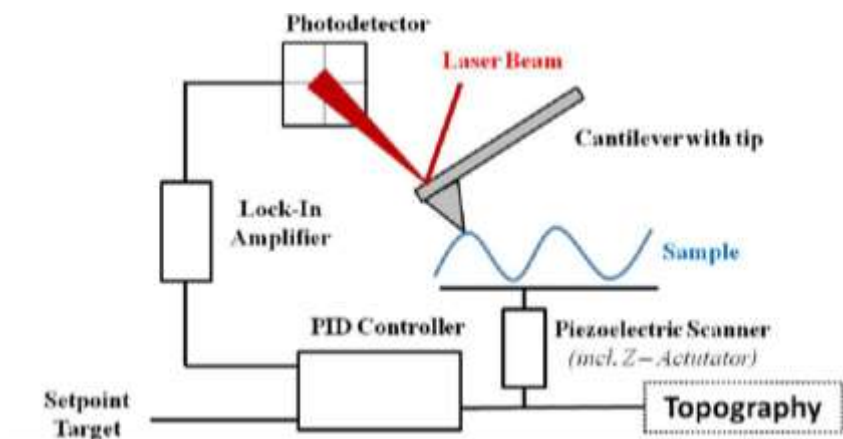
ภาพ 2.9 ลักษณะชิ้นงาน และการทดสอบในเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ

ที่มา : <http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail>

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะต้องมีลักษณะเป็นของเหลวที่หยดบนภาชนะที่มีพื้นผิวและระนาบที่เรียบ เช่น กระจกสไลด์ และภาชนะที่ถูกหยดสารตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบจะมีขนาดความยาวไม่เกิน 150 มิลลิเมตร และความกว้างไม่เกิน 100 มิลลิเมตร

2.9.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning Probe Microscopes : SPMs) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทำงานด้วยการใช้หัวอ่านที่เป็นเข็มขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร เป็นตัววัดแรงดึงดูด หรือแรงผลัก ที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นภาพ โดยเมื่อกดหัวอ่านลงบนพื้นผิวที่จะตรวจวัดจะเกิดแรงที่กระทำต่อก้าน (Cantilever) ของหัวอ่าน ทำให้หัวอ่านเอียงด้วยมุมต่างกันตามสภาพความสูงต่ำของพื้นผิว ซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปยังก้านของหัวอ่าน จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบได้ ดังภาพ 2.10 โดยมีความสามารถพิเศษ คือ สามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายทั้งที่เป็นฉนวน และพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้ และมีระดับความสูงต่ำ (Roughness) ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และขนาดภาพสแกนใหญ่ที่สุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร โดยสามารถศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติบนพื้นผิว สมบัติทางกล สมบัติทางไฟฟ้า และศึกษาสมบัติของตัวอย่างในสถานะสุญญากาศ เป็นต้น



ภาพ 2.10 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

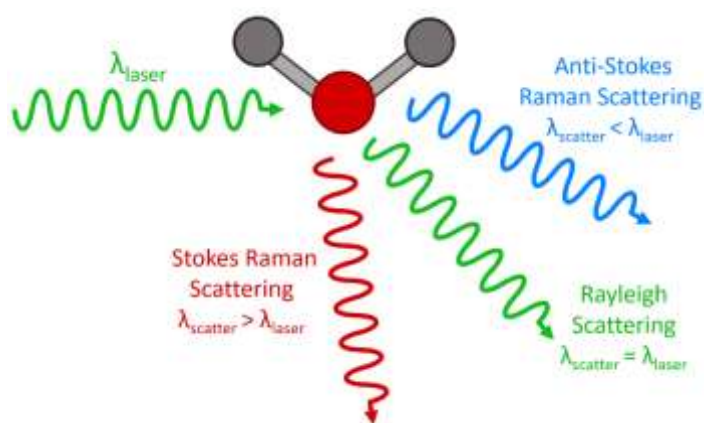
ที่มา : researchgate.net/figure/Atomic-Force-Microscopy-Setup

ตัวอย่างที่สามารถตรวจวัดได้ เช่น พิล์มบาง แผ่นเซรามิก แผ่นโลหะ พิล์มพอลิเมอร์ แผ่นพลาสติก ยางสังเคราะห์ รวมไปถึงวัสดุนาโน และตัวอย่างทางชีวภาพ เช่น เซลล์แบคทีเรีย เป็นต้น

2.9.3 รามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโมเลกุล สามารถหาอัตราส่วนระหว่างความเข้ม (Intensity) ของพีกที่เกิดจากการบอนด์ที่มีพันธะไม่สมมาตร และแสดงถึงพีกที่เกิดจากการบอนด์ที่มีพันธะสมมาตร เนื่องจากสเปกตรัมของรามานบอกข้อมูลในส่วนของการสั่นภายในโมเลกุล หรือการสั่นภายในผลึกตาข่าย ดังภาพ 2.11 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีจึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการศึกษา

วัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ ซึ่งการฉายแสงที่เป็นโฟตอน (Photon) ลงไปยังวัสดุจะไม่ทำลายวัสดุตัวอย่าง อีกทั้งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องเตรียมสารตัวอย่าง ไม่ต้องวัดค่าสเปกตรัมอ้างอิง และสามารถวัดสารตัวอย่างที่ไม่สามารถตรวจวัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ได้อีกด้วย เทคนิคนี้สามารถพัฒนาให้มีการประมวลผลที่สามารถกำจัดการกระเจิงแสงของหีบห่อโปร่งใส เช่น แก้ว หรือพลาสติกออกได้ และได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ หรือวิเคราะห์องค์ประกอบทางด้านเคมีของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์โครงสร้างผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Sheet) เพื่อหาร่องรอยความเสียหาย เป็นต้น



ภาพ 2.11 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี

ที่มา : <https://www.edinst.com/what-is-raman-spectroscopy>

2.10 สรุปงานวิจัยที่ศึกษา

จากงานวิจัยเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของกราฟีน เช่น โครงสร้าง สมบัติเชิงกล สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น กราฟีนมีลักษณะการเรียงตัวเป็นรูปร่างหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งของอะตอมคาร์บอน โดยมีความหนาเพียงแค่ชั้นเดียว และกราฟีนนั้นมีค่าโมดูลัสของยังประมาณ 1 เทระปาสคาล และความแข็งแรงของการแตกหักประมาณ 130 จิกะปาสคาล โดยส่วนสำคัญของกราฟีนนั้นมีความโปร่งแสงถึง 97.7 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารถยืดหยุ่นได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

การสังเคราะห์กราฟีนนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การตกเคลือบด้วยไอเคมี การขัดแกรไฟต์ในตัวทำละลาย และการตกเคลือบด้วยไอทางกายภาพ เป็นต้น โดยในแต่ละวิธีการสังเคราะห์มีทั้งข้อดี และข้อเสียที่ต่างกัน เช่น การตกเคลือบด้วยไอเคมี การเคลือบบนผิวเกิดได้อย่างทั่วถึง และ

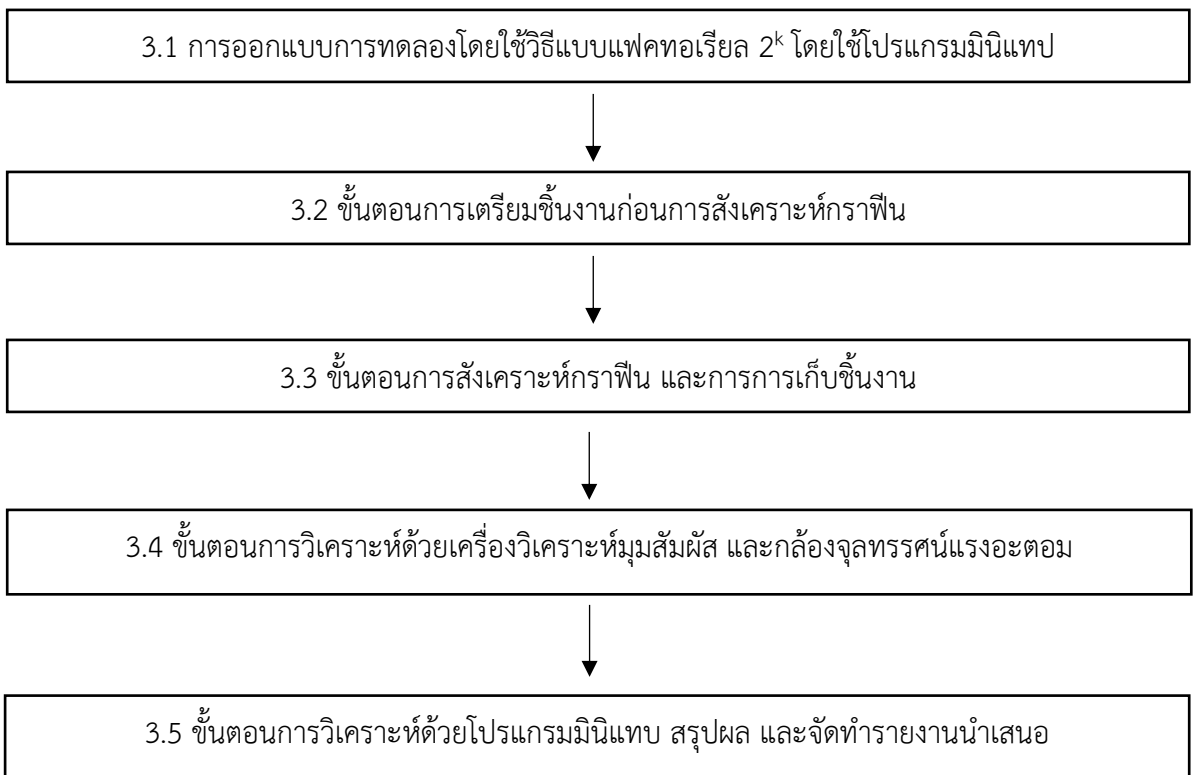
มีความสม่ำเสมอสูง แต่ไอเคมีที่ใช้นี้ก็มีความอันตราย และเป็นพิษ สารเคลือบที่ได้อาจมีสารตั้งต้นเจือปนอยู่ เป็นต้น หรือวิธีการขัดแกรไฟต์ในตัวทำลาย จะสังเคราะห์ได้ทีละน้อย ๆ เนื่องจากกราฟีนที่ทางผู้วิจัยต้องการมีค่าความต้านทานของแผ่นที่ต่ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำ และมีค่าความโปร่งแสงสูง ทำให้เลือกวิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาที่มีความดันต่ำ ซึ่งสามารถสังเคราะห์กราฟีนลงบนโลหะ เช่น นิกเกิล คอปเปอร์ หรือกระจก เพื่อความสะดวกต่อการเก็บรักษา และนำไปตรวจสอบค่าคุณสมบัติของกราฟีน

