



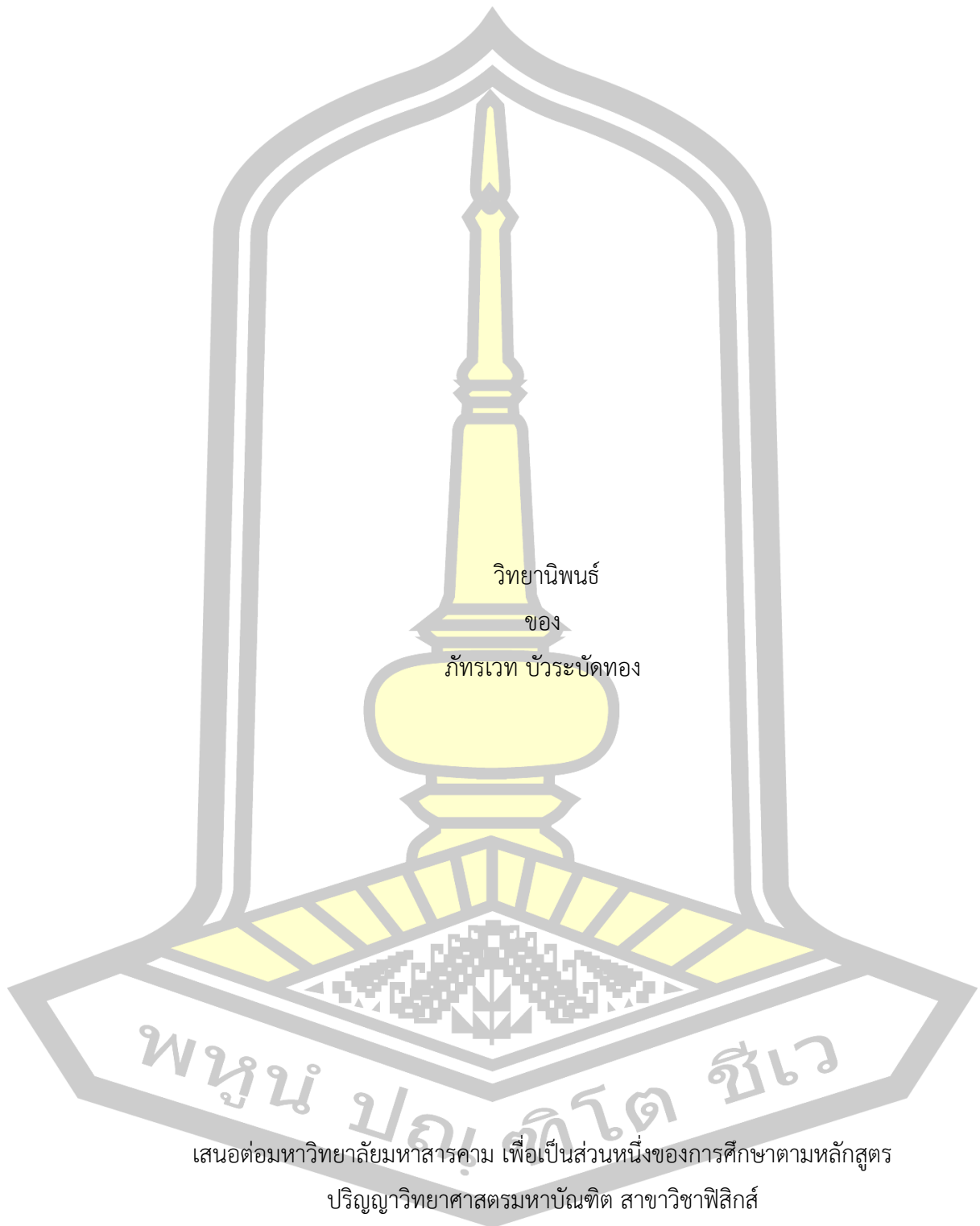
การวัดพลังงานไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิเลเตอร์คาโรติกแวกคัมอาร์ก

วิทยานิพนธ์
ของ
ภัทรเวท บัวระบัดทอง

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การวัดพลังงานไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิเตอร์คาโรติกแวกคัมอาร์ก



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

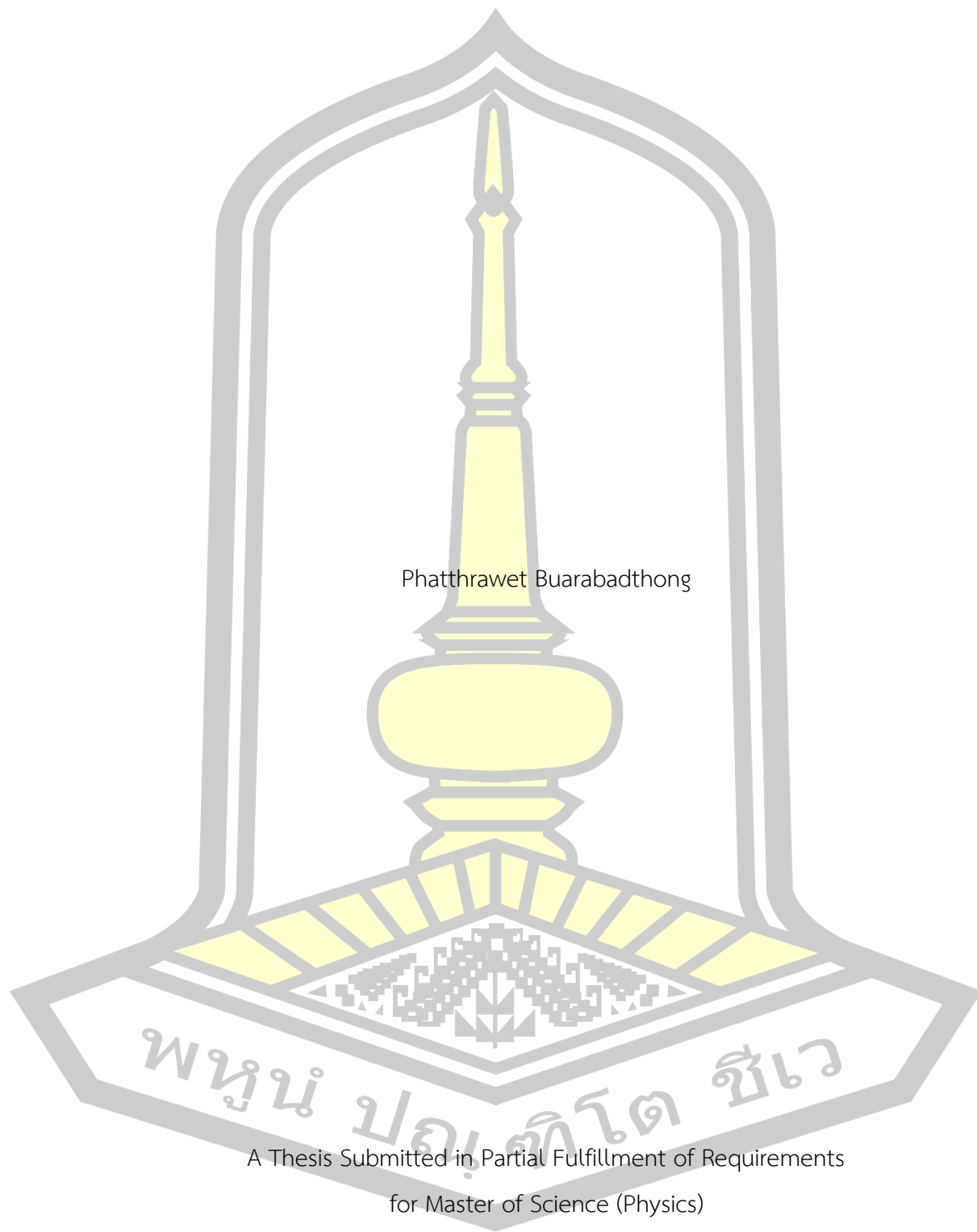
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

An Ion Energy Measurement for Pulse Filtered Cathodic Vacuum Arc Plasma Source

Phatthrawet Buarabadthong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Physics)

May 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายภัทรเวท บัวระบัดทอง แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. วิรัตน์ เจริญบุญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร. นิตศักดิ์ ปาสาจะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. พิษณุ พูลเจริญศิลป์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การวัดพลังงานไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโรติกแวกคัมอาร์ก		
ผู้วิจัย	ภัทรเวท บัระบัดทอง		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. นิติศักดิ์ ปาสาจะ		
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการวัดพลังงานไอออนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโรติกอาร์กในระบบสุญญากาศที่มีแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดโดยใช้หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง เพื่อศึกษาอิทธิพลของการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบให้กับชิ้นงานต่อพลังงานไอออนคาร์บอนจึงได้ทำการวัดพลังงานไอออนเมื่อชิ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า 0 ถึง -80 โวลต์ เพื่อศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนจากเทคนิคฟิลเตอร์คาโรติกแวกคัมอาร์กที่กำเนิดพลาสมาแบบห้วงหรือแบบพัลส์ ด้วยเทคนิคการวัดพลังงานภายในสัญญาณพัลส์อาร์กและการห้วงสัญญาณเวลาของการวัดพลังงาน จาก 0 ถึง 1000 ไมโครวินาที ความละเอียดช่วงเวลากการวัด 450 ไมโครวินาที และเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสอาร์กต่อพลังงานไอออนคาร์บอน ได้ทำการวัดพลังงานเมื่อกระแสอาร์กถูกปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 480 แอมแปร์ ถึง 896 แอมแปร์ ผลของการวัดพลังงานไอออนพบว่า พลังงานไอออนจะมีค่าประมาณ 20 อิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าลบที่ไบอัสให้ชิ้นงาน พลังงานไอออนคาร์บอนที่สูงที่สุดมีค่าประมาณ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ ตรวจวัดได้ในกรณีที่ชิ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -80 โวลต์ ในการวัดพลังงานไอออนภายในสัญญาณพัลส์อาร์กและการปรับค่ากระแสอาร์ก พบว่า พลังงานไอออนคาร์บอนไม่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ความหนาแน่นไอออนที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร โดยจะมีความหนาแน่นสูงในส่วนกลางพัลส์ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณกระแสอาร์ก และการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอาร์กจะส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของไอออน ความหนาแน่นที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงที่สุด 8.64×10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อกระแสอาร์กมีค่าเท่ากับ 896 แอมแปร์

คำสำคัญ : เทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโรติกอาร์ก, หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง, พลังงานไอออนคาร์บอน

TITLE	An Ion Energy Measurement for Pulse Filtered Cathodic Vacuum Arc Plasma Source		
AUTHOR	Phatthrawet Buarabadthong		
ADVISORS	Nitisak Pasaja , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Physics
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

The carbon ions energy in pulsed-filtered cathodic vacuum arc plasma source was measured by retarding field ion energy analysis probe. To study the influence of negative bias voltage, the substrate was applied negative bias voltage from 0 to -80 V. To study the ion energy during the arc pulse plasma. The Time-resolved technique was used to measure carbon ion energy, with a time resolution of the order of 450 microseconds. The delay time to recording the ion energy was adjusted from 0 to 1000 microseconds after arc ignition. It was found that the ion energy in the arc plasma dependent on substrate bias voltage, which in the range of 20 – 100 eV as the bias voltage changed. The results show that the ion energy does not change over the arc pulse and the ion energy is 20 eV at ground substrate biased. However, the ion density increases from $2.19 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ in the early arc pulse up to $4.65 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ in the middle pulse and then decrease to zero at the end of the arc pulse. And adjusting the arc current, the ion energy was not changed. And the arc current will increase the ion density, approximately $8.64 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ when the arc current is 896 amperes.

Keyword : Pulsed filtered cathodic vacuum arc, Time-resolved technique, Retarding field analysis, pulse width, ion energy

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลากรหลายท่าน ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.นิติศักดิ์ ปาสางะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ ตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการจัดทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสนับสนุนในการร่วมนำเสนอผลงานในระดับนานาชาติ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ พูลเจริญศิลป์ อาจารย์ประจำหน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผู้ให้คำแนะนำขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตลอดจนตรวจสอบข้อบกพร่องและแนะนำวิธีแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ขอขอบคุณ คุณเอกพล เพ็ชรนวก เจ้าหน้าที่ประจำโรงประลองวิชา ภาควิชาฟิสิกส์ ที่คอยให้คำแนะนำในส่วนของการออกแบบและดูแลการใช้เครื่องกลึง เครื่องกัด รวมถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ โพลีเมอร์ และเซรามิค เพื่อนำมาเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือในกระบวนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ดร.ศรายุทธ ตันมี และคุณอุกฤษฏ์ ฤทธิหงส์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค Raman spectroscopy และเทคนิค XPS

ขอขอบคุณบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในกระบวนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ในการสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้าย ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการดำเนินการวิจัย ภายใต้สัญญาเลขที่ “ThEP-61-EQP-MSU2”

ภัทรเวท บัวระบัดทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 สถานที่ทำการวิจัย	4
1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย	4
1.6.1 อุปกรณ์เครื่องมือวิจัย	4
1.6.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	4
1.7 การวิเคราะห์ข้อมูล	5
บทที่ 2.....	6
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	6
2.1 ทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	6
2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเคลือบและโครงสร้างฟิล์ม	6

2.1.1 พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง	8
2.1.1.1 ความหนาแน่นพลาสมา.....	8
2.1.1.2 อุณหภูมิ	9
2.1.1.3 ฟลักซ์ไอออน.....	10
2.2 ฟิล์มเตตระไฮดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน	12
2.3 เทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ	13
2.3.1 แนวคิดและการออกแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กใน ระบบสุญญากาศที่ปราศจากข้อบกพร่อง.....	13
2.3.2 กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ	16
2.4 กระบวนการวัดพลังงานไอออนด้วยเทคนิค retarding field ion energy analysis.....	17
2.4.1 โครงสร้างหัววัดพลังงานของไอออนแบบใช้สนามหน่วง	19
2.4.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบหัววัดพลังงานไอออน	20
2.5 กระบวนการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบาง.....	23
2.5.1 เทคนิค X-ray reflectometry.....	23
2.5.2 เทคนิค Raman spectroscopy	25
2.5.3 เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy.....	27
บทที่ 3	30
อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ	31
3.1.1 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบ สุญญากาศ	31
3.1.2 ระบบสุญญากาศ	33
3.1.3 ขั้นตอนการเดินระบบสุญญากาศ.....	34
3.1.4 ขั้นตอนการกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก	36

3.2 กระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอน	37
3.2.1 หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง	37
3.2.2 หลักการตรวจวัดพลังงานไอออนด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง	39
3.2.3 การตั้งค่าเครื่องจ่ายศักย์หลวงและวัดกระแสไอออน	41
3.2.4 การตั้งค่าแหล่งกำเนิดสัญญาณหลวงเวลา	44
3.2.5 เงื่อนไขการวัดพลังงานไอออนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์ก ในระบบสุญญากาศ	45
3.2.5.1 วัดพลังงานจลน์ที่ติดตัวของไอออนคาร์บอน	45
3.2.5.2 วัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ	47
3.2.5.3 วัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก	48
3.2.5.4 วัดพลังงานไอออนคาร์บอนด้วยการปรับเปลี่ยนกระแสอาร์ก	50
3.3 วิธีวิเคราะห์และประมวลผลการวัดพลังงานไอออน	51
3.4 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน	53
3.4.1 กระบวนการทำความสะอาดชิ้นงาน	53
3.4.2 กระบวนการตกสะสมฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน	54
3.4.2.1 กระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมาพลังงานสูง	54
3.4.2.2 กระบวนการตกสะสมฟิล์ม ta-C ด้วยเทคนิค pulse-FCVA	54
3.5 วิธีวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน	55
3.5.1 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray reflectometry	55
3.5.2 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค Raman spectroscopy	74
3.5.3 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy	80
บทที่ 4	88
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	88

4.1 ผลการวัดพลังงานไอออน	88
4.1.1 ผลการวัดพลังงานที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอน	88
4.1.2 ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ	89
4.1.3 ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก	92
4.1.3.1 ผลการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กด้วยการปรับ ค่า NPLC.....	92
4.1.3.2 ผลการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กด้วยการปรับ สัญญาณหน่วงเวลา.....	93
4.1.4 ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนด้วยการปรับเปลี่ยนกระแสอาร์ก	96
4.2 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มเตตระอีตรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน	97
4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray reflectometry.....	99
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค Raman spectroscopy.....	101
4.2.3 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy...	105
บทที่ 5	111
สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
บรรณานุกรม.....	113
ภาคผนวก.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	130

สำนักพิมพ์ ปณ. สก. โตะ ชี. เว

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของฟิล์ม DLC ที่มีโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกัน.....	12
ตารางที่ 2.2 ภาพรวมของเทคนิคการเริ่มต้นการอาร์ก	13
ตารางที่ 2.3 เปรียบค่าความแข็งของฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชรจากการเคลือบด้วยเทคนิคต่างกัน ..	16
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์ม ta-C	100
ตารางที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของคาร์บอนและออกซิเจนบนฟิล์ม ta-C	109

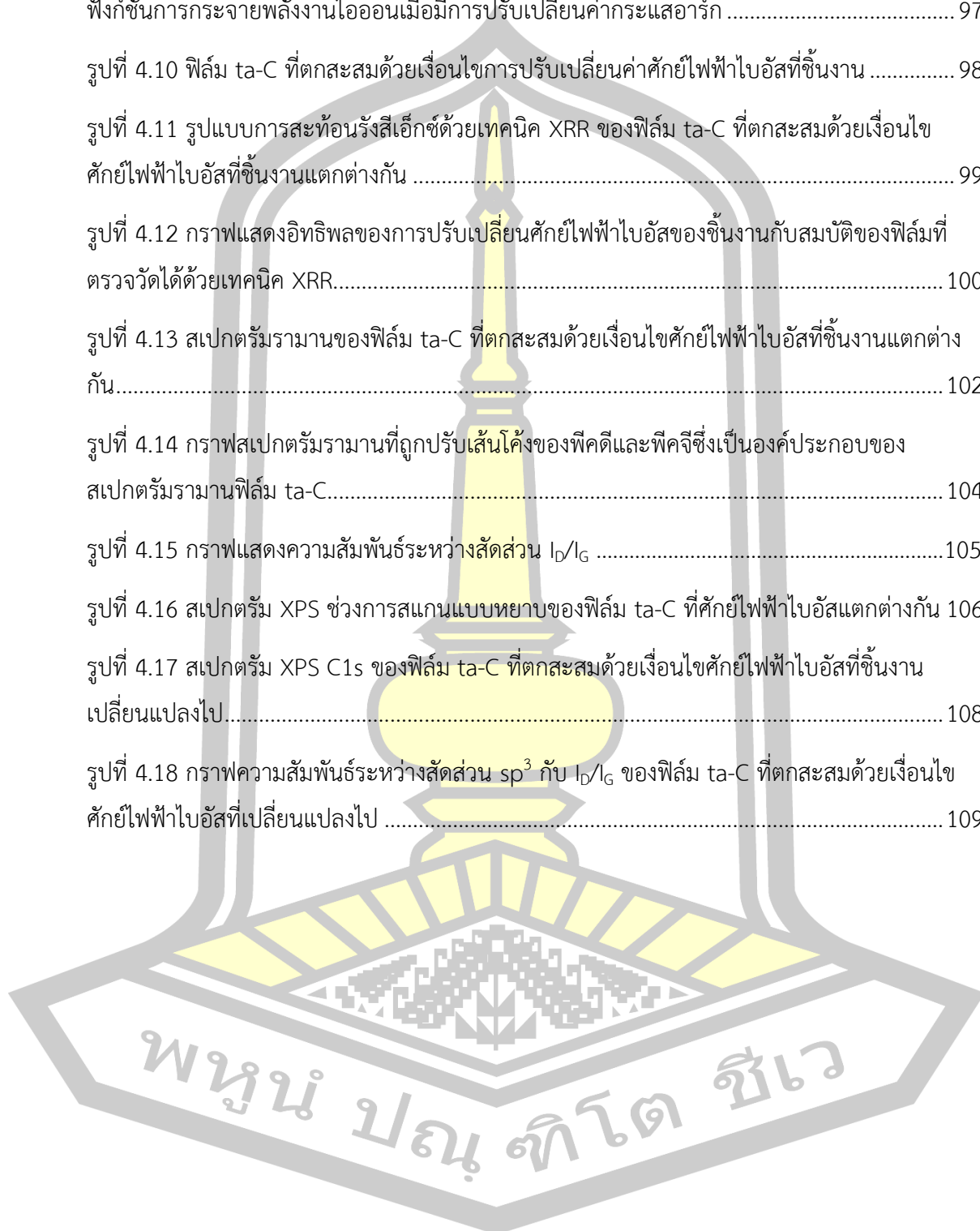


สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมเขตโครงสร้างของฟิล์มบาง เสนอโดย Anders	6
รูปที่ 2.2 ข้อบกพร่องของฟิล์มบางที่เกิดจากความเค้นอัดตกค้างภายในฟิล์ม	7
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการขยายตัวของพลาสมาจากจุดคาโทดที่อยู่ในบริเวณเขตเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า (Equilibrium plasma)	9
รูปที่ 2.4 กราฟแจกแจงพลังงานจลน์แบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์	9
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของไอออนในท่อตรง	10
รูปที่ 2.6 รูปแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ triggerless vacuum arc initiation อย่างง่าย	15
รูปที่ 2.7 แผนภาพเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ	17
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงแนววิถีของไอออนในหัววัด	18
รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมหัววัดพลังงานไอออน	19
รูปที่ 2.10 หลักการวัดพลังงานไอออนของหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหมุนวงกลมปกติ	20
รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดงค่าวิกฤตของกริดในหัววัดพลังงานไอออน	22
รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมแสดงค่าความหนาของพลาสมาซีท	22
รูปที่ 2.13 แสดงแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค XRR	24
รูปที่ 2.14 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี	25
รูปที่ 2.15 สเปกตรัมรามานของการวิเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชรที่เคลือบด้วยเทคนิค PECVD บนคาร์บอนไนไตรด์	26
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
รูปที่ 3.2 แผนภาพแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์ก รูปแบบที่ 1	32
รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์กแบบมีขดลวดตัวกรอง (FCVA)	33
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแสดงระบบสุญญากาศของแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิค FCVA	33
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมส่วนประกอบโครงสร้างหัววัดพลังงานไอออน	38
รูปที่ 3.6 การต่อสายสัญญาณในการวัดศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดพลังงาน	40

รูปที่ 3.7 สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากหัววัดพลังงาน	41
รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมการต่อสายสัญญาณระหว่างหัววัดพลังงานฯ	46
รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมข้อผิดพลาดไฟฟ้าภายในหัววัดพลังงานฯ กับเครื่องตรวจวัดสัญญาณกระแสไอออน	47
รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมข้อผิดพลาดไฟฟ้าภายในหัววัดพลังงานฯ กับการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วกริดที่ 148	
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะสัญญาณกระแสอาร์กกับสัญญาณตำแหน่งช่วงของการวัดพลังงานไอออน ด้วยการปรับค่า NPLC	49
รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณกระแสอาร์กและช่วงเวลาของการวัดพลังงานฯ ภายในสัญญาณอาร์กพัลส์ จากการกำหนดสัญญาณหน่วงเวลา	50
รูปที่ 3.13 แสดงสัญญาณกระแสอาร์กของการกำเนิดพลาสมา	51
รูปที่ 4.1 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วง (ข) กราฟฟังก์ชันการ กระจายพลังงานไอออน	88
รูปที่ 4.2 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วงเมื่อถูกไบอัสด้วย ศักย์ไฟฟ้าลบ (ข) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อมีการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส	90
รูปที่ 4.3 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุดกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส ที่เปลี่ยนแปลงไป (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของไอออนกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส	91
รูปที่ 4.4 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วง (ข) กราฟฟังก์ชันการ กระจายพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กจากการปรับค่า NPLC	92
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง	93
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง เมื่อขั้วกริด ไฟฟ้าที่ 1 (ก) ต่อลงกราวด์ (ข) ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -30 V (ค) ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -60 V	94
รูปที่ 4.7 กราฟเชิงรูปร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนกับความหนาแน่นของไอออน ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก	95
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออน ความเร็วไอออนเฉลี่ย และ พลังงานไอออนเฉลี่ยภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก	95

รูปที่ 4.9 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง (ข)กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอาร์ก	97
รูปที่ 4.10 फिल्म ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงาน	98
รูปที่ 4.11 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิค XRR ของ फिल्म ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานแตกต่างกัน	99
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าไบอัสของขึ้นงานกับสมบัติของ फिल्मที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค XRR.....	100
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรามานของ फिल्म ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานแตกต่างกัน.....	102
รูปที่ 4.14 กราฟสเปกตรัมรามานที่ถูกปรับเส้นโค้งของพีคดีและพีคจีซึ่งเป็นองค์ประกอบของสเปกตรัมรามาน फिल्म ta-C.....	104
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน I_D/I_G	105
รูปที่ 4.16 สเปกตรัม XPS ช่วงการสแกนแบบหยาบของ फिल्म ta-C ที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัสแตกต่างกัน	106
รูปที่ 4.17 สเปกตรัม XPS C1s ของ फिल्म ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานเปลี่ยนแปลงไป.....	108
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน sp^3 กับ I_D/I_G ของ फिल्म ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่เปลี่ยนแปลงไป	109