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นผิวของตัวอย่างชิ้นงาน วิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact Angle) โดยวิธีการหยดน้ำจากเข็มฉีดยาขนาดเล็ก (Sessile Drop) เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวว่ามีการเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ เนื่องจากกราฟีนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ตรวจวัดคุณสมบัติของพื้นผิวชิ้นงานได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) เพื่อหาความหนาของฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ และตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทำงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ ขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์กราฟีน ดังภาพ 3.1 โดยใช้เทคนิคพลาสมา สเปตเตอริง การออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) รวมทั้งกล่าวถึง การเตรียมผลการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์มุมสัมผัส (Contact Angle) และ วิเคราะห์ความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope)



ภาพ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวม

3.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล 2^k

3.1.1 กำหนดปัจจัยที่มีต่อผลการทดลอง

จากการศึกษาการทำงาน และข้อจำกัดของเครื่องดิสชาร์จพลาสมาความดันต่ำ สามารถกำหนดปัจจัยที่น่าสนใจในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ 3 ปัจจัย คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์) อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซไฮโดรเจน และระยะเวลาในการดิสชาร์จ (นาทีก) โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย และระดับขอบเขตของปัจจัย คือ ระดับสูง ระดับต่ำ และเพิ่มค่ากลางสำหรับทดสอบสมมติฐานความเป็นเส้นโค้ง ดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 รายละเอียดของปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัยและสัญลักษณ์

ปัจจัย	ระดับการตั้งค่า			สัญลักษณ์
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)	
1. กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	60	80	100	A
2. อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซไฮโดรเจน	30:70	40:60	50:50	B
3. ระยะเวลาในการดิสชาร์จพลาสมา (นาทีก)	10	20	30	C

3.1.2 เลือกรูปแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล (2^k)

การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล (2^k) เป็นการทดลองตามปัจจัยที่พิจารณาจำนวน k ปัจจัย แต่ละปัจจัยกำหนดให้ปรับเปลี่ยนได้ 2 ระดับ เรียกว่า ระดับสูง (High Level) แทนด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำ (Low Level) แทนด้วยเครื่องหมาย “-” ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก) เลือกตัวแปรผลตอบแทน ผลตอบของการทดลองในที่นี้ คือ ความหนาของกราฟีน (นาโนเมตร)

ข) กำหนดนิยามเกี่ยวกับตัวแปรในการทดลอง โดยกำหนดให้ตัวเลขแสดงคุณสมบัติของตารางการออกแบบการทดลอง (Resolution Numbers) มีตัวเลขสูงสุด ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการแปรผลการทดลอง สำหรับการทดลองนี้มีปัจจัย 3 ปัจจัย คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์) อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซไฮโดรเจน และระยะเวลาในการดิสชาร์จพลาสมา (นาทีก) ดังภาพ 3.2

3.1.2.1 เลือกรูปแบบการทดลอง งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัยศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ดังนั้นผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ จึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 16 ครั้ง เพื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง และทำการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลางเป็นจำนวน 5 ครั้ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการนำไปทดสอบสมมติฐานความเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจึงทำการทดลองทั้งสิ้น 21 การทดลอง แสดงดังตาราง 3.2 แต่อย่างไรก็ตามหากผลตอบที่ได้ยังไม่ใช้ค่าผลตอบที่ดีที่สุดของการทดลอง ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคการออกแบบการทดลองของพื้นผิวผลตอบมาใช้เพื่อหาช่วงที่ให้ค่าดีที่สุดของการทดลอง จากนั้นจึงนำไปทดสอบสมมติฐานความเป็นเส้นโค้งอีกครั้ง หากสมการผลตอบเป็นเส้นโค้งจะใช้เทคนิคการทดลองแบบส่วนผสมกลางเพื่อหาเทอมของควอดราติกของแบบจำลองอันดับ 2

3.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับจุดกึ่งกลาง โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้โปรแกรมมินิแทปในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

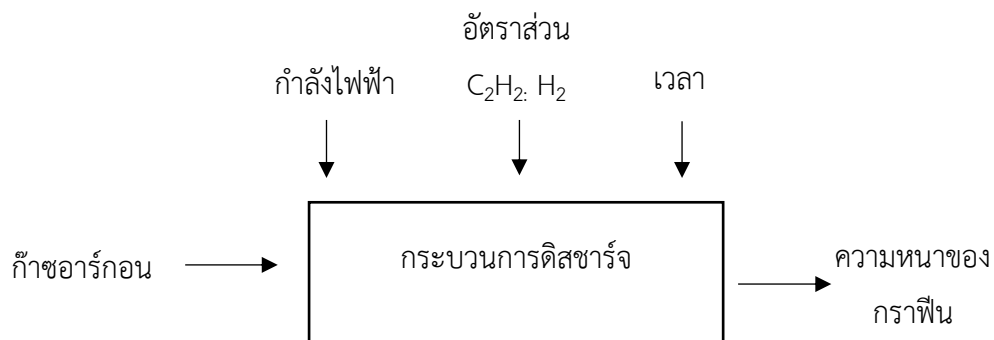
- การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อดูความเหมาะสมของข้อมูลตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยใช้แผนภูมิการกระจาย และดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลว่าเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ ตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลในแต่ละระดับปัจจัยว่าเป็นอิสระต่อกันหรือไม่

- การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบการทดลองที่ได้ทำการออกแบบมานั้นมีความเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งโดยปกติในการทดลองทุกครั้งจะมีความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การออกแบบการทดลองที่ดีควรจะทำให้ความผันแปรเหล่านี้เกิดน้อยที่สุด สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.1

$$R_2 = \frac{SS_{\text{model}}}{SS_{\text{total}}} \times 100 \quad (3.1)$$

- การวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นสามารถอ่านค่าของ P-Value ได้จากโปรแกรมมินิแทป (Minitab19.0) โดยเปรียบเทียบจากค่า α ที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดค่า $\alpha = 0.05$ ซึ่งหมายความว่า หากค่าของ P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าความแตกต่างของความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ หากมีค่าน้อยกว่า 0.05 จะสามารถสรุปได้ว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ

3.1.2.3 ทำการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบที่ได้จากการใช้เทคนิคการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) ด้วยวิธีการหาค่าผลตอบจากปัจจัย และเคลื่อนย้ายไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ชันที่สุดจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อหาเงื่อนไขปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญด้วยฟังก์ชันผลตอบที่ดีที่สุด (Response Optimizer) จากโปรแกรมมินิแทป (Minitab19.0) ดังภาพ



ภาพ 3.2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการดิสชาร์จ

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการสังเคราะห์กราฟีน

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene : C_2H_2)
2. ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen : H_2)
3. ก๊าซอาร์กอน (Argon : Ar)

3.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. กระจกสไลด์ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร
2. ไม้บรรทัด
3. กระดาษทิชชูไร้ขน
4. นาฬิกาจับเวลา
5. ถุงซิปล็อค
6. เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบพลาสมาที่รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้า

(Inductively Coupled Plasma Discharge : ICP) ของห้องวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

7. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) รุ่น Nano - Scope IIIa บริษัท Di Digital Instruments

8. เครื่องมือวัดมุมสัมผัส (Contact Angle) หลักการการหยดของเหลวจากหลอดฉีดยาขนาดเล็ก และนำเอาชิ้นงานขึ้นไปสัมผัสกับหยดน้ำบริเวณปลายเข็ม (Sessile Drop)

9. เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล (Raman Spectroscopy) รุ่น T64000 บริษัท Horiba Jobin Yvon ประเทศฝรั่งเศส

3.2.3 วิธีการเตรียมชิ้นงาน

1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 1×1 เซนติเมตร
2. ทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยสารละลายอะซิโตนจำนวน 2 รอบ รอบแรกประมาณ 3 นาที และรอบที่สองประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นแช่ชิ้นงานด้วยสารละลายแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจหาความหนาของฟิล์มบางด้วยเครื่องจุลทรรศน์แรงอะตอม ต้องทำสัญลักษณ์ด้วยการใช้ปากกาเคมีขีดบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน และหลังจากประยุกต์พลาสมาเสร็จ ให้ลบรอยปากกาด้วยสารละลายแอลกอฮอล์
4. เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงซิปล็อค โดยแยกตามเงื่อนไขทั้งหมด 21 เงื่อนไข

3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน

3.3.1 ทำความสะอาดวัสดุฐานรองรับอีกครั้งด้วยพลาสมาอาร์กอน โดยใส่ชิ้นงานลงในภาชนะสุญญากาศตามตำแหน่งที่กำหนดไว้แล้วเปิดวาล์วสุญญากาศ โดยจะลดความดันอากาศภายใน 챔เบอร์ให้ต่ำลงจนถึงความดันอากาศเท่ากับ 2×10^{-2} ทอร์ จากนั้นใส่ก๊าซอาร์กอนลงในภาชนะสุญญากาศให้ได้ความดันอากาศเท่ากับ 1×10^{-1} ทอร์ ใช้กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ เป็นระยะเวลาเวลา 5 นาที ดังภาพ 3.3

3.3.2 เมื่อทำความสะอาดพื้นผิววัสดุฐานรองรับเสร็จแล้ว ทำการเคลือบฟิล์มด้วยก๊าซอะเซทิลีน และก๊าซไฮโดรเจนตามเงื่อนไขการทดลอง โดยมีความดันพื้นฐาน (Base Pressure) เท่ากับ 2×10^{-2} ทอร์ และความดันก๊าซภายในแชมเบอร์สุญญากาศเท่ากับ 80 มิลลิทอร์