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

กระบวนการตกสะสมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางพลาสมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ (filtered cathodic vacuum arc deposition technique, FCVA technique) เป็นกระบวนการตกสะสมฟิล์มบางด้วยไอเชิงกายภาพ (physical vapor deposition, PVD) ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว เนื่องจากพลาสมาที่เกิดจากเทคนิค FCVA เกือบทั้งหมดจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีพลังงานสูงและความหลากหลายทางสถานะประจุ (charge state) ซึ่งเป็นจุดเด่นสำคัญ ตรงข้ามกับกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยไอเชิงกายภาพอื่น ๆ เช่น เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) และเทคนิคการระเหิดด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) เป็นต้น การเกิดไอออนในเซชันที่ค่อนข้างสูงในพลาสมาของเทคนิค FCVA ทำให้สามารถควบคุมพลังงานไอออนได้โดยอาศัยสนามไฟฟ้า เช่น การไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ชิ้นงานหรือการไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนด ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้จะทำให้สามารถปรับโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานของฟิล์มบางได้ [1] จากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมา พบว่า พลังงานไอออนของพลาสมาจากเทคนิค FCVA ตรวจวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 20 – 150 eV ขึ้นอยู่กับมวลไอออนของวัสดุที่เป็นขั้วแคโทด [2] และพลาสมาที่มีขั้วแคโทดเป็นคาร์บอนมีพลังงานไอออนประมาณ 20 eV [3],[4] ในช่วงที่ผ่านมาฟิล์มบางคาร์บอนที่ตกสะสมด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกายภาพได้รับความสนใจและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ฟิล์มคาร์บอนที่มีสมบัติคล้ายเพชร (diamond like carbon, DLC) เป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน (ta-C) มีสมบัติความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นของฟิล์มสูง มีความเสถียรทางความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ โดยคุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ขึ้นอยู่กับพลังงานไอออนคาร์บอนระหว่างกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง [5] และพบว่าในกระบวนการตกสะสมฟิล์ม ta-C นั้น ไอออนคาร์บอนที่มีพลังงานประมาณ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ จะส่งผลให้ฟิล์ม ta-C มีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูงสุด โดยมีสัดส่วนพันธะ sp^3 ประมาณ 70% - 80% [6] แสดงถึงการมีคุณสมบัติที่คล้ายเพชรของฟิล์มบาง อีกทั้งไอออนที่มีพลังงานสูงจะส่งผลให้ค่าสภาพการยึดติดระหว่างฟิล์มบางกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น [7] ดังนั้น พลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบชิ้นงานในกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง มีอิทธิพลอย่างมากต่อการกำหนดโครงสร้าง สมบัติ และคุณภาพของฟิล์ม [8] การเฝ้าสังเกต ตรวจวัด และควบคุมพลังงานของไอออนที่ตกกระทบฟิล์มจึงเป็น

ความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการเคลือบและถือเป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับการควบคุมสมบัติของฟิล์มบาง

เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานไอออนที่มีพลังงานสูงต่อกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง จึงได้มีการศึกษาและวัดพลังงานไอออนด้วยกระบวนการต่าง ๆ หลากหลายวิธี เช่น energy selective mass spectrometry[9] เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน (ion energy distribution function, IEDF) โดยการดึงเอาไอออนบวกหรือไอออนลบเข้ามาภายในส่วนตรวจวัดและทำการวิเคราะห์ด้วยการใช้อัตราส่วนมวลต่อประจุ[10] เทคนิค time-of-flight spectrometers (TOF) เป็นเทคนิคที่สามารถแยกวิเคราะห์พลังงานอย่างละเอียดของไอออนแต่ละสถานะประจุ[11] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบปัญหาในการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนด้วยเทคนิคเหล่านี้ เช่น ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลพลังงานที่เกิดจากการไอออนในเซชันของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าภายในส่วนตรวจวัดของ energy selective mass spectrometry[10] หรือความจำเป็นในการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่และความไม่ชัดเจนของข้อมูลพลังงานไอออนเฉลี่ยในวัสดุที่มีความหลากหลายสถานะประจุของเทคนิค TOF[11] รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงของเทคนิคทั้งสอง วิธีที่สะดวกที่สุดและถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วง (retarding field ion energy analysis, RFA)[12] เนื่องจากมีขนาดเล็ก ง่ายต่อการออกแบบและติดตั้งเข้าไปภายในแหล่งกำเนิดพลาสมาได้ง่าย สามารถวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก (time-resolved RFA) จากเทคนิค FCVA ได้ อีกทั้งเทคนิค RFA นี้ สามารถวัดพลังงานไอออนในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไอออนด้วยการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงานหรือไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ชั่วแค่โทด ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบจากเทคนิคการวัดพลังงานแบบอื่น

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาความกว้างพัลส์อาร์ก และพลังงานไอออนคาร์บอนกรณีที่ขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ โดยใช้หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนด้วยเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

1.2.2 ศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

1.2.3 ศึกษาผลของพลังงานไอออนคาร์บอนต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนที่มีสมบัติคล้ายเพชร

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดพลังงานไอออนของคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง วัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ และศึกษาผลของพลังงานไอออนต่อคุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอนที่มีสมบัติคล้ายเพชร โดยมีขอบเขตของการศึกษา ดังนี้

- 1.3.1 ศึกษา ออกแบบ และสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาเพื่อติดตั้งในระบบฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ ณ หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- 1.3.2 ศึกษาส่วนประกอบและหลักการทำงานของหัววัดพลังงานไอออนแบบใช้สนามหมุนงเพื่อใช้ในการวัดพลังงานไอออนของคาร์บอน
- 1.3.3 วัดพลังงานที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอน วัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ วัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามความกว้างเวลาสัญญาณพัลส์อาร์ก และวัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อกระแสอาร์กถูกปรับเปลี่ยน
- 1.3.4 เคลือบฟิล์มบางคาร์บอนด้วยเงื่อนไขการไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขึ้นงานที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานไอออนคาร์บอนที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนด้วยเทคนิคการสะท้อนรังสีเอกซ์ (X-ray reflectometry) เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) และเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจ สามารถวัดพลังงานที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอนได้
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจ สามารถวัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบในระหว่างกระบวนการตกสะสมฟิล์มบางด้วยเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ
- 1.4.3 มีความรู้ความเข้าใจ สามารถวัดพลังงานไอออนของคาร์บอนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

- 1.4.4 สามารถวิเคราะห์หิทธิพลของพลังงานไอออนคาร์บอนที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอนที่ตกสะสมด้วยเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

- 1.5.1 หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- 1.5.2 หน่วยบริการวิชาการด้านเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- 1.5.3 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย

1.6.1 อุปกรณ์เครื่องมือวิจัย

1. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber)
2. แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ
3. วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์กระแสสูง (pulse-forming network, PFN)
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง (power supply)
5. ระบบน้ำหล่อเย็น
6. ปืนกลโรตารี
7. เทอร์โบโมเลคูลาร์ปั๊ม
8. ชุดเกจวัดความดัน
9. หัววัดพลังงานไอออนแบบใช้สนามหน่วง
10. แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับผลึกอิเล็กทรอนิกส์
11. แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าหน่วงและวัดกระแสไอออน
12. แผ่นซิลิกอน ชนิดพี ระบาย (100)

1.6.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แก๊สอาร์กอน (Argon, Ar) ความบริสุทธิ์ 99.995%
2. สารละลายอะซิโตน (Acetone)
3. สารละลายเมทานอล (Methanol)
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI)

1.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

1.7.1 กระบวนการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนจากหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามขวางด้วยโปรแกรม Origin 2018

1.7.2 วิเคราะห์หาความหนา ความหนาแน่น และความขรุขระของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray reflectivity, XRR

1.7.3 วิเคราะห์หาสัดส่วน I_D/I_G ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

1.7.3 วิเคราะห์หาความเข้มข้นพันธะ sp^2 และ sp^3 ด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy



บทที่ 2

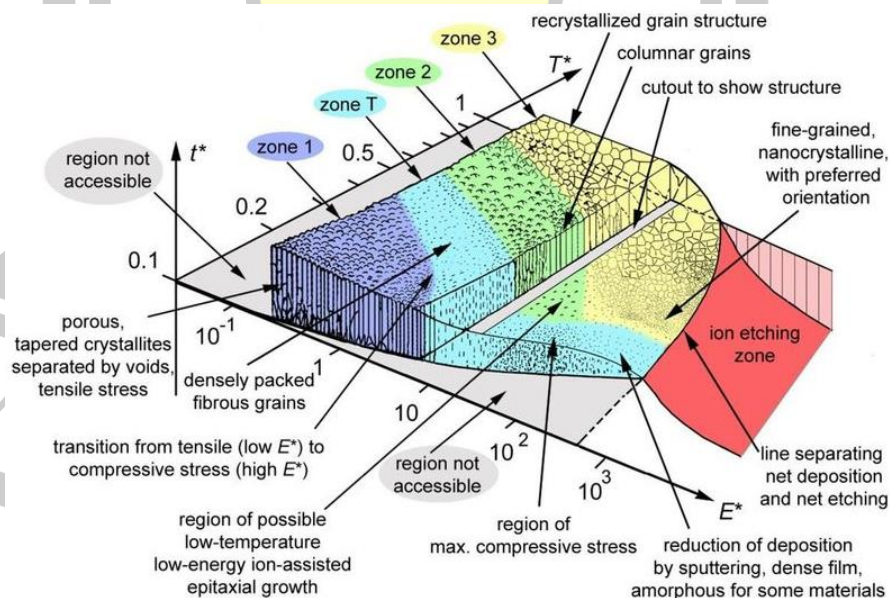
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศเมื่อชิ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ และกระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามสัญญาณพัลส์อาร์ก รวมไปถึงศึกษาผลของพลังงานไอออนคาร์บอนต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนที่มีสมบัติคล้ายเพชร ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการวัดพลังงานไอออนและกระบวนการตกสะสมฟิล์มบางด้วยเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

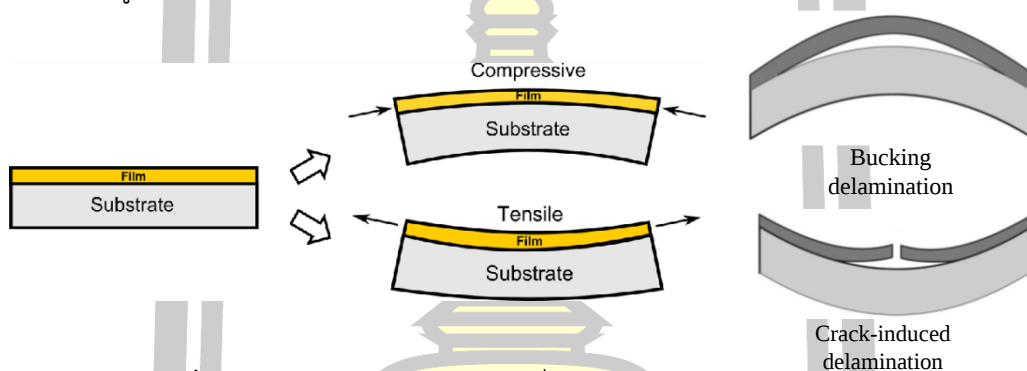
2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเคลือบและโครงสร้างฟิล์ม

พารามิเตอร์ของกระบวนการเคลือบพลาสมามีความเชื่อมโยงโดยตรงกับโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติของฟิล์ม ในปี ค.ศ.2010 Anders[8] ได้เสนอไดอะแกรมเขตโครงสร้างความเชื่อมโยงระหว่างพารามิเตอร์ของกระบวนการเคลือบพลาสมาต่อลักษณะเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มบางที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิของชิ้นงานและพลังงานไอออนที่ระดมชนผิวฟิล์มระหว่างกระบวนการเคลือบพลาสมา ไดอะแกรมเขตโครงสร้างของ Anders แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมเขตโครงสร้างของฟิล์มบาง เสนอโดย Anders

จากไดอะแกรมเขตโครงสร้างที่เสนอโดย Ander เห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิของเนื้อฟิล์มระหว่างกระบวนการเคลือบ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานจลน์ที่ติดตัวมาของอนุภาคก่อนกระทบผิวฟิล์มมีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้น การควบคุมพารามิเตอร์ทั้งสองจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการกำหนดโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม นอกจากผลกระทบต่อโครงสร้าง พลังงานจลน์ของอนุภาคที่กระทบชิ้นงานขณะเคลือบยังมีผลต่อสมบัติของฟิล์ม เช่น ความเค้น หากอุณหภูมิที่กระทบฟิล์มมีพลังงานจลน์น้อยกว่า 1 eV ฟิล์มและชิ้นงานจะแสดงลักษณะโค้งงอ เนื่องจากความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์ม ในทางตรงข้าม ฟิล์มและชิ้นงานจะแสดงลักษณะโก่งนูนเมื่ออนุภาคตกกระทบฟิล์มด้วยพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.2 การควบคุมพลังงานของอนุภาคที่กระทบฟิล์มจึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้กำหนดรูปแบบและระดับความเค้นของฟิล์ม



รูปที่ 2.2 ข้อบกพร่องของฟิล์มบางที่เกิดจากความเค้นอัดตึงภายในฟิล์ม

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของฟิล์มคือสภาพการยึดติดของฟิล์มกับพื้นผิวของวัสดุ Ehasarian และคณะ[7] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับไอออนของอะตอมโครเมียมด้วยการไปอัสติลย์ไฟฟ้า -1000 V ที่ชิ้นงานก่อนกระบวนการเคลือบฟิล์ม CrN เป็นผลทำให้ฟิล์ม CrN มีสภาพการยึดติดกับพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งคณะผู้วิจัยได้อธิบายว่าเนื่องจาก Cr^+ ที่มีพลังงานจลน์ระดับ 1000 eV จะฝังตัวลงไปได้ผิวชิ้นงานด้วยความลึกระดับนาโนเมตร และทำหน้าที่เป็นชั้นประสานระหว่างผิวชิ้นงานกับฟิล์มที่ลงมาเคลือบภายหลัง เมื่อพิจารณาในระดับจุลภาค โมเลกุลของ CrN จะสร้างพันธะกับอะตอมของชั้นประสานซึ่งเป็นอะตอมธาตุเดียวกันได้ดีและแน่นกว่าการสร้างพันธะโดยตรงกับอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม จากการศึกษาและวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง โดยเฉพาะพลังงานไอออนในพลาสมาที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวชิ้นงานมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกำหนดโครงสร้าง คุณสมบัติ และคุณภาพของฟิล์มบาง ดังนั้น การสังเกต การตรวจวัด และการที่สามารถควบคุมพลังงานจลน์ของไอออนที่ตกกระทบเป็นฟิล์มบางได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการเคลือบ และเป็นวิธีหนึ่งสำหรับการควบคุมสมบัติและคุณภาพของฟิล์มบาง

2.1.1 พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง

อุณหภูมิ ความหนาแน่นพลาสมา ฟลักซ์อนุภาค และพลังงานไอออนของพลาสมา เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะส่งผลต่อสมบัติของพลาสมา การศึกษาและความเข้าใจกับพารามิเตอร์เหล่านี้ จะทำให้สามารถวินิจฉัย พิจารณาสมบัติของพลาสมาต่อการทำอันตรกิริยาระหว่างพลาสมาและพื้นผิววัสดุในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางได้

2.1.1.1 ความหนาแน่นพลาสมา

ความหนาแน่นของพลาสมา (Plasma density)[13] เป็นการอ้างอิงถึงระดับการเกิดไอออนไนซ์ของก๊าซ ซึ่งการเกิดไอออนไนซ์หรือการแตกตัวเป็นไอออนนี้จะไปเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารและการเป็นพลาสมา ซึ่งความหนาแน่นของพลาสมา คือ จำนวนอนุภาคที่ปรากฏอยู่ในปริมาตรหนึ่ง ๆ สำหรับก๊าซในอุดมคติความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับความดันและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.1)

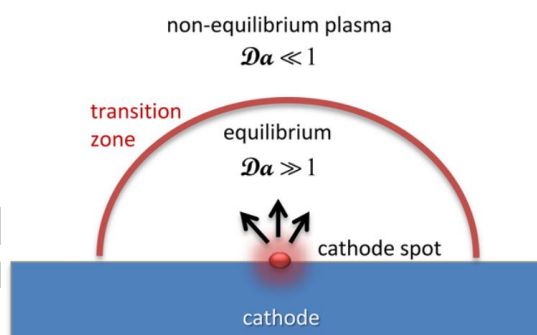
$$P = n_g kT \quad (2.1)$$

เมื่อ P คือความดันในหน่วยปาสคัล (Pa) n_g คือความหนาแน่นอนุภาค มีหน่วยเป็นจำนวนอนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร (m^{-3}) และ k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K และ T คือ อุณหภูมิก๊าซในหน่วยเคลวิน (K)

พลาสมาประกอบขึ้นจากอนุภาคหลักสามชนิด[14] คือ อิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลาง ดังนั้น ความหนาแน่นก็จะถูกแบ่งตามชนิดของอนุภาค ได้แก่ n_e , n_i และ n_n แทนความหนาแน่นอนุภาคของอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลาง ตามลำดับ จากสมบัติประหนึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมา ประจุลัพท์ที่ได้จะมีค่าประมาณศูนย์ ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนในพลาสมาจึงมีค่าประมาณใกล้เคียงกับจำนวนไอออนด้วย ดังสมการที่ (2.2)

$$n_e \approx n_i \quad (2.2)$$

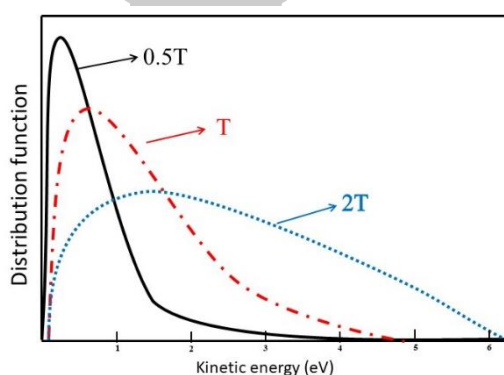
แต่อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและไอออนอาจมีค่าไม่เท่ากันในบางกรณี ดังนั้น เมื่อกล่าวถึงความหนาแน่นของพลาสมาจึงใช้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นตัวแทน



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการขยายตัวของพลาสมาจากจุดคาโทดที่อยู่ในบริเวณเขตเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า (Equilibrium plasma) ที่มีความสมดุลของประจุพลาสมา ไปยังเขตที่ไม่สมดุลของประจุพลาสมา (non- Equilibrium plasma)[15]

2.1.1.2 อุณหภูมิ

ปริมาณทางฟิสิกส์ที่พิจารณาจากฟังก์ชันแจกแจงความเร็ว อัตราเร็ว และพลังงาน ล้วนมีความเชื่อมโยงกับอุณหภูมิ อุณหภูมิสามารถนิยามได้จากค่าเฉลี่ยพลังงานจลน์ของอนุภาคในสารใดๆ ที่สอดคล้องกับความร้อนหรือความเย็นของสารนั้น ก๊าซในสมดุลความร้อนทุกอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ และโอกาสการแจกแจงความเร็วเหล่านี้ เรียกว่า การแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution)[16] การแจกแจงความเร็วแบบแมกซ์เวลล์ในทางกลศาสตร์สถิติจะอธิบายความเร็วของอนุภาคของก๊าซในอุดมคติ โดยอนุภาคเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในภาชนะโดยไม่ทำอันตรกิริยากับอนุภาค ยกเว้นการชนกันในการณีเข้าใกล้กันมาก

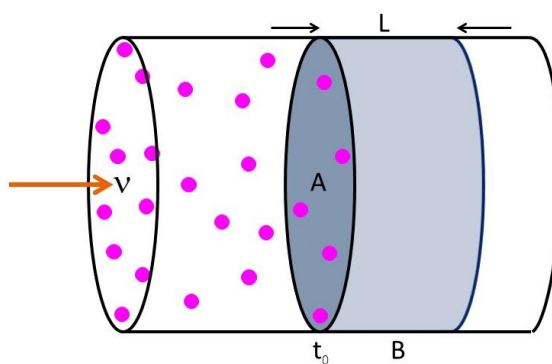


รูปที่ 2.4 กราฟแจกแจงพลังงานจลน์แบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ โดยให้แกนตั้งเป็นฟังก์ชันการกระจายตัวแทนด้วย $\frac{2}{\pi} \sqrt{X} \exp(-X)$ และแกนนอนเป็นพลังงานจลน์แทนด้วย $X = \frac{\epsilon}{kT}$ ดัดแปลงจาก[17]

จากกราฟแจกแจงพลังงานจลน์บรรทัดฐาน (กราฟที่มีพื้นที่ใต้กราฟเป็นหนึ่ง) แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยให้แทนตั้งแทนด้วย $\frac{2}{\pi} \sqrt{X} \exp(-X)$ และแทนนอนแทนด้วย $X = \frac{\epsilon}{kT}$ จากรูปจะเห็นว่าก๊าซที่มีอุณหภูมิ T จุดยอดของเส้นกราฟอยู่ที่ตำแหน่ง $X = 0.5$ สอดคล้องกับพลังงานจลน์ส่วนใหญ่ $X = \frac{\epsilon}{kT}$ กราฟมีลักษณะไม่สมมาตร พื้นที่ใต้กราฟช่วง $X > 0.5$ มีค่ามากกว่าช่วง $X < 0.5$ ดังนั้นค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยจึงต้องมีความมากกว่าพลังงานจลน์ส่วนใหญ่ และฟังก์ชันมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง หมายความว่า โอกาสที่จะพบอนุภาคที่มีพลังงานจลน์มากกว่าหรือน้อยกว่าพลังงานจลน์ส่วนใหญ่มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และฟังก์ชันมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง $X = 0$ และ $X \rightarrow \infty$ หมายความว่า จะไม่มีโอกาสพบอนุภาคที่มีพลังงานจลน์เป็นศูนย์สมบูรณ์หรือมีค่าอนันต์ หากพิจารณาก๊าซที่อุณหภูมิต่ำกว่าครึ่งหนึ่ง ($0.5T$) และอุณหภูมิสูงเป็นสองเท่า ($2T$) ของก๊าซอุณหภูมิ T พบว่าการลดอุณหภูมิของก๊าซลงทำให้ตำแหน่งยอดของเส้นกราฟหรือค่าพลังงานจลน์ของอนุภาคส่วนใหญ่มีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิไม่เพียงเป็นการเพิ่มค่าพลังงานจลน์ของอนุภาคส่วนใหญ่ แต่ยังทำให้อนุภาคที่มีพลังงานสูงมีจำนวนเพิ่มขึ้นมากด้วย

2.1.1.3 ฟลักซ์ไอออน

ฟลักซ์ไอออนคืออัตราจำนวนไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางเมตร แทนด้วยสัญลักษณ์ Γ , มีหน่วยเป็น $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ซึ่งฟลักซ์ไอออนจะเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงกับอุณหภูมิพื้นผิวของชิ้นงาน พลังงานจลน์ของไอออน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดลักษณะการระดมชนพื้นผิววัสดุของไอออนในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของไอออนในท่อตรง[18]

จากรูปที่ 2.5 จะพิจารณาได้ว่าไอออนที่มีความหนาแน่น n_i ที่กำลังเคลื่อนที่ไปตามท่อที่มีพื้นที่หน้าตัด A ไอออนกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v ณ เวลาเริ่มต้น $t = t_0$ ไม่มีไอออนใดเคลื่อนที่ผ่าน

หน้าตัด เมื่อเวลาผ่านไป $T = B$ ไอออนได้เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด A ไปตามความยาว L ทำให้เกิดปริมาตรเสมือนขึ้นมา ซึ่งไอออนในปริมาตรเสมือนหาได้จากสมการที่ (2.3) – (2.4)

$$V = AL = AvB \quad (2.3)$$

$$N = n_i AvB \quad (2.4)$$

เมื่อ N คือ จำนวนอนุภาค n_i คือความหนาแน่นไอออน และ V คือ ปริมาตรของปริมาตรเสมือน และจากนิยามของฟลักซ์ไอออน จะได้ว่า

$$\Gamma_i = \frac{N}{AB} = n_i v_i \quad (2.5)$$

เมื่อ v_i คือความเร็วของไอออน ในกรณีนี้ ไอออนเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดในทิศทางเดียวกันและมีอัตราเร็วเท่ากัน แต่ในสถานการณ์จริงไอออนของก๊าซจะมีความเร็วไม่เท่ากัน (ทั้งขนาดและทิศทาง) การพิจารณาฟลักซ์จึงต้องพิจารณาจากความเร็วเฉลี่ยของไอออนที่ไหลผ่านหรือตกกระทบพื้นผิวที่กำลังพิจารณา ในกระบวนการวัดฟลักซ์ไอออนจะเกิดขึ้นหุ้มพลาสติกมารอบหัววัดฟลักซ์ไอออน ซึ่งจะทำให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านชั้นหุ้มพลาสติกด้วยความเร็วโบห์ม (Bohm velocity, u_B) ตามทฤษฎีของโบห์ม (Bohm theory) ดังสมการที่ (2.6)

$$u_B = \sqrt{\frac{kT}{M}} \quad (2.6)$$

เมื่อ M คือ มวลของไอออน มีค่าเท่ากับ 6.67×10^{-26} kg T คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วยเคลวิน (K) และ k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K ดังนั้นฟลักซ์ไอออนที่ระดมชนพื้นผิวของแท่งโลหะเป็นดังสมการที่ (2.7)

$$\Gamma_i = n_i u_i = n_i \sqrt{\frac{kT}{M}} \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์ของกระแสไอออนกับฟลักซ์ไอออน จะได้ว่า

$$I_i = e\Gamma_i A_p \quad \text{หรือ} \quad \Gamma_i = \frac{I_i}{eA_p} \quad (2.8)$$