ภาพ 3.3 แสดงการประยุกต์พลาสมาอะเซทิลีน และไฮโดรเจน

3.3.3 ปรับค่าพารามิเตอร์ตามตารางการออกแบบการทดลอง

เมื่อความดันพื้นฐานมีค่าเท่ากับ 2×10^{-2} ทอร์ ทำการเพิ่มก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เพื่อให้ได้ความดันอากาศเท่ากับ 1×10^{-1} ทอร์ ตามเงื่อนไขการทดลอง ดังตาราง 3.2 ทำการคำนวณปริมาณก๊าซพลาสมาในแต่ละเงื่อนไข ดังนี้

1. เงื่อนไข 30 เปอร์เซ็นต์ ของ C_2H_2 ต่อ 70 เปอร์เซ็นต์ ของ H_2 คิดเป็นปริมาณก๊าซอะเซทิลีน เท่ากับ 2.4×10^{-2} ทอร์ และปริมาณก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 6.5×10^{-2} ทอร์
2. เงื่อนไข 40 เปอร์เซ็นต์ ของ C_2H_2 ต่อ 60 เปอร์เซ็นต์ ของ H_2 คิดเป็นปริมาณก๊าซอะเซทิลีน เท่ากับ 3.2×10^{-2} ทอร์ และปริมาณก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 4.8×10^{-2} ทอร์
3. เงื่อนไข 50 เปอร์เซ็นต์ ของ C_2H_2 ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ ของ H_2 คิดเป็นปริมาณก๊าซอะเซทิลีน เท่ากับ 4×10^{-2} ทอร์ และปริมาณก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 4×10^{-2} ทอร์

3.3.4 การจัดเก็บชิ้นงานหลังการประยุกต์พลาสมา โดยเก็บไว้ในตู้ความคุมความชื้น

ตาราง 3.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล (2^k)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	กำลังไฟฟ้า(วัตต์)	อัตราส่วน $C_2H_2 : H_2$	เวลา (นาที)
21	1	0	1	80	40:60	20
3	2	1	1	60	50:50	10
2	3	1	1	100	30:70	10
1	4	1	1	60	30:70	10
17	5	0	1	80	40:60	20
13	6	1	1	60	30:70	30

ตาราง 3.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล (2^k) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	กำลังไฟฟ้า(วัตต์)	อัตราส่วน $C_2H_2 : H_2$	เวลา (นาที)
10	7	1	1	100	30:70	10
14	8	1	1	100	30:70	30
5	9	1	1	60	30:70	30
15	10	1	1	60	50:50	30
11	11	1	1	60	50:50	10
12	12	1	1	100	50:50	10
18	13	0	1	80	40:60	20
7	14	1	1	60	50:50	30
8	15	1	1	100	50:50	30
19	16	0	1	80	40:60	20
6	17	1	1	100	30:70	30
16	18	1	1	100	50:50	30
20	19	0	1	80	40:60	20
4	20	1	1	100	50:50	10
9	21	1	1	60	30:70	10

3.4 การวิเคราะห์ชิ้นงาน

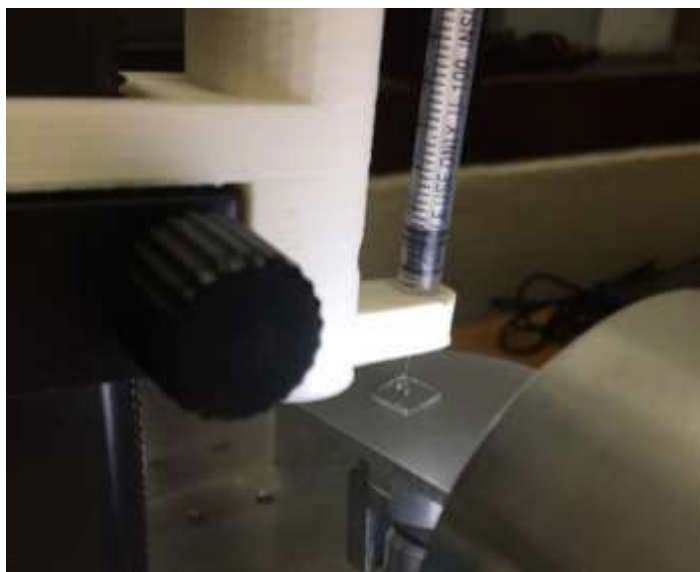
3.4.1. ทดสอบวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer)

การตรวจสอบค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส ใช้วิธีที่เรียกว่า Sessile Drop เป็นการหยดของเหลวออกจากหลอดฉีดยาขนาดเล็กลงบนพื้นผิวที่ต้องทำการทดสอบ โดยการนำพื้นผิวขึ้นไปสัมผัสกับหยดน้ำ เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวของชิ้นงาน เป็นการบ่งชี้ความสามารถในการเปียกของพื้นผิว

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ก่อนทำการประยุกต์พลาสมา และหลังทำการประยุกต์พลาสมาทำการวัดมุมสัมผัส โดยวางชิ้นงานบนฐานรองที่ละแผ่น
2. ขยับชิ้นงานให้วางขนานกับฐานรอง (Stage) แล้วปรับความคมชัดของภาพ (Focus) ให้ได้ภาพที่ชัดเจนที่สุด

3. หยดน้ำกลั่นลงบนชิ้นงานปริมาตร 40 ไมโครลิตร ในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน โดยเลื่อนฐานรอง (Stage) ขึ้นไปสัมผัสกับหยดน้ำ และหยดน้ำต้องไม่เป็นฟอง ดังภาพ 3.5



ภาพ 3.4 แสดงการหยดของเหลวบนชิ้นงาน

4. ปรับความคมชัดของภาพ โดยให้เห็นขอบของผิวหยดน้ำที่ชัดเจน

5. วัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับผิวของชิ้นงานแล้วทำการถ่ายภาพด้วยโปรแกรมการวัดมุมสำเร็จรูป ซึ่งแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope)

ก่อนจะนำชิ้นงานที่ทำการประยุกต์พลาสมาทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พื้นผิวของชิ้นงานต้องสะอาด ไม่มีรอยเปื้อน หรือรอยขีดข่วน เพราะอาจจะทำให้เข็มตรวจวัดหัก และไม่สามารถวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นงานได้ ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ควรมีขนาดไม่เกิน 1×1 เซนติเมตร และมีความหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพพื้นผิวของชิ้นงานจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ความหนา (Nanoscope SPM)

3.4.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน (Raman Spectroscopy)

การศึกษาโครงสร้างของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องรามาน ดังภาพ 3.5 จะสามารถหาอัตราส่วนระหว่างความเข้ม (Intensity) ของพีคที่เกิดจากการบอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ (Disorder Induced Vibration Mode : D-Band) และแสดงถึงพีคเกิดจากการบอนที่มีพันธะสมบูรณ์ (The In-Plane Stretching Mode : G-Band) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก และความบริสุทธิ์ของแผ่นฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์ด้วยการใช้อาร์กอนเลเซอร์โฟกัสลงบนพื้นผิวที่ต้องการ

ทำการวิเคราะห์ โดยใช้ไมโครสโคปเป็นตัวรับโฟกัส เครื่องจะทำงานโดยโปรแกรมแลปสเปค (Lab Spec) ผลที่ได้จะแสดงรามานพีค (Raman Peak) โดยเป็นกราฟระหว่างความเข้ม (Intensity) และความยาวช่วงที่ทำการวิเคราะห์ (Raman Shift)



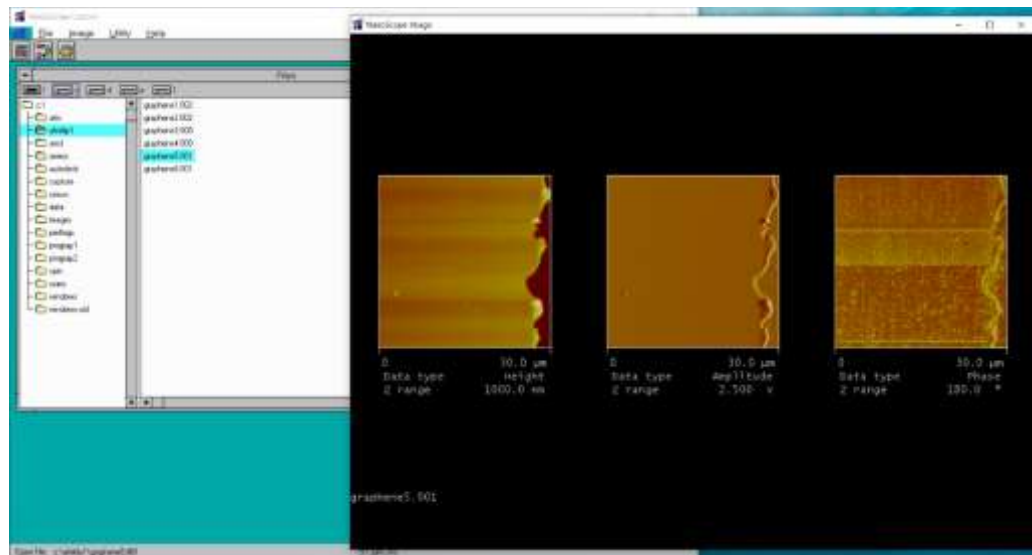
ภาพ 3.5 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล (Raman Spectroscopy)

3.5 การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความหนา (Nanoscope SPM)