เมื่อ A_p คือ พื้นที่บริเวณรับไอออนของหัววัดฯ จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งอุณหภูมิความหนาแน่น และฟลักซ์ไอออนของพลาสมา ล้วนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานไอออนของ

พลาสมา ซึ่งพลังงานไอออนนี้จะเป็พารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างระดับจุลภาค และสมบัติของฟิล์มจากกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยพลาสมา

2.2 ฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน

ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร หรือ Diamondlike Carbon Films; DLC เป็นฟิล์มอะมอร์ฟัสคาร์บอนซึ่งสามารถมีเฟสโครงสร้างของเพชร ทำให้เป็นฟิล์มที่มีความน่าสนใจต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นชั้นเคลือบเพื่อเพิ่มสมบัติและประสิทธิภาพในการใช้งานของชิ้นงาน ฟิล์ม DLC ถูกแบ่งออกเป็นหลายประเภท ตามลักษณะเชิงโครงสร้าง สมบัติ และเทคนิคการตกสะสม[19] ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของฟิล์ม DLC ที่มีโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกัน

ชนิดของฟิล์ม	%sp ³	%H	Density (g.cm ⁻³)	Gap (eV)	Hardness (GPa)
Diamond	100	0	3.515	55	100
Graphite	0	0	2.267	0	
C60	0	0		1.6	
Glassy C	0	0	1.3 – 1.55	0.01	3
Evaporated C	0	0	1.9	0.4 – 0.7	3
Sputtered C	5	0	2.2	0.5	
ta-C	80 - 88	0	3.1	2.5	80
a-C:H hard	40	30 - 40	1.6 – 2.2	1.1 – 1.7	10 – 20
a-C:H soft	60	40 - 50	1.2 – 1.6	1.7 – 4.0	<10
ta-C:H	70	30	2.4	2.0 – 2.5	50
Polyethylene	100	67	0.92	6	0.01

ฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน หรือฟิล์ม ta-C เป็นฟิล์มที่ได้จากกระบวนการตกสะสมด้วยเทคนิค FCVA ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างไปจากฟิล์ม a-C และ a-C:H เนื่องจากเป็นฟิล์มที่ตกสะสมด้วยไอออนคาร์บอนที่มีพลังงานสูงทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นสูง โครงสร้างปราศจากไฮโดรเจนและมีสัดส่วนพันธะ sp³ มากถึง 80% ส่งผลต่อความแข็งฟิล์มที่สูง ทนต่อการสึกหรอได้ดี และเพิ่มคุณสมบัติทางไตรโบโลยีของฟิล์มตามสัดส่วนพันธะ sp³ ที่มากขึ้น ทั้งนี้ ฟิล์ม ta-C ยัง

ประกอบด้วยสัดส่วนของพันธะ sp^2 ซึ่งจะควบคุมคุณสมบัติเชิงแสงและไฟฟ้าของฟิล์มด้วย[20] ทำให้ฟิล์ม ta-C ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในการเป็นชั้นเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าและป้องกันการกัดกร่อน แต่ข้อด้อยของฟิล์ม ta-C ที่ได้จากการตกสะสมด้วยเทคนิค FCVA นี้คือ ความเค้นภายในของฟิล์มมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาของฟิล์ม ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดเกาะของฟิล์มต่ำ[21]

2.3 เทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

2.3.1 แนวคิดและการออกแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศที่ปราศจากข้อบกพร่อง

ในปี ค.ศ. 1879 ครูกส์ (William Crookes)[22] ได้ประดิษฐ์หลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube) พร้อมทั้งศึกษาสมบัติของรังสีแคโทด โดยหลอดรังสีแคโทดนั้นภายในมีแผ่นโลหะเป็นขั้วไฟฟ้าขั้วบวก (anode) และขั้วไฟฟ้าขั้วลบ (cathode) ในกระบวนการทดลองจะทำการสู้อากาศออกจากหลอดเกือบหมด จากนั้นให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงเข้าไป ขณะที่กระแสไหลผ่านหลอดจะปรากฏแสงเรืองสีเขียวขึ้นบริเวณใกล้ขั้วบวก (ทำการทดลองในห้องมืด) ปรากฏการณ์นี้บ่งชี้ว่าการเรืองแสงอาจเกิดจากการแผ่รังสีบางอย่างออกจากขั้วลบและพุ่งตรงไปกระทบกับหลอดแก้วซึ่งฉาบสารเรืองแสง (สังกะสีซัลไฟด์) ไวใกล้กับขั้วบวก และ Crookes ได้ทำการทดลองซ้ำๆ โดยเปลี่ยนหลอดแก้วเป็นแบบต่าง ๆ ซึ่งจะพบปรากฏการณ์เช่นเดียวกัน ดังนั้น Crookes จึงสรุปว่า จะต้องมียิ่งสีหนึ่งออกจากขั้วลบและพุ่งตรงไปยังขั้วบวก เรียกรังสีที่ออกมาจากขั้วลบว่า “รังสีแคโทด” และหลังจากนั้นก็พบว่า รังสีแคโทดจะเดินทางเป็นเส้นตรงจากขั้วแคโทดไปยังแอโนด และรังสีนี้สามารถเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก

กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์กในสุญญากาศ (vacuum arc) หรือ cathodic arc คือ การให้กระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสสูงระหว่างขั้วโลหะอิเล็กโทรดในสุญญากาศ จำเป็นต้องใช้กระบวนการภายนอกเพื่อเริ่มต้นการอาร์ก เช่น high-voltage surface breakdown, mechanical motion, trigger plasma injection และเทคนิคอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

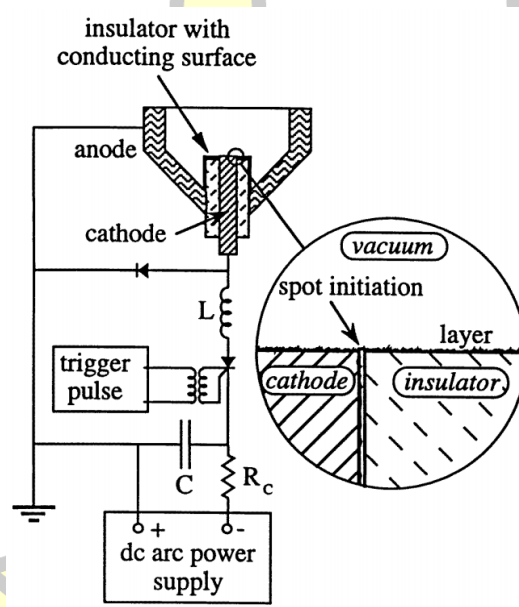
ตารางที่ 2.2 ภาพรวมของเทคนิคการเริ่มต้นการอาร์ก

กลไกการทริกซ์เกอร์	ข้อดี	ข้อด้อย
High-voltage vacuum breakdown	ไม่เกิดการปนเปื้อนโลหะของพลาสมา	ต้องใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง breakdown voltageเปลี่ยนแปลงตามวัสดุขั้วอิเล็กโทรด
Fuse wire explosion	ไม่เกิดการปนเปื้อน	ไม่สามารถทำงานได้ในโหมดการทำงาน

กลไกการทริกซ์เกอร์	ข้อดี	ข้อด้อย
	โลหะของพลาสมา	แบบซ้ำ
Contact separation	เป็นวิธีที่ง่ายเชื่อถือ, เรียบง่าย, และทำงานแบบซ้ำ ๆ ได้	อัตราการทำงานแบบซ้ำ ๆ ต่ำ และพื้นผิวหน้าสัมผัสอาจเกิดการเชื่อมสัมผัสกัน
Mechanical triggering	เป็นวิธีที่ง่ายเชื่อถือ, กระบวนการทริกซ์เกอร์ค่อนข้างง่าย	อัตราทำงานแบบซ้ำต่ำ เกิดการเชื่อมกันของผิวหน้า หรือเกิดการสึกหรอ และมีข้อจำกัดของจำนวนการทริกซ์
High-voltage surface discharge	อัตราการทริกซ์เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ได้สูง	ต้องการพัลส์แรงดันสูง, พลาสมาเกิดการปนเปื้อนเนื่องจากการสึกหรอของผิววัสดุฉนวน
Plasma injection triggering	อัตราการทำงานแบบซ้ำปานกลางถึงสูง	ต้องการพัลส์แรงดันสูง, ใช้งานได้เฉพาะในกระบวนการอาร์กที่กระแสการปลดปล่อยค่อนข้างสูง
Gas injection triggering	ไม่จำเป็นต้องใช้ trigger supply	ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงเพียงพอ เกิดการปนเปื้อนของพลาสมาจากแก๊ส
E × B gas discharge triggering	ทำงานโหมดซ้ำ ๆ ได้มากกว่า 10^6 พัลส์ และสามารถใช้งานได้เมื่อมีการฉีดแก๊ส	ต้องการข้อวิเล็คโทรดแบบพิเศษการจัดเรียงขดลวดแม่เหล็กและแหล่งจ่ายไฟเพิ่มเติมสำหรับการปล่อยก๊าซและสนามแม่เหล็ก
Laser plasma triggering	เป็นวิธีที่ง่ายเชื่อถือ สามารถควบคุมตำแหน่งการทริกซ์เกอร์ได้	แพง, เกิดการเคลือบของฟิล์มบริเวณทางเข้า, บริเวณความหนาแน่นกระแสขึ้นต่ำมีค่าสูง 10^{11} Wm^{-2}
Low-voltage or 'triggerless' vacuum arc initiation	ใช้งานได้มากถึง 10^6 พัลส์ ง่าย อัตราการทำซ้ำเป็นไปได้อย่างสูง สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ	ต้องการอาร์กสวิตช์และแรงดันไฟฟ้า “booster” ปานกลาง อาจไม่สามารถทำงานได้กับวัสดุที่จุดหลอมเหลวต่ำ และเกิดการออกซิไดซ์ของวัสดุแคโทดได้ง่าย

ข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการทริกซ์เกอร์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 กระบวนการที่มีการใช้บ่อยและแพร่หลายที่สุด คือ high-voltage surface discharge เป็นเพราะสามารถกำเนิดการอาร์

ได้อย่างแม่นยำ จำนวนการทริกเกอร์อยู่ในระดับ 10^5 พัลส์ โดยไม่จำเป็นต้องซ่อมบำรุง ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานขนาดใหญ่ จากการทดลองพบว่า กระบวนการอาร์กจะเกิดขึ้นได้ดีถ้าหากพื้นผิวของฉนวนที่คั่นระหว่างขั้วไฟฟ้ามีสมบัตินำไฟฟ้าเล็กน้อย โดยเป็นการค้นพบที่เป็นผลจากการกำเนิดพลาสมาที่มีโลหะเป็นวัสดุแคโทด เมื่ออนุภาคระดับไมโครของโลหะตกสะสมลงบนผิวฉนวน กระบวนการอาร์กจะเกิดได้ดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพของการอาร์กจะลดลงเมื่ออนุภาคโลหะตกสะสมบนผิวฉนวนมากขึ้น จึงเกิดแนวคิดในการแก้ปัญหาด้วยการใช้แกรไฟต์เคลือบผิวฉนวนทำพื้นผิวฉนวนนำไฟฟ้าได้เล็กน้อย สามารถเริ่มกระบวนการอาร์กได้โดยไม่ต้องใช้การทริกเกอร์ จากการทดลองเริ่มการอาร์กโดยอาศัยการเคลือบแกรไฟต์บนผิวของฉนวน พบว่า กระบวนการอาร์กสามารถทำงานได้ในระดับ 10^5 พัลส์ หลังจากนั้นกระบวนการอาร์กจะล้มเหลว เนื่องจากการตกสะสมบนพื้นผิวแกรไฟต์ของวัสดุแคโทด หรือการกัดเซาะชั้นแกรไฟต์จากกระบวนการอาร์ก



รูปที่ 2.6 รูปแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ triggerless vacuum arc initiation อย่างง่าย

รูปแบบของ triggerless vacuum arc initiation อย่างง่าย[23] แสดงดังรูปที่ 2.6 ผิวของฉนวนจะถูกเคลือบด้วยแกรไฟต์เพื่อเป็นสื่อนำไฟฟ้า ทำให้ศักย์ของขั้วแคโทดและแอโนดใกล้เคียงกัน กระบวนการกำเนิดพลาสมาโดยปราศจากขั้วทริกเกอร์เกิดขึ้นได้เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนดประมาณ $5 - 50 \mu\text{m}$ และจะยังคงดำเนินการอาร์กต่อไปได้ถ้าความต้านทานน้อยกว่า $1 \text{ k}\Omega$ และถ้าหากผิวฉนวนเกิดการกัดเซาะความต้านทานจะเพิ่มขึ้นมากกว่า $100 \text{ k}\Omega$ ซึ่งจะทำให้กระบวนการอาร์กล้มเหลว ยกเว้นในวัสดุที่จุดหลอมเหลวต่ำ เช่น Pb ที่จะยังคงเกิดการอาร์กได้ต่อเนื่องถึง 10^5 พัลส์

2.3.2 กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางสามารถจำแนกได้เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) เช่น การเคลือบด้วยไอเชิงเคมีโดยความร้อน (Thermal CVD) การเคลือบด้วยไอเชิงเคมีโดยอาศัยพลาสมา (Plasma-enhanced CVD) เป็นต้น และกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอเชิงกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD) เช่น เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron sputtering) เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงพลังงานกระตุ้นสูง (High power impulse magnetron sputtering: HiPIMS) และเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ[24] เป็นต้น

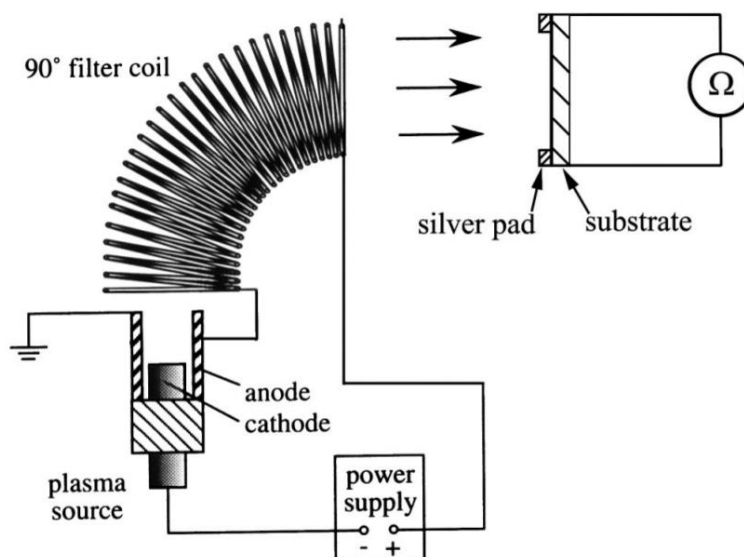
การเคลือบด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ (Filtered Cathodic Vacuum Arc: FCVA) เป็นเทคนิคที่ให้สมบัติของชั้นเคลือบที่ดี เช่น มีความแข็งสูง ค่าสัมประสิทธิ์การยึดตัวและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ[25] โดยเฉพาะการเคลือบฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคอื่น จะได้ค่าความแข็งที่สูงที่สุด ดังตารางที่ 2.3 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการศึกษาผลของพลังงานไอออนต่อคุณสมบัติของชั้นฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชรที่ต้องการสมบัติความแข็ง จึงมุ่งเน้นศึกษาวัดพลังงานของไอออนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนเสมือนเพชรด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 2.3 เปรียบค่าความแข็งของฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชรจากการเคลือบด้วยเทคนิคต่างกัน

Technique	Type of DLC	Hardness (GPa)	Ref.
HiPIMS	nc-TiC/a-C:H	40-45	[26]
FCVA	nc-TiC/a-C:H	66	[27]
Pulsed laser deposition	ta-C	55-65	[28]
Plasma beam source	ta-C:H	60	[21]
Anode layer ion source	[Cr:N]/a-C:H	12-16	[29]
	Cr/a-C:H	8-12	[30]

การเคลือบด้วยเทคนิคคาโทดิกอาร์กเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะสองชนิดอยู่ในระบบสุญญากาศ ซึ่งกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนเกิดขึ้นที่ขั้วคาโทด จึงถูกเรียกว่าคาโทดิกอาร์ก การเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคนี้จะให้พลาสมาที่มีประสิทธิภาพและควบคุมได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือระหว่างกระบวนการอาร์กนั้นจะเกิดอนุภาคที่หลอมเหลวและฟุ้งกระจายออกมา ซึ่งเป็นอนุภาคที่มี

ขนาดระดับไมโครเมตร เรียกว่า อนุภาคแมคโคร หรือ macro particles ซึ่งจะเป็นปัญหาของกระบวนการเคลือบฟิล์ม ได้มีการพัฒนาเทคนิคการเคลือบเพื่อให้สามารถกำจัดอนุภาคขนาดระดับไมโครนี้ออกไป โดยใช้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าตัดโค้ง 90 องศา ทำหน้าที่เป็นตัวกรองอนุภาคและควบคุมลำพลาสมาไปพร้อมกัน ซึ่งขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจะยอมให้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเคลื่อนที่ทะลุผ่านออกไป คงเหลือเพียงไอออนที่ถูกบังคับอยู่ภายในขดลวดก่อนไปตกกระทบลงที่ผิวชิ้นงาน เรียกว่า filtered cathodic vacuum arc, FCVA ดังรูปที่ 2.7



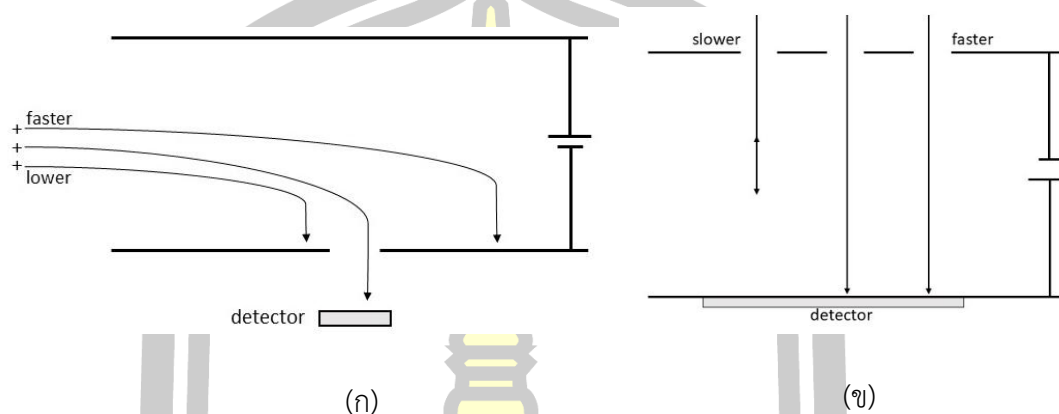
รูปที่ 2.7 แผนภาพเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ[31]

2.4 กระบวนการวัดพลังงานไอออนด้วยเทคนิค retarding field ion energy analysis

จากความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบของพลาสมาและพารามิเตอร์ของพลาสมา นอกจากชนิดและฟลักซ์ของไอออนที่ระดมชนพื้นผิวของชิ้นงาน การกระจายตัวพลังงานของไอออนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาการทำอันตรกิริยาเชิงพื้นผิวและการปรับปรุงสมบัติเชิงผิวด้วยพลาสมา การกระจายพลังงานของไอออน (ion energy distribution function: IEDF) สามารถตรวจวัดได้หลายหลายวิธี ได้แก่ energy selective mass spectrometry[32], time of flight spectrometers (TOF)[33], retarding field ion energy analysis (RFA)[34] และ particle-in-cell/monte Carlo simulation[35] เป็นต้น

หนึ่งในวิธีที่ง่ายที่สุดในการใช้ตรวจวัดการกระจายพลังงานของไอออนคือการใช้หัววัดพลังงานไอออนแบบใช้สนามหน่วง หรือ retarding field ion energy analysis probe (RFA probe)[12]

การวิเคราะห์พลังงานจลน์ของไอออนสามารถทำได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนไอออนไปยังตำแหน่งที่สัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของไอออนและการใช้สนามไฟฟ้ายับยั้งหรือหน่วงไม่ให้ไอออนเคลื่อนที่มาถึงจุดตรวจวัด



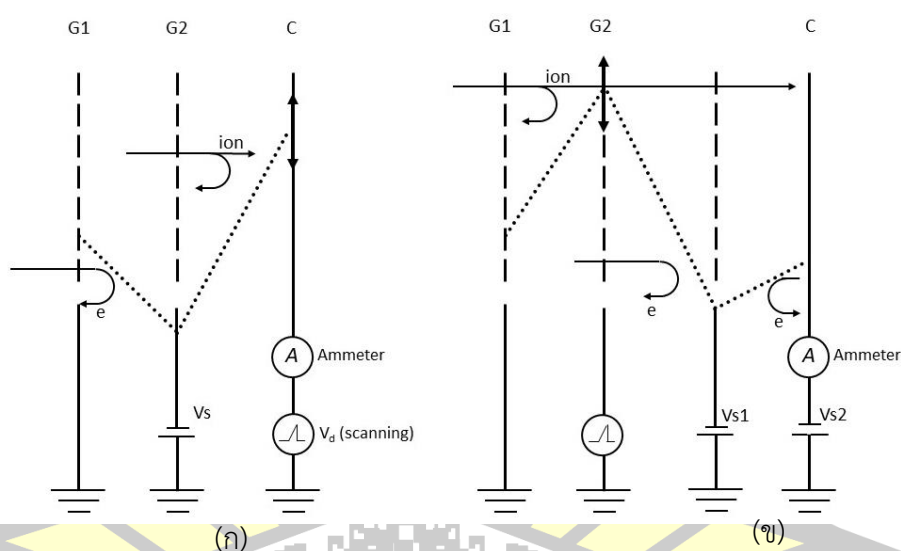
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงแนววิถีของไอออนในหัววัด (ก) แบบเบี่ยงเบน (ข) แบบสนามหน่วง[36]

แผนภาพแสดงแนววิถีของไอออนในหัววัดพลังงานแบบสนามเบี่ยงเบนแสดงในรูปที่ 2.8(ก) ไอออนตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าหัววัดในทิศที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดความเร็วในองค์ประกอบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมา เป็นผลให้ไอออนเบี่ยงเบนไปจากแนวการเคลื่อนที่เดิม ไอออนที่มีความเร็วตั้งต้นที่แตกต่างกันย่อมมีแนววิถีที่แตกต่างกัน หากตรึงให้ส่วนตรวจวัด (detector) อยู่กับที่ ขนาดสนามไฟฟ้าจะเป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้เลือกตรวจไอออนที่มีพลังงานจลน์สอดคล้องกับตำแหน่งของส่วนตรวจวัด สิ่งที่ต้องระวังคือ การชนกันระหว่างไอออนกับอนุภาคใด ๆ ในหัววัดอาจทำให้ไอออนสูญเสียพลังงานจลน์ไปและไม่เป็นไปตามหลักการวัดข้างต้น ดังนั้น ภายในหัววัดจึงต้องอยู่ในสภาวะความดันต่ำมาก ๆ จนทำให้ระยะทางเฉลี่ยปลดการชนมีค่ามากกว่าขนาดภายในหัววัด แนววิถีของไอออนในหัววัดแบบสนามหน่วงเป็นไปตามรูปที่ 2.8(ข) ทิศของสนามไฟฟ้าในหัววัดถูกจัดให้สวนทางกับทิศความเร็วของไอออน เมื่อเคลื่อนตัวเข้าสนามโน้มถ่วง ไอออนจะถูกแรงหน่วงกระทำ เป็นผลให้ความเร็วของไอออนลดต่ำลง ไอออนที่มีพลังงานจลน์เริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานศักย์เนื่องจากสนามหน่วงเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปถึงส่วนตรวจวัด ส่วนไอออนที่มีพลังงานจลน์น้อยกว่าจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงส่วนตรวจวัด โดยทั่วไป หัววัดประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องอยู่ในสภาวะความดันต่ำมาก ๆ เมื่อเทียบกับหัววัดแบบสนามเบี่ยงเบน จึงทำให้มีข้อโดดเด่นในเรื่องต้นทุน การดำเนินการและบำรุงรักษา ในทางปฏิบัติ หัววัดทั้งสองแบบได้ถูกนำไปใช้วัดพลังงานของไอออนในระบบต่าง ๆ [37], [38] ระบบหัววัดพลังงานแบบสนามเบี่ยงเบนซึ่งมีต้นทุนสูงมีความเหมาะสมกับงานวิจัยระดับสูงที่ต้องการความละเอียด ความแม่นยำ อำนาจการแยกแยะพลังงานและความว่องไว