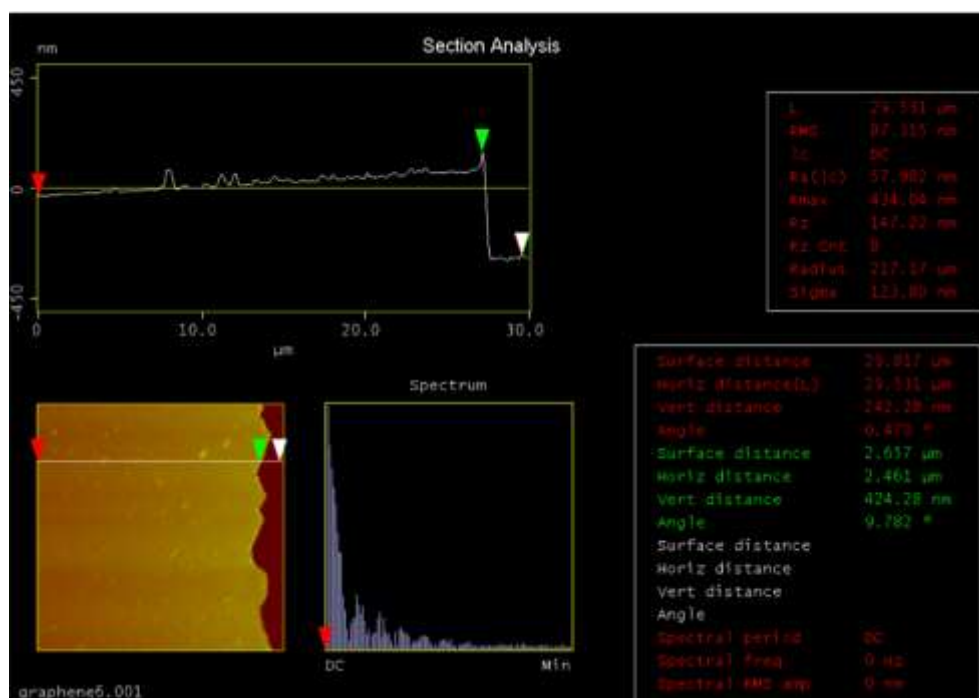
1. คลิกเข้าโปรแกรมการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความหนา (Nanoscope SPM) จะปรากฏหน้าต่างขึ้น 2 หน้า โดยด้านซ้ายแสดงตัวโปรแกรมเครื่องมือวิเคราะห์ ด้านขวาแสดงรูปภาพการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์
2. เลือกไฟล์ที่เราต้องการ แล้วเลือกเข้าไปดูไฟล์ในโฟลเดอร์ที่เราจัดเก็บ โดยจะเป็นไฟล์ผลการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
3. ดับเบิลคลิกที่ไฟล์ จะแสดงผลการวิเคราะห์พื้นผิว 3 แบบ ทางหน้าต่างด้านขวา กดเมนูภาพ (IMAGE) บริเวณแถบบนของหน้าต่างด้านซ้าย ดังภาพ 3.6
4. เลือกแถบภาพแรก (Select First Image) จะขยายภาพข้อมูลคุณภาพสูง (Data Type Height) หรือภาพแบบ 2 มิติ ขยายขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
5. เลือกเครื่องมือวิเคราะห์ชิ้นงานแบบขวาง (Cross Section) จากตัวโปรแกรมทางด้านซ้าย และด้านขวาจะแสดงบริเวณการวิเคราะห์ชิ้นงาน

6. เลือกบริเวณที่จะพิจารณา โดยการคลิกที่ผิวหน้า (Surface) การเลือกตำแหน่งแรกจะเป็นการเลือกจุดเริ่มต้น และครั้งที่สองจะเป็นจุดสุดท้าย โดยจะลากเป็นเส้นตรงตัดขวางพื้นผิวชิ้นงาน

7. ทำการการเลื่อนตำแหน่งการวัดตามแนวขวาง (Image Cross Section) เพื่อวัดความหนา โดยค่าระยะแนวระนาบ (Vert Distance) จะแสดงค่าความหนาของฟิล์ม ดังภาพ 3.7 จากนั้นบันทึกผลลงบนตารางบันทึกผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรมมินิแทป (Minitab 19.0) ต่อไป



ภาพ 3.6 หน้าจอแสดงการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ความหนา (Nanoscope SPM)



ภาพ 3.7 การประมวลผลการวิเคราะห์บนหน้าจอคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

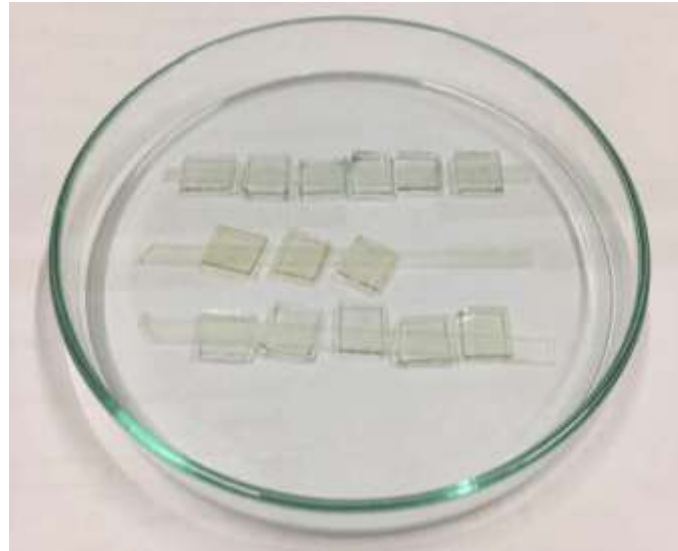
ผลการทดลองและอภิปรายผล

การสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนด้วยกระบวนการตกตะกอนไอเคมี โดยการประยุกต์พลาสมาบนแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยแก๊สอาร์กอนเป็นเวลานาน 5 นาที เพื่อใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นกระจกสไลด์ หลังจากนั้นประยุกต์พลาสมาด้วยแก๊สผสมระหว่าง $C_2H_2 : H_2$ ด้วยอัตราส่วน 30:70 40:60 และ 50:50 ในเวลา 10 นาที 20 นาที และ 30 นาที เพื่อให้พื้นผิวแผ่นกระจกสไลด์มีฟิล์มบางกราฟีนเคลือบอยู่

ในบทนี้จะเสนอผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการตรวจวัดชิ้นงานจากการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนด้วยกระบวนการตกตะกอนไอเคมี โดยการประยุกต์พลาสมาบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยจะแสดงผลการวัดมุมสัมผัสหลักการหยดน้ำจากหลอดฉีดยาขนาดเล็ก (Sessile Drop) เพื่อดูค่าของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวชิ้นงาน และตรวจสอบความหนาของแผ่นฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการดิสชาร์จพลาสมาเพื่อสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีน

4.1 ผลการตรวจสอบค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวของชิ้นงาน

จากการสังเกตพื้นผิวของกระจกสไลด์ด้วยตาเปล่า จะพบว่าพื้นผิวของกระจกสไลด์ที่ผ่านการประยุกต์พลาสมาจะมีสีเหลืองขุ่น ซึ่งเป็นผลมาจากก๊าซอะเซทิลีน ชิ้นงานจะมีสีที่เข้มขึ้นหากมีระยะเวลาในการดิสชาร์จที่มากขึ้น ดังภาพ 4.1 จากการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำกับพื้นผิวของชิ้นงานที่ทำการวัดด้วยวิธีการหยดน้ำจากเข็มฉีดยาขนาดเล็กลงบนชิ้นงานตัวอย่าง (Sessile Drop) ผลที่ได้ ดังตาราง 4.1 อาจไม่สามารถสรุปแนวโน้มของค่ามุมสัมผัสแต่ละเงื่อนไขได้ แต่สามารถบอกได้ว่าพื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเทียบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำก่อนการประยุกต์พลาสมา และหลังการประยุกต์พลาสมา



ภาพ 4.1 กระจกสไลด์ที่ผ่านการประกยุคพลาสมา

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา) ของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการประกยุคพลาสมา และทำการประกยุคพลาสมาตามเงื่อนไขต่าง ๆ

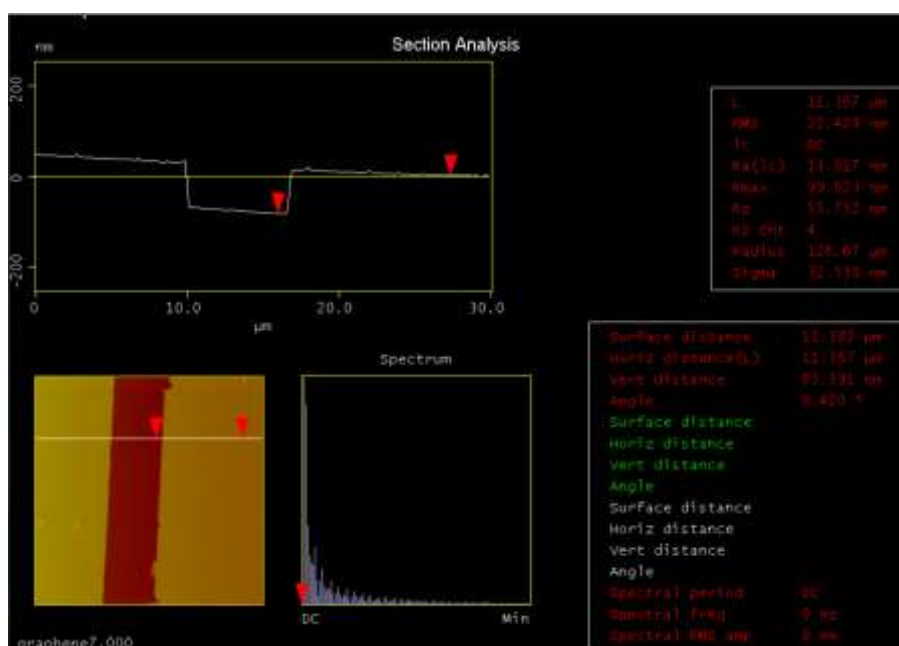
StdOrder	ค่ามุมสัมผัส (องศา)		
	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย
21	46.17	39.28	42.73
3	55.36	59.75	57.55
2	60.56	58.69	59.62
1	51.38	59.06	55.22
17	45.30	54.49	49.89
13	60.32	67.48	63.90
10	63.58	60.39	61.98
14	61.33	59.86	60.60
5	69.10	64.79	66.95
15	64.64	64.76	64.70
11	62.16	65.00	63.58
12	66.54	65.35	65.95
18	68.42	66.17	67.29
7	63.24	65.18	64.21
8	57.79	54.58	56.19
19	68.43	66.17	67.30

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบค่ามุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา) ของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการประยุกต์พลาสมา และทำการประยุกต์พลาสมาตามเงื่อนไขต่าง ๆ (ต่อ)

StdOrder	ค่ามุมสัมพัทธ์ (องศา)		
	ซ้าย	ขวา	เฉลี่ย
6	58.76	66.48	62.62
16	69.33	69.59	69.46
20	67.72	65.14	66.43
4	63.67	66.28	64.97
9	69.01	72.82	70.92

4.2 ผลการตรวจสอบลักษณะสัญญาณของชิ้นงาน

นำชิ้นงานขนาด 1 x 1 เซนติเมตร หลังจากทำการทำการประยุกต์พลาสมาตามเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ มาทำสัญลักษณ์ก่อนการนำไปทำการวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ดังภาพ 4.2 โดยค่าระยะแนวระนาบ (Vert Distance) ที่แสดงบนจอประมวลผล คือ ค่าความหนาของฟิล์ม จากการวัดค่าความหนาตามแนวระนาบ 5 ตำแหน่ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อพิจารณาความหนาเฉลี่ยของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ จะพบว่าความหนาของชิ้นงานจะมีค่าเฉลี่ยที่สูงเมื่อมีระยะเวลาในการดิสชาร์จที่มากขึ้น ดังตาราง 4.2



ภาพ 4.2 การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ตาราง 4.2 การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

StdOrder	ความหนาของฟิล์ม (นาโนเมตร)					
	ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	ตำแหน่ง 4	ตำแหน่ง 5	ค่าเฉลี่ย
21	232.97	231.01	220.22	227.83	228.75	182.41
3	190.32	187.51	188.64	193.71	181.80	152.04
2	111.11	107.59	106.49	109.60	111.97	86.96
1	147.61	142.74	140.77	144.65	140.00	115.15
17	295.88	280.84	288.18	262.09	279.62	225.39
13	288.65	290.28	288.60	295.57	296.34	232.62
10	85.93	83.39	84.24	84.52	82.48	67.62
14	167.13	161.85	164.11	164.74	169.12	131.57
5	121.74	128.65	137.10	125.33	128.22	102.56
15	193.43	194.06	197.31	187.09	167.42	154.38
11	120.83	110.32	104.12	118.43	114.49	90.74
12	45.89	56.25	58.93	46.45	47.44	41.51
18	174.12	173.69	192.30	189.14	194.35	145.85
7	347.67	337.72	334.77	338.97	336.16	271.83
8	329.05	310.38	313.33	316.24	313.91	253.80
19	153.46	151.84	149.37	144.72	146.98	119.88
6	131.61	129.07	129.64	128.08	125.19	103.68
16	259.20	258.92	278.50	279.51	284.01	215.23
20	125.75	122.02	130.84	105.31	101.51	96.78
4	153.95	152.48	149.52	147.82	146.49	120.75
9	53.15	49.63	53.51	53.85	43.14	42.03

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทป (Minitab 19.0)

จากการทดลองข้างต้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความหนาของฟิล์มกราฟีนมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการดิสซาร์จ โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์ผลแบบแฟคทอเรียล (Analyze Factorial Design) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบความหนาของฟิล์มกราฟีนที่ทำการสังเคราะห์ด้วยพลาสมาความดันต่ำ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) เพื่อวัดสมรรถนะโดยรวมของแบบจำลอง พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 61.30 เปอร์เซ็นต์ และภายหลังการปรับค่าได้ R^2 (adj) มีค่าเท่ากับ 35.50 เปอร์เซ็นต์ ของผลตอบความหนาของฟิล์มกราฟีนที่ทำการสังเคราะห์ด้วยเครื่องพลาสมาความดันต่ำ โดยปกติแบบจำลองควรมีค่าน้อย 80 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาของฟิล์มกราฟีน ดังนั้นเมื่อค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.086 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าแบบจำลองไม่เหมาะสม แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบความหนาของฟิล์มกราฟีนที่ทำการสังเคราะห์ด้วยเครื่องพลาสมาความดันต่ำ ดังตาราง 4.3 – 4.4

ตาราง 4.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
53.8329	61.30%	35.50%	0.00%

ตาราง 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบความหนาของฟิล์มบาง

Source	DF	Coef	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8		55090.9	6886.4	2.38	0.086
Linear	3		47204.1	15734.7	5.43	0.014
กำลังไฟฟ้า	1	-8.8	1229.2	1229.2	0.42	0.527
อัตราส่วน	1	26.1	10924.5	10924.5	3.77	0.076
เวลา	1	46.8	35050.4	35050.4	12.09	0.005
2-Way Interactions	3		3655.2	1218.4	0.42	0.742
กำลังไฟฟ้า*อัตราส่วน	1	4.1	262.8	262.8	0.09	0.768
กำลังไฟฟ้า*เวลา	1	1.6	42.3	42.3	0.01	0.906
อัตราส่วน*เวลา	1	14.6	3350.1	3350.1	1.16	0.303
3-Way Interactions	1		3043.5	3043.5	1.05	0.326
กำลังไฟฟ้า*อัตราส่วน*เวลา	1	13.8	3043.5	3043.5	1.05	0.326
Curvature	1	17.7	1188.1	1188.1	0	0.534
Error	12		34775.7	2898.0		
Total	20		89866.6			

4.3.2 การคัดกรองเฉพาะผลกระทบที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ

การพิจารณาผลกระทบใดที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ จะใช้วิธีการทดสอบทางสถิติด้วยค่า P- Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าน้อยกว่าค่าของ Alpha (α) ที่ 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ และจากการวิเคราะห์ผล ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความน่าจะเป็น (Normal Probability Plot) แสดงผลกระทบต่อผลตอบความหนาของฟิล์ม ซึ่งสามารถสรุปจากการทดลองได้ว่า ผลกระทบของปัจจัยที่ผลต่อความหนาของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามกฎของระบบการแบ่งลำดับ (Hierarchical Principle) (Montgomery, 2005) พบว่าผลกระทบหลัก ได้แก่ ปัจจัย C คือ เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญจะระบุเป็นสัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม ดังภาพ 4.3

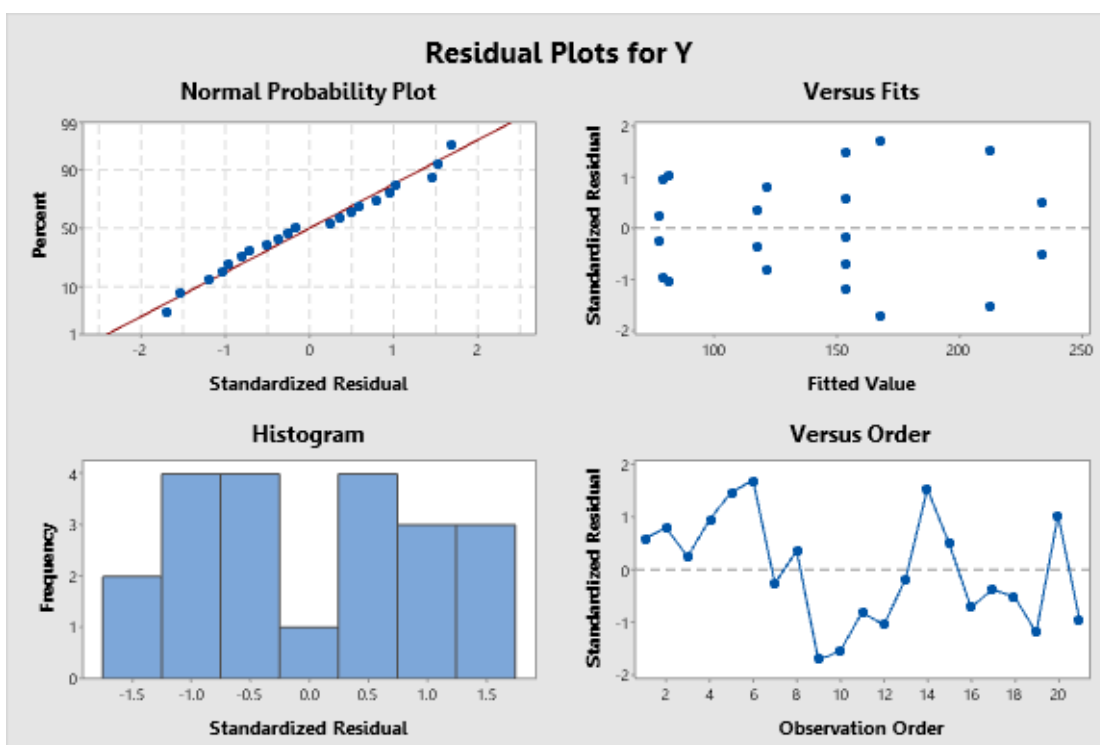


ภาพ 4.3 กราฟความน่าจะเป็นแสดงผลกระทบต่อความหนาของฟิล์มหลังการประยุกต์พลาสมา

ในงานวิจัยชิ้นนี้มีการทดลองที่จุดกึ่งกลางของปัจจัย (Curvature) จึงใช้สำหรับพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีความเป็นเส้นโค้ง มี P-Value เท่ากับ 0.534 ของผลตอบความหนาของฟิล์ม และมี F-value เท่ากับ 0.41 ดังนั้นเมื่อค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 และ F-value มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤตซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.75 จึงยอมรับสมมติฐานหลักที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ว่าผลรวมของควอดราติกมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าแบบเชิงเส้นรวมผลกระทบร่วมเหมาะสมแล้ว และไม่จำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติม

4.3.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลตอบความหนาของฟิล์ม

ในส่วนของการกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of Residuals) ดังภาพ 4.4 พบว่าผลที่ได้จากการกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และในส่วนของการกราฟฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง พบว่ามีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในทุกช่วงของการกราฟฮิสโตแกรม และลักษณะกราฟเป็นภาพพระขึงคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบมีแนวโน้มกระจายตัวแบบปกติ ในส่วนของการกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Residuals Versus the Fitted Values) พบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มซึ่งสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบไม่อิสระขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย ดังนั้นการทดลองในครั้งนี้จึงไม่ควรนำไปใช้