ของสัญญาณข้อมูลสูงสุด ในขณะที่หัววัดแบบสนามหนึ่งมีจุดเด่นในด้านต้นทุนที่ต่ำกว่า มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และบำรุงรักษาได้ง่าย จึงมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นเครื่องมือวินิจฉัยเบื้องต้นในระบบเคลือบฟิล์มบาง

2.4.1 โครงสร้างหัววัดพลังงานของไอออนแบบใช้สนามหนึ่ง

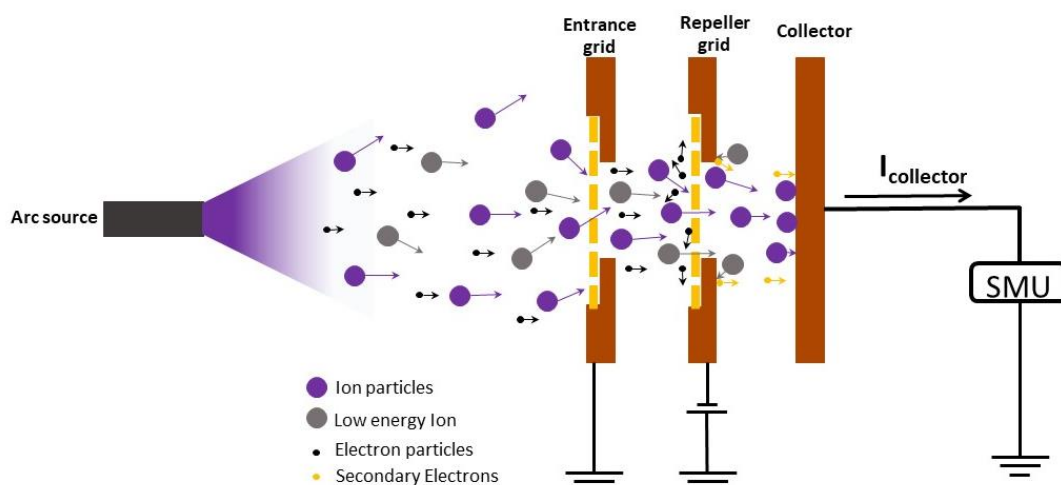
หัววัดพลังงานไอออนประกอบขึ้นจากหัวกริดนำไฟฟ้าและตัวรับไอออนที่วางเรียงกันในลักษณะมีแกนกลางร่วมกัน หน้าหลักของหัวกริดคือการคัดแยกอิเล็กตรอนออกจากไอออน อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ลบ อนุญาตให้ไอออนเท่านั้นสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ ไอออนที่เข้ามาในหัววัดพลังงานไอออนจะถูกตรวจวัดพลังงานจลน์จากการกราดค่าศักย์หนึ่ง ไอออนที่มีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานศักย์หนึ่งเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่มาถึงตัวรับไอออนและถูกวัดเป็นกระแสไอออน ดังนั้น ค่ากระแสไอออนและค่าศักย์หนึ่งจึงเชื่อมโยงถึงฟังก์ชันแจกแจงความเร็วและฟังก์ชันแจกแจงพลังงานจลน์ของไอออน



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมหัววัดพลังงานไอออน (ก) โหมดปกติ (ข) โหมดแบบตัวกรอง

หัววัดพลังงานไอออนมีโหมดการทำงานอยู่สองโหมด คือ โหมดแบบปกติ (normal mode) และโหมดแบบตัวกรอง (filter mode) ในโหมดแบบปกติ การไบอัสศักย์หนึ่งจะเกิดขึ้นที่ตัวรับไอออน ในขณะที่โหมดแบบตัวกรอง การไบอัสศักย์หนึ่งจะเกิดขึ้นที่หัวกริดที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของตัวรับไอออน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9(ก) และ(ข) สังเกตว่า สำหรับโหมดปกติ บริเวณสนามหนึ่งที่ใช้คัดเลือกไอออนคือบริเวณระหว่างหัวกริด G2 และตัวรับไอออน C แต่สำหรับโหมดแบบตัวกรอง บริเวณสนามหนึ่งคือบริเวณระหว่างหัวกริด G1 และหัวกริด G2 เมื่อเปรียบเทียบกับ

หัววัดพลังงานไอออนในโหมดแบบตัวกรองให้สัญญาณกระแสไอออนน้อยกว่า เนื่องจากจำเป็นต้องเพิ่มขั้วกริดอีกขั้วหนึ่งเพื่อใช้ยับยั้งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจากอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับขั้วรับไอออน[36] หัววัดพลังงานไอออนในโหมดแบบตัวกรองจึงจำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่รับไอออนเพื่อเพิ่มสัญญาณกระแสไอออน ทำให้หัววัดมีขนาดใหญ่และทำให้มีข้อจำกัดในการตรวจวัดพารามิเตอร์ของไอออนตามตำแหน่งการวัดและมุมการวัด (spatially and angularly resolved measurement) ในขณะที่หัววัดพลังงานไอออนในโหมดแบบปกติใช้จำนวนขั้วกริดน้อยกว่าทำให้สามารถออกแบบให้หัววัดมีขนาดเล็กได้โดยไม่ลดทอนสัญญาณกระแสไอออน ซึ่งทำให้เหมาะต่อการนำไปใช้ตรวจพารามิเตอร์ของไอออนตามตำแหน่งและมุมการวัด



รูปที่ 2.10 หลักการวัดพลังงานไอออนของหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วงโหมดปกติ

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วงในโหมดแบบปกติยังมีข้อด้อยหลัก คือ การรบกวนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจากขั้วกริด G2 อิเล็กตรอนทุติยภูมิดังกล่าวเกิดจากไอออนที่สะท้อนกลับเนื่องจากสนามหน่วง และเกิดการชนกับขั้วกริด G2 อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจากขั้วกริด G2 จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วรับไอออนเกิดเป็นสัญญาณแฝง และส่งผลต่อความแม่นยำของการวัดฟังก์ชันการแจกแจงความเร็วและพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ของไอออน

2.4.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบหัววัดพลังงานไอออน

การสร้างหัววัดพลังงานไอออนมีข้อพิจารณาสำคัญอยู่ 2 ประการ[39] คือ

1. ช่องว่างของขั้วกริดที่อยู่ด้านนอกสุดต้องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นเดอบาย (Debye length) เพื่อป้องกันการทะลุผ่านของพลาสมา และเพื่อสร้างสมมติฐานว่าโครงสร้างของพลาสมาซีทบริเวณขั้วกริดเป็นแบบเรียบ

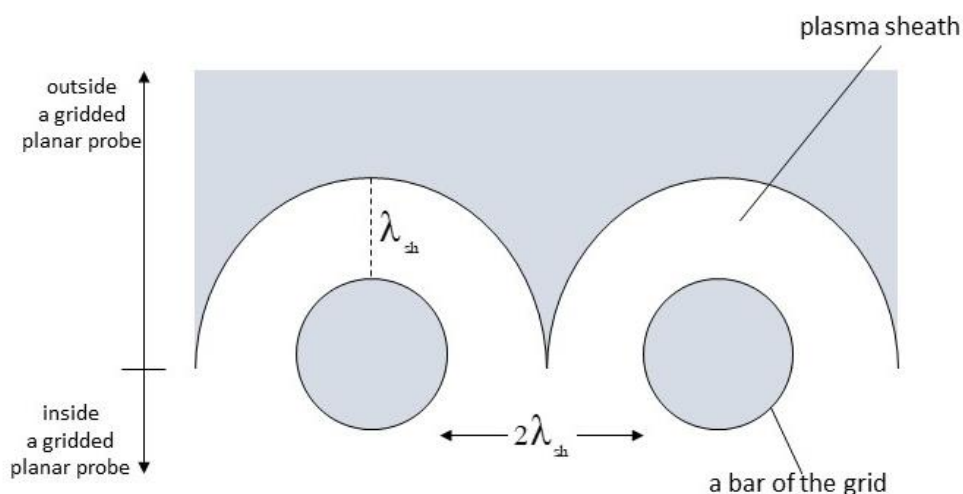
2. ระยะห่างระหว่างขั้วกริดถึงขั้วรับประจุ (grid-to-collector distance) ต้องมีระยะทางที่สั้นกว่าระยะทางเฉลี่ยปลดการชนของการแตกตัวอะตอมที่ถูกชนโดยอิเล็กตรอน (mean free path of electron ionization collisions)

โดยทั่วไปพลาสมาซีทที่อยู่บริเวณหน้าหัววัดมีลักษณะแบนเรียบ ความหนา λ_{sh} ก่อตัวอยู่อย่างใกล้ชิดกับหัววัด ถ้าช่องว่างกริดมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต (critical value : $2\lambda_{sh}$) เป็นผลให้พลาสมาเกิดการทะลุผ่าน ซึ่งอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.11 จากภาพพลาสมาซีทที่มีความหนา λ_{sh} การทะลุผ่านของพลาสมาจะไม่สามารถป้องกันได้ ถ้าช่องว่างกริดมีค่ามากกว่า $2\lambda_{sh}$ อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบเรียบของพลาสมาซีท ขนาดของช่องว่างกริดควรที่จะมีค่าน้อยกว่า $2\lambda_{sh}$ ซึ่งในการคำนวณหาความยาวคลื่นเดอบายด์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2.9)

$$\lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}} \quad (2.9)$$

เมื่อ ϵ_0 คือเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ $8.854 \times 10^{-12} \text{ (C}^2/\text{Nm}^2\text{)}$, e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, n_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในหน่วยต่อลูกบาศก์เมตร (m^{-3}) เงื่อนไขที่ต้องพิจารณาอีกประการ คือ ระยะระหว่างขั้วกริดถึงขั้วรับประจุต้องมีขนาดที่สั้นกว่าระยะทางเฉลี่ยก่อนชนของการแตกตัวอะตอมที่ถูกชนโดยอิเล็กตรอน (λ_e) ภายในหัววัดแบบเรียบชนิดมีกริด ดังสมการที่ (2.10) เมื่อแทนค่าลงในสมการ ระยะระหว่างขั้วกริด G ถึงขั้วรับประจุ C ต้องมีขนาดสั้นกว่า 33 mm ซึ่งระยะระหว่างขั้วกริด G ถึงขั้วรับประจุ C มีขนาด (L_{GC}) 2 mm ดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ซึ่งสั้นกว่าระยะทางเฉลี่ยก่อนชน ตรงตามเงื่อนไขในการพิจารณาสร้างหัววัดชนิดนี้

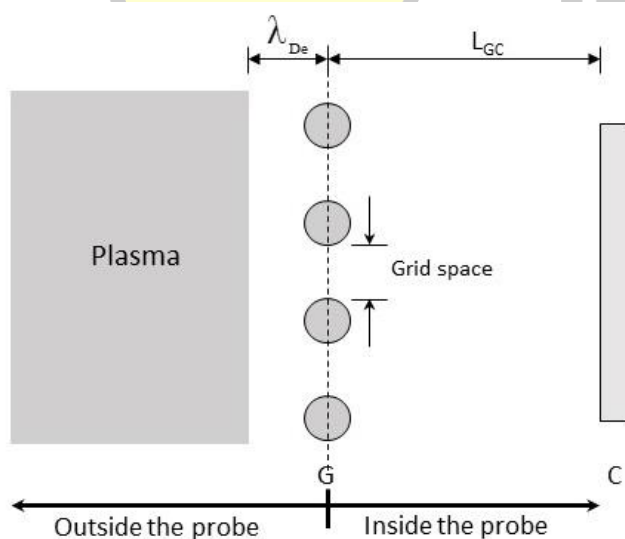
พูน บณ สิโรต ชีเว



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดงค่าวิกฤตของกริดในหัววัดพลังงานไอออน[40]

$$\lambda_{ie} = \frac{1}{n_g \sigma} \quad (2.10)$$

เมื่อ n_g คือ ความหนาแน่นอะตอมของอาร์กอน (neutral density) $7.97 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ที่ความดัน 3.3 Pa, σ คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของการชนกันระหว่างอะตอมของแก๊สอาร์กอนและอิเล็กตรอนพลังงานสูง มีค่าเท่ากับ $3.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2$



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมแสดงค่าความหนาของพลาสมาชีท (λ_{sh}) และระยะทางเฉลี่ยก่อนชนของการแตกตัวอะตอมที่ถูกชนโดยอิเล็กตรอน (λ_{ie}) [40]