ภาพ 4.4 กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของผลตอบความหนาของฟิล์มกราฟีน

4.3.4 การสร้างแบบจำลอง

เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญกับผลตอบ ดังสมการ 4.1

$$Y = 136.4 - 8.8A + 26.1B + 46.8C + 4.1 A*B + 1.6A*C + 14.5 B*C + 13.8A*B*C \quad (4.1) \\ + 17.7 Ct Pt$$

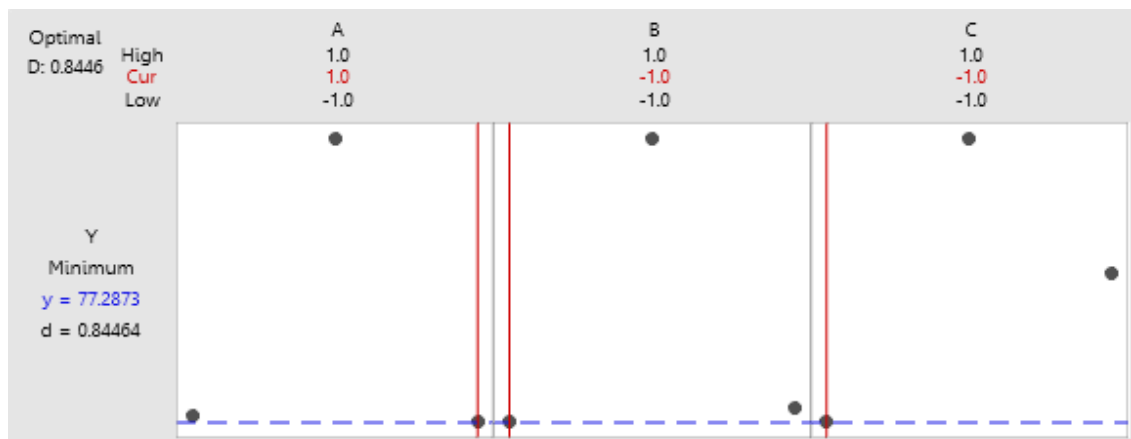
โดยแบบจำลองจะรวมเฉพาะปัจจัยที่จำเป็น ได้แก่ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ และตัดปัจจัยที่ไม่จำเป็นออก เพื่อให้แบบจำลองมีความกะทัดรัด และไม่ซับซ้อนเกินไป ดังสมการ 4.2 เพื่อใช้ทำนายผลการทดลอง โดยสัมประสิทธิ์ของผลกระทบคำนวณจากค่าผลกระทบของแต่ละปัจจัยหารด้วยสอง ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองต่อผลตอบแทนของฟิล์มโดย Y คือ ความหนาของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

$$Y = 136.4 - 8.8A \quad (4.2)$$

เมื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ดังสมการ 4.1 อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพควรประกอบด้วยปัจจัยที่จำเป็น และสามารถทำนายผลตอบที่เงื่อนไขต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง อย่างไรก็ตามผลการทดลองวัดความหนาของฟิล์มมีเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการออกแบบการทดลอง คือ กำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีน กับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 30 : 70 เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 นาที และเงื่อนไขที่ให้ความหนาของฟิล์มบางมากที่สุดที่เงื่อนไขของการออกแบบการทดลอง คือ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 50 : 50 เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 30 นาที

4.3.5 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับผลตอบ

นำผลตอบมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป (Minitab 19.0) ด้วยฟังก์ชันเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนอง (Response Optimizer) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการดิสชาร์จ โดยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบเป็นค่าที่ต่ำที่สุด (Minimum) หลังจากทำการหาค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาน้อยที่สุด คือ กำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 30 : 70 เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 นาที จะได้ค่าพยากรณ์ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 77.2873 นาโนเมตร โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยสำหรับผลตอบแทนของฟิล์มบาง ดังภาพ 4.5



ภาพ 4.5 กราฟแสดงค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยสำหรับผลตอบความหนาของฟิล์มบาง

4.3.6 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบาง โดยใช้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับผลตอบความหนาของฟิล์มบาง ได้แก่ กำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีน กับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 30 : 70 เวลาในการดิสชาร์จ 10 นาที ดังตาราง 4.5 เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ตาราง 4.5 ความหนาของฟิล์มบางในเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการทดลอง

ชิ้นงานที่	ความหนาของฟิล์ม (นาโนเมตร)					
	ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	ตำแหน่ง 4	ตำแหน่ง 5	ค่าเฉลี่ย
1	80.57	79.38	80.43	80.65	81.42	80.49
2	70.56	69.16	68.87	67.69	66.83	68.62
3	72.39	71.76	72.61	70.08	71.48	71.66

4.3.7 การทดสอบ T-test

การทดสอบ T-test แบบข้อมูลหนึ่งกลุ่มตัวอย่าง ใช้ทดสอบเพื่อยืนยันผลว่าแบบจำลองต่อผลตอบความหนาของฟิล์มบางสามารถใช้ได้จริง และมีค่าใกล้เคียงกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากแบบจำลองหรือไม่

โดยกำหนดให้

$$H_0: \mu = 77.2873$$

$$H_1: \mu \neq 77.2873$$

การทดสอบค่า T-test ของข้อมูลหนึ่งกลุ่มตัวอย่างว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ทำการทดสอบเทียบกับค่าพยากรณ์ความหนาของฟิล์มบาง ที่มีค่าเท่ากับ 77.2873 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลความหนาของฟิล์มบาง พบว่ามีค่า P-value

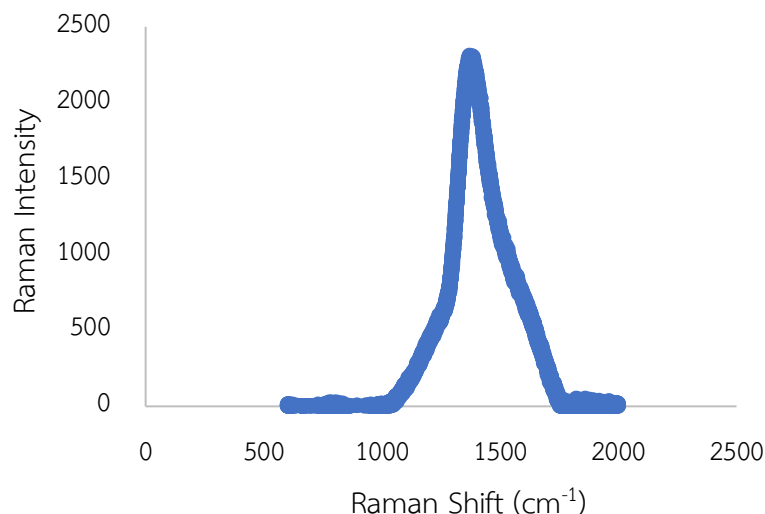
เท่ากับ 0.408 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานหลักที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าข้อมูลความหนาของฟิล์มบางมีค่าเท่ากับค่าพยากรณ์ที่ 77.2873 นาโนเมตร หรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงดังตาราง ดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 การทดสอบค่า t-test เทียบกับค่าพยากรณ์

N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI for μ	T-value	P-value
3	73.59	6.17	3.56	(58.28, 88.91)	-1.04	0.408

4.4 ผลการวิเคราะห์อัตลักษณ์ของชิ้นงานด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี

จากการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์ในเงื่อนไขที่มีกำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 30:70 และใช้เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 นาที จากการวิเคราะห์พบว่าเลขคลื่น (Wave Number) มีค่าประมาณ $1,382.10\text{ cm}^{-1}$ ดังภาพ 4.6 ซึ่งไม่ใช่ลักษณะโครงสร้างของกราฟีน (Graphene) แต่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) ซึ่งมีค่าเลขคลื่นอยู่ที่ $1,380\text{ cm}^{-1}$



ภาพ 4.6 กราฟการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยวิธีรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบพลาสมาบนแผ่นกระจกสไลด์ ระบบการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ (RF-PECVD System) 13.56 เมกะเฮิร์ต ภายใต้ความดัน 2×10^{-2} ทอร์ โดยมีจุดมุ่งเน้นในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีน ซึ่งมีใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลที่ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) วัดค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มบาง (Contact Angle) และหาเอกลักษณ์ของฟิล์มบางด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman - Spectroscopy) ซึ่งในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการดำเนินงาน ปัญหาที่พบจากการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะในการทำงาน

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคพลาสมาสปอตเตอริง โดยผู้วิจัยทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยมีทั้งหมด 3 ปัจจัย 2 ระดับ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า 60 80 และ 100 วัตต์ อัตราส่วนระหว่าง $C_2H_2 : H_2$ คือ 30:70 40:60 และ 50:50 ระยะเวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 20 และ 30 นาที โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ และทดสอบความเป็นเส้นโค้งจุดกึ่งกลาง 5 ซ้ำ รวมเป็นจำนวนการทดลอง $(2^3 \times 2) + 5$ คิดเป็น 21 การทดลอง โดยมีผลการทดลอง หรือผลตอบ คือ ความหนาของฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ คือ เวลาในการดิสชาร์จ ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.005 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดิสชาร์จพลาสมา คือ กำลังไฟฟ้า 60 วัตต์

อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีน กับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 30 : 70 เวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 นาที โดยความหนาฟิล์มบางน้อยที่สุดเท่ากับ 77.2873 นาโนเมตร

จากงานวิจัยของ Nan Jiang et al. ได้มีการเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มกราฟีนที่เคลือบลงบนพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane) และกระจก ทำให้ทราบค่ามุมสัมผัสน้ำของกราฟีนที่เคลือบบนกระจกมีค่าเท่ากับ 146 องศา แสดงให้เห็นว่าฟิล์มกราฟีนมีลักษณะไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) และจากการหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ในการทดลองนี้ โดยใช้วิธี Sessile Drop พบว่า ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่หยดบนฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นกระจกมีค่าน้อยกว่า 90 องศา แสดงว่าฟิล์มบางที่สังเคราะห์ขึ้นนี้มีลักษณะชอบน้ำ (Hydrophilic) ดังนั้นจากการวิเคราะห์หาค่ามุมสัมผัสน้ำแล้วฟิล์มบางที่ได้นี้อาจไม่ใช่ฟิล์มกราฟีน

ในการตรวจเอกลักษณ์ของฟิล์มบางโดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) พบว่าผลจากการกราฟที่ได้ไม่ใช่ลักษณะของฟิล์มกราฟีน (Graphene) แต่มีลักษณะโครงสร้างเป็นกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) ซึ่งเป็นโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่งของฟิล์มคาร์บอน โครงสร้างเป็นกราฟีนออกไซด์มีค่าเลขคลื่นอยู่ที่ $1,380\text{ cm}^{-1}$ ส่วนพีคของกราฟีนมีค่าเลขคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1600 cm^{-1}

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับวิจัยอ้างอิง เรื่อง ผลของกำลังที่มีผลต่อการสังเคราะห์กราฟีนบนพื้นผิวทองแดงโดยวิธีการตกสะสมไอเคมีเครื่องพลาสมาความดันต่ำ ของ ณัฐนิช สมแก้ว ที่มีการใช้ตัวแปรในการทดลองเดียวกันแต่มีการใช้เงื่อนไขในการทดลองที่ต่างกัน และมีการใช้เครื่องพลาสมาความดันต่ำเดียวกัน พบว่าค่าความหนาของฟิล์มที่น้อยที่สุดที่ได้จากการสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 119.79 นาโนเมตร และผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีรามานสเปกโทรสโคปีพบว่า เป็นแผ่นฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (Diamond-Like Carbon: DLC) ดังนั้นผลการทดลองของผู้วิจัยได้ผลการทดลองที่ดีกว่าเนื่องจากมีความหนาของฟิล์มที่น้อยกว่าที่ 41.51 นาโนเมตร และมีโครงสร้างของฟิล์มเป็นกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) ที่มีความใกล้เคียงกับฟิล์มกราฟีนมากกว่า เนื่องจากการออกแบบการทดลองจากปัจจัยที่มีความเหมาะสมจึงทำให้สามารถเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดีกว่า

5.2 สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการทดลองการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างฟิล์มกราฟีนด้วยเทคนิคพลาสมาสปัตเตอร์ริง ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยมีทั้งหมด 3 ปัจจัย 2 ระดับ ได้แก่ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า 60 80 และ 100 วัตต์ อัตราส่วนระหว่าง $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{H}_2$ คือ 30:70 40:60 และ 50:50 ระยะเวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 20 และ 30 นาที โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ และทดสอบความเป็นเส้นโค้งจุดกึ่งกลาง 5 ซ้ำ รวมเป็นจำนวนการทดลอง $(2^3 \times 2) + 5$ จำนวน 21 การทดลอง โดยมีผลตอบ คือ ความหนาของฟิล์มบาง ทำให้ได้ค่าพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาน้อยที่สุด คือ กำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีน กับก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 30 : 70 และเวลาในการดิสชาร์จพลาสมา 10 นาที ทำให้ได้ค่าพยากรณ์ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 77.2873 นาโนเมตร

เมื่อวิเคราะห์ทำการวิเคราะห์หาค่ามุมสัมผัสน้ำ และวิเคราะห์เอกลักษณ์ของฟิล์มบางแล้วทำให้ทราบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้นั้นไม่ใช่ฟิล์มกราฟีนโดยตรง แต่เป็นฟิล์มกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของฟิล์มคาร์บอน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การศึกษากระบวนการดิสซาร์จอากาศ ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนลงบนวัสดุฐานกระจก และอัตราส่วนของก๊าซอะเซทิลีนกับไฮโดรเจนด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมีเครื่องพลาสมาความดันต่ำ จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้อาจไม่ใช่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดกับการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวัสดุฐานทุกชนิด การทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อเป็นประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศไทย

5.3.2 การใช้เครื่องดิสซาร์จพลาสมาความดันต่ำ เครื่องปั๊มที่ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อให้อยู่ในสภาพสุญญากาศสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้ต่ำที่สุดเท่ากับ 2×10^{-2} ทอร์ ซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีน ดังนั้นจึงควรใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศที่มีกำลังมากขึ้นเพื่อให้มีความดันที่ต่ำมากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนลงบนวัสดุฐานกระจกสไลด์ให้มากขึ้น

5.3.2 การทำภาชนะสุญญากาศให้อยู่ภายใต้สภาพสุญญากาศนั้นความสามารถในการทำงานของเครื่องปั๊มขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการทำงาน เนื่องจากภายในห้องที่ทำการทดลองมีเครื่องมือทดลองหลายประเภท และมีการใช้งานอยู่ตลอดเวลาจึงอาจส่งผลกระทบต่อความชื้นภายในอากาศ ซึ่งอาจทำให้การปั๊มสุญญากาศนั้นใช้เวลานานในการทำงาน หากมีการใช้งานในอนาคตควรทำการทดลองในห้องปิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องปั๊มสุญญากาศ

5.3.3 ชั้นวางชิ้นงานทดสอบภายในภาชนะสุญญากาศมีพื้นที่เหมาะสมสำหรับวางชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดเล็ก และเหมาะสมสำหรับชิ้นงานจำนวนไม่มาก ดังนั้นหากต้องการใช้พื้นที่สำหรับวางชิ้นงานทดสอบหลายตัวอย่างควรเปลี่ยนไปใช้เครื่องพลาสมาความดันต่ำมีขนาดใหญ่กว่าเพื่อความเหมาะสมในการทดลอง

5.4 ปัญหา และแนวทางการแก้ไข

ปัญหาที่พบและวิธีการดำเนินการแก้ไขสามารถสรุปได้ดังตาราง 5.1

ตาราง 5.1 ปัญหา และแนวทางการแก้ไข

ปัญหา อุปสรรค	แนวทางการแก้ไข
1. การปั๊มสุญญากาศค่อนข้างใช้เวลานาน เนื่องจากความสามารถของเครื่องปั๊ม และอากาศบริเวณรอบข้างทำให้การทดลองในแต่ละเงื่อนไขใช้เวลานาน	ทำการดำเนินเครื่องดีสชาร์จพลาสมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ความดันในภาชนะสุญญากาศต่ำเสมอ และทำการวางแผนการทดลองให้มีความเหมาะสมกับเวลาในการปั๊มของเครื่องปั๊มสุญญากาศ
2. มีอากาศตกค้างในท่อนำก๊าซที่ต่อมายังภาชนะสุญญากาศ ทำให้ในการทดลองครั้งแรกในแต่ละวัน พลาสมาที่ได้มีอากาศผสมอยู่ด้วย ซึ่งสังเกตได้จากสีของก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศจะมีสีแดง	ทำการดีสชาร์จพลาสมาที่มีส่วนผสมของก๊าซอะเซทิลีน และไฮโดรเจนก่อนนำชิ้นงานใส่เข้าไปยังภาชนะสุญญากาศ แล้วจึงเริ่มการทดลอง
3. การดำเนินเครื่องดีสชาร์จพลาสมาต่อเนื่องในกระบวนการตกเคลือบไอสะสมของก๊าซอะเซทิลีน จะเกิดการสะสมของไอที่บริเวณผนังของภาชนะสุญญากาศ ทำให้ภาชนะสุญญากาศไม่สะอาด สังเกตได้จากที่ผนังของภาชนะมีสีเหลืองขุ่น	ทำความสะอาดผนังของภาชนะสุญญากาศโดยนำกระดาษทิชชูชุบแอลกอฮอล์เช็ดออก หากภาชนะมีความสกปรกมากให้ทำการถอดภาชนะสุญญากาศออกมาแช่ด้วยน้ำสะอาดเป็นเวลา 2 วัน
4. หากเก็บชิ้นงานเป็นเวลานานเกิน 1 สัปดาห์ จะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกเป็นสีรุ้ง และทำให้ฟิล์มลอกออกได้	หลังจากทำการประยุกต์พลาสมาแล้วควรนำไปตรวจวัดมุมสัมผัสทันทีเพื่อป้องกันการหลุดลอกของฟิล์มเมื่อโดนหยดน้ำ และจัดเก็บชิ้นงานในตู้ควบคุมความชื้นไม่เกิน 3 วัน ก่อนที่จะนำไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

บรรณารุกรม

- ขวัญใจ เนียมทอง.(2554) นาโนนำรู้ Atomic Force Microscope (AFM), ศูนย์เทคโนโลยีแห่งชาติ, [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.nanotec.or.th> . [23 สิงหาคม 2562]
- จิราพร พรหมปัญญา.(2559), ผลของอัตราส่วนแก๊สพลาสมาต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยเทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมี. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล. (2548). แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยและการตรวจวิเคราะห์ : เทคนิคโฟโตมิชชัน (ตอนที่ 2). ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 48, หน้า 47-50.
- วิหเวช หิรัญยะวาสิต. (2557), การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีและการถ่ายโอนกราฟีนลงบนวัสดุฐานรองรับ. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์. (2559). การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment). QM Magazine, ฉบับที่ 271, หน้า 15-17.
- วิลาสินี วุฒิธิรสกล. (2541). การเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง (Sputtering Deposition) . [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://www2.mtec.or.th.pdf>. [23 สิงหาคม 2562]
- สฐนิช สมแก้ว. (2555), ผลของกำลังที่มีต่อการสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนบนพื้นผิวทองแดงโดยวิธีการตกสะสมไอเคมีเครื่องพลาสมาความดันต่ำ. เชียงใหม่:มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ. (2560). กราฟีนวัสดุ 2 มิติเพื่ออนาคต. ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์โพลิเมอร์ : ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 84, หน้า 66-69
- อรุณี หลักคำ, วิทวัช วงศ์พิศาล และ ดร.สินธุ์ จันทพันธ์. (2557). กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอเคมีและไอทางกายภาพภายใต้สภาวะสุญญากาศ. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 74, หน้า 37-40.
- J. Azpeitia, G. Otero-Irurueta, I. Palacio, J.I. Martinez, N. Ruiz del Árbol, G. Santoro, et al. (2017). High-Quality PVD Grapheme Growth by Fullerene Decomposition on Cu Foils. Spain: Materials Science Factory
- Shih-Hao Chan, Sheng-Hui Chen, Wei-Ting Lin, Meng-Chi Li, Yung-Chang Lin and Chien-Cheng Kuo. (2013). Low-Temperature Synthesis of Graphene on Cu using Plasma-Assisted Thermal Chemical Vapor Deposition. Taiwan: The National Science Council of the Republic of China

ภาคผนวก ก

ตารางอัตราส่วนผสมของก๊าซอะเซทิลีน และก๊าซไฮโดรเจนในการทำการทดลอง

ตาราง ก-1 ตารางอัตราส่วนผสมของก๊าซอะเซทิลีน และก๊าซไฮโดรเจนในการทำการทดลอง

StdOrder	RunOrder	ปริมาณก๊าซ อะเซทิลีน (ทอร์)	ปริมาณก๊าซ ไฮโดรเจน (ทอร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)
21	1	3.2×10^{-2}	4.8×1.0^{-2}	60	20
3	2	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	50	10
2	3	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	100	10
1	4	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	50	10
17	5	3.2×10^{-2}	4.8×1.0^{-2}	60	20
13	6	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	50	30
10	7	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	100	10
14	8	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	100	30
5	9	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	50	30
15	10	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	50	30
11	11	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	50	10
12	12	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	100	10
18	13	3.2×10^{-2}	4.8×1.0^{-2}	60	20
7	14	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	50	30
8	15	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	100	30
19	16	3.2×10^{-2}	4.8×1.0^{-2}	60	20
6	17	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	100	30
16	18	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	100	30
20	19	3.2×10^{-2}	4.8×1.0^{-2}	60	20
4	20	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	100	10
9	21	2.1×10^{-2}	5.6×1.0^{-2}	50	10

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

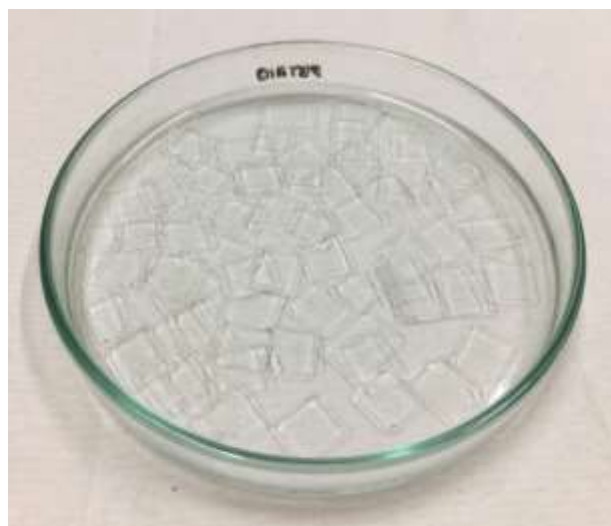
1. การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง ดังภาพ ข-1 - ข-3



ภาพ ข-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

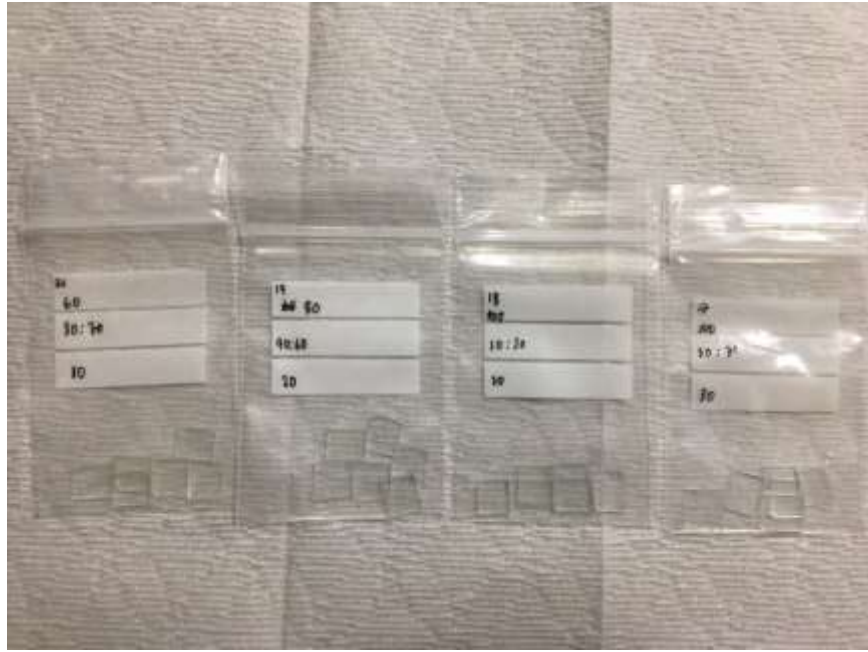


ก



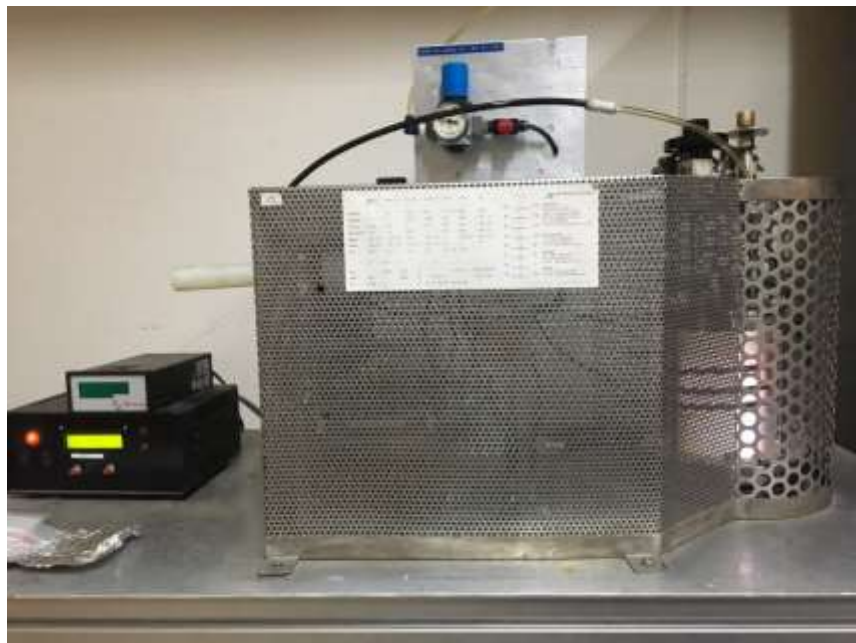
ข

ภาพ ข-2 สารละลายอะซิโตน (ก) และการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยสารละลายอะซิโตน (ข)



ภาพ ข-3 การเก็บชิ้นงานในถุงซิปล็อคโดยแยกตามเงื่อนไขการทดลอง

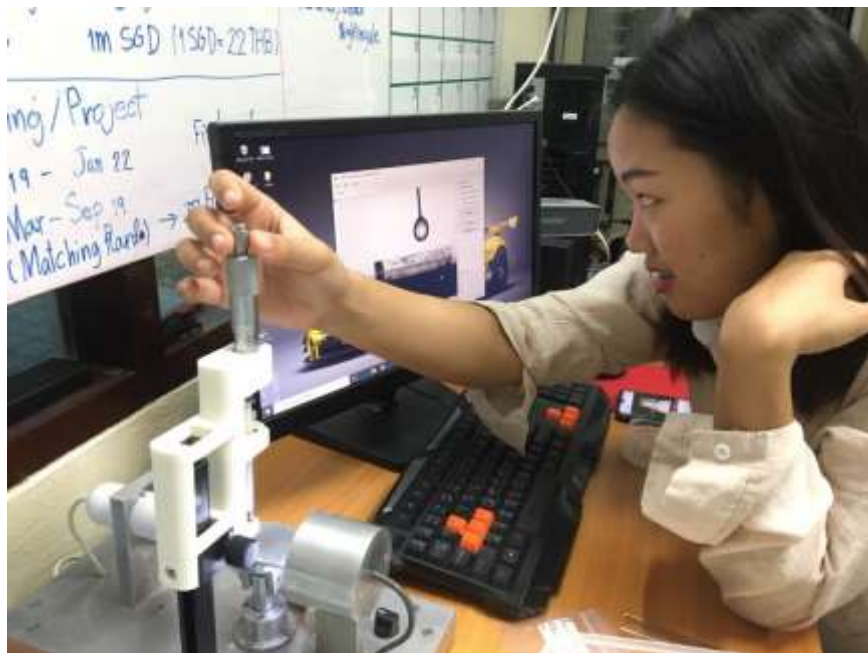
2. เครื่องมือในการวิเคราะห์ชิ้นงาน ดังภาพ ข-4 – ข-6



ภาพ ข-4 เครื่องผลิตพลาสมาความดันต่ำระบบ



ภาพ ข-5 แสดงเครื่อง AFM และการแสดงผลบนคอมพิวเตอร์



ภาพ ข-6 การตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่องวัดค่ามุมสัมผัส

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ : นางสาวณัฐวรา ชันธิกุล

รหัสนักศึกษา : 59061275

วัน เดือน ปี เกิด : 11 กันยายน 2540

ประวัติการศึกษา : กำลังศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญ จังหวัดลำปาง

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนอัสสัมชัญ จังหวัดลำปาง

ที่อยู่ปัจจุบัน : 191/64 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000

เบอร์โทรศัพท์ : 0948277219



ชื่อ : นางสาวลลันลลิต อาชีวะนันท์

รหัสนักศึกษา : 590610331

วัน เดือน ปี เกิด : 31 ธันวาคม 2540

ประวัติการศึกษา : กำลังศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีราชินูทิศ จังหวัดอุดรธานี

ที่อยู่ปัจจุบัน : หอพักกุสยามเพลส ซอยสุขเกษม ต.สุเทพ อ.เมือง จ. เชียงใหม่ 50200

เบอร์โทรศัพท์ : 0991731325