2.5 กระบวนการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบาง

2.5.1 เทคนิค X-ray reflectometry

เทคนิคการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ (X-ray reflectometry, XRR) เป็นเทคนิคเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่ให้ข้อมูลความหนา ความหนาแน่นของชั้นฟิล์ม และความขรุขระของผิวฟิล์ม เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งโดยปกติแล้วเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาทำมุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดสัญญาณ (detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารแต่ละชนิดจะมีมุมในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะทางโครงสร้างผลึก ซึ่งผลที่ได้จะสามารถบ่งชี้ชนิดของสาร ธาตุ ที่ประกอบอยู่ภายในสารตัวอย่าง ทำให้เทคนิค XRD ถูกนำมาศึกษารายละเอียดเชิงโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น เทคนิค XRR เป็นการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นฟิล์ม (thin layered structures) พื้นผิว (surfaces) และลักษณะของรอยต่อ (interface) ของชั้นฟิล์ม โดยการใช้ผลของการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของรังสีเอ็กซ์ (total external reflection of X-ray) ผ่านชั้นฟิล์ม ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ทั้งแบบฟิล์มชั้นเดียว (single layer structure) และฟิล์มบางหลายชั้น (multilayer structure) ดังนั้น การวัดการสะท้อนรังสีเอ็กซ์จึงต้องทำในช่วงมุมตกกระทบน้อย ๆ ใกล้มุมวิกฤต (Grazing incidence angles) โดยที่มุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต รังสีเอ็กซ์จะสามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์มในความลึกระดับนาโนเมตร ในขณะที่ถ้าหากมุมกระทบมากกว่ามุมวิกฤต ระดับความลึกที่รังสีเอ็กซ์ทะลุผ่านชั้นฟิล์มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนออกมาลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน รังสีเอ็กซ์ส่วนหนึ่งจะมีการสะท้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลง ลำรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนบริเวณรอยต่อและผิวฟิล์มจะเกิดการแทรกสอดกันทำให้เห็นริ้วรอยการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างเกิดเป็นรูปแบบการสั่น (oscillation pattern) หรือ fringe interference pattern โดยที่มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์เพิ่มขึ้นความเข้มของลำรังสีเอ็กซ์ที่เกิดการสะท้อนออกมาในรูปแบบการสั่นจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยลักษณะการตีความ fringe interference pattern จะแยกออกเป็น 3 ส่วนตามลักษณะเฉพาะของฟิล์ม ดังรูปที่ 2.13

1. ค่ามุมวิกฤต (critical angle) คือส่วนของมุมวิกฤตของการลดลงช่วงแรกของรูปแบบการสั่น จะแสดงความสัมพันธ์ถึงความหนาแน่นของฟิล์มชั้นบนสุด (density) ซึ่งเป็นชั้นแรกที่ถูกตรวจวัด

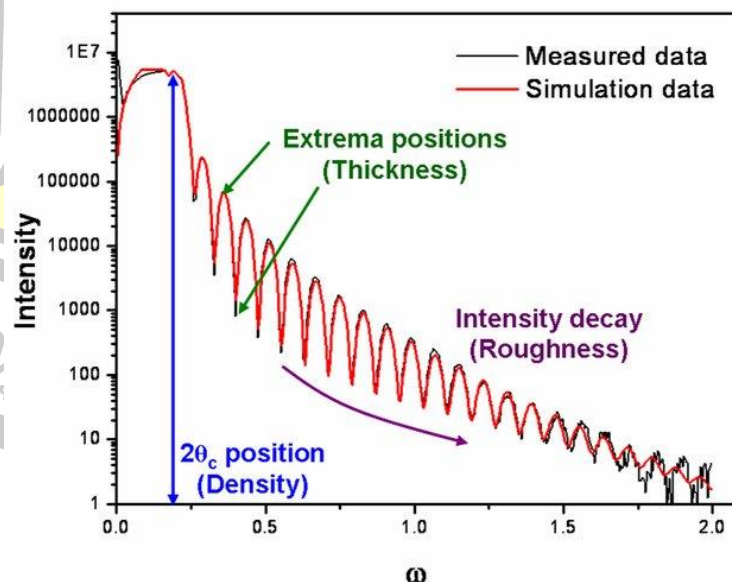
2. คาบการสั่น (oscillation period or distance of oscillation) ลักษณะคาบของการสั่น โดยการพิจารณาจากสันคลื่นถึงสันคลื่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาของฟิล์ม (thickness)

3. แอมพลิจูดของการสั่น (oscillation amplitude) และความชันของการลดลงของความเข้มรังสีเอ็กซ์ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความขรุขระของผิวฟิล์ม (surface roughness)

ในขณะที่ส่วนที่เรียกว่า ลักษณะที่ราบ (plateau) ตรงช่วงมุมเริ่มต้นของรูปแบบการสั่นจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ขนาดของชิ้นงาน ความเรียบ การดูดกลืน และลักษณะเฉพาะของเครื่องมือ ดังนั้น ในกระบวนการสร้างแบบจำลองรูปแบบการสั่นเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของฟิล์ม จำเป็นต้องเลือกใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสม การตีความข้อมูลมีการปรับเปลี่ยนตามสมการของแบรกก์ (Bragg equation) ดังสมการที่ (2.11)

$$2t\sqrt{\sin^2(a_i) - \sin^2(a_c)} = m\lambda \quad (2.11)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ t คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม a_c คือ ค่ามุมวิกฤต a_i คือ ค่ามุมเริ่มต้นที่สังเกตเห็นรูปแบบการสั่น (fringe) ดังนั้นเทอม $\sqrt{\sin^2(a_i) - \sin^2(a_c)}$ จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นของฟิล์ม m คือจำนวนของรูปแบบการสั่น (fringe) ที่วัดได้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความหนาของฟิล์ม

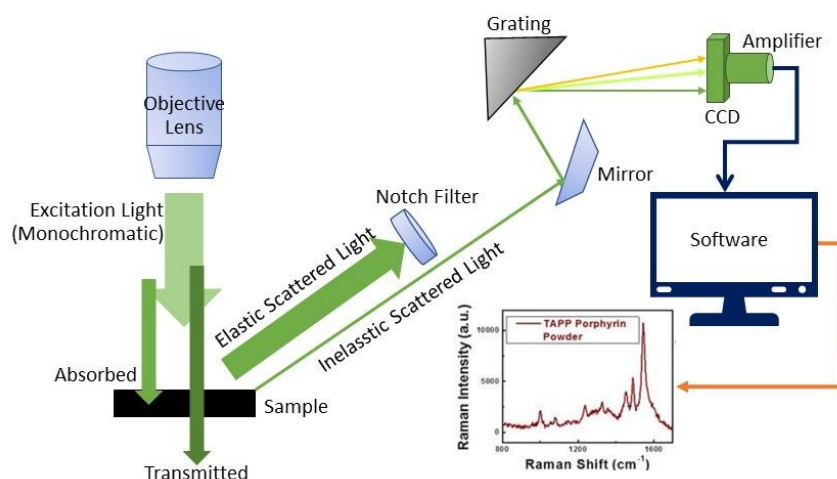


รูปที่ 2.13 แสดงแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิค XRR

2.5.2 เทคนิค Raman spectroscopy

รามานสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยมในการศึกษาข้อมูลเชิงโครงสร้างและสมบัติของส่วนประกอบพื้นฐานที่มีการเปลี่ยนแปลงของโพราไรเซชัน โดยการฉายรังสีให้กับชิ้นงานด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ที่หนาแน่นของก๊าซอาร์กอนหรือฮีเลียม ส่งผลให้ชิ้นงานเปล่งรังสีออกมา 3 ชนิด คือ Stokes scattering, Anti-stokes scattering และ Rayleigh scattering ซึ่งถูกบังคับผ่านเลนส์และมีตัววิเคราะห์ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณที่ผ่านมา ซึ่งเป็นสัญญาณของ Stokes และ Anti-stokes scattering (Raman inelastic) และสุดท้ายจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณออกมาในรูปแบบสเปกตรัม ดังแผนภาพแสดงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี ในรูปที่ 2.14

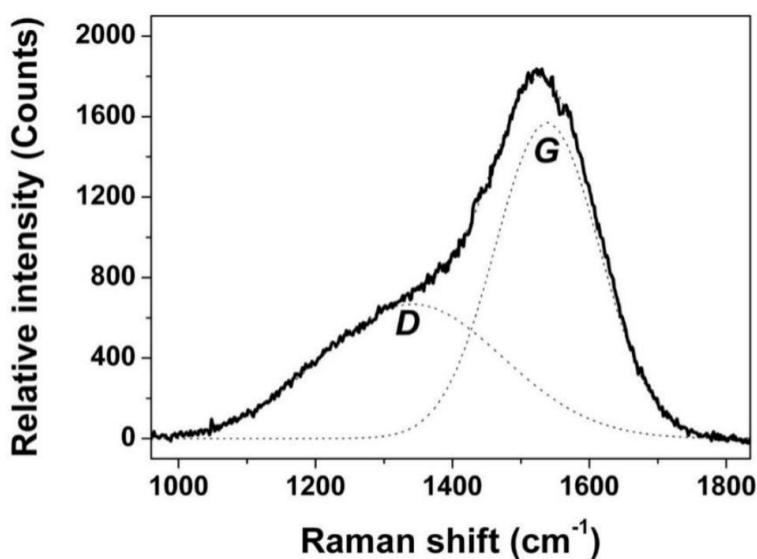
Raman Spectroscopy



รูปที่ 2.14 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี ดัดแปลงจาก [41]

การทดสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปีอาศัยการชนกันของอะตอมที่อาจเป็นกรณีของโปรตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุลหรือสูญเสียพลังงานให้กับโมเลกุล กระบวนการนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ซึ่งการสั่นสะเทือนจากการชนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพราไรเซชันขึ้นภายในโมเลกุล โดยโพราไรเซชันของโมเลกุลที่ถูกเปลี่ยนไประหว่างการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจะส่งผลต่อรามานสเปกตรัมด้วย ดังนั้น โมเลกุลที่ทำให้แสงโมโนโครมาติก (Monochromatic) หรือเลเซอร์ที่ฉายเข้ามาเกิดการกระเจิงแล้วทำให้เกิดรามานสเปกตรัมได้ โมเลกุลของสารนั้นจะต้องเกิดการสั่นและทำให้โพราไรเซชันของสารเปลี่ยนไปด้วย โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การวิเคราะห์มีกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก ที่สำคัญตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์สามารถใช้ในปริมาณน้อยขนาดพิโคกรัม ซึ่งเส้นสเปกตรัมรามานแสดง

สัญญาณการสั่นที่จำเพาะของตัวอย่างที่ถูกวัดค่าพลังงานของการกระเจิงแสง ด้วยลักษณะเช่นนี้จึงเป็นประโยชน์ในการจำแนกสารที่ไม่ทราบค่า โดยรามานสเปกโตรสโกปีมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ เช่น พิล์มคาร์บอนเสมือนเพชร ผลการวิเคราะห์เป็นดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.15 จากสเปกตรัมรามานของชั้นเคลือบฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชร เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของคาร์บอน ความแตกต่างของพันธะจะถูกแยกแยะด้วยความถี่รามาน แม้ว่าฟิล์มคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะ C-C ทั้งหมด แต่ในกรณีคาร์บอนที่อยู่ในรูปของเพชร จะประกอบด้วยพันธะ C-C ที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอสูง และมีโครงสร้างผลึกแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) ความถี่รามานจะมีเพียงแถบพลังงานเดี่ยวที่ตำแหน่งพิก 1332 cm^{-1} หรือพีคดี (disorder graphitic peak: D-peak) สเปกตรัมของแกรไฟต์มีคลื่นหลายแถบพลังงานและมีแถบพลังงานหลักอยู่ที่ตำแหน่ง 1582 cm^{-1} หรือพีคจี (graphitic peak: G-peak) เนื่องจากแกรไฟต์ประกอบด้วยคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 ในแนวระนาบ ซึ่งพลังงานพันธะของ sp^2 สูงกว่าพันธะ sp^3 ของเพชร พลังงานที่มากขึ้นของพันธะ sp^2 ในแกรไฟต์จะผลึกความถี่การสั่นสะท้อนของพันธะและความถี่ของแถบสเปกตรัมรามานให้มีความถี่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปีจึงมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชร



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมรามานของการวิเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชรที่เคลือบด้วยเทคนิค PECVD บนคาร์บอนไนไตรต์ [42]

2.5.3 เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy

เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงพื้นผิวที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง ใช้แสงในย่าน soft X-ray เพื่อกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนและเน้นที่การวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด (core electron) เนื่องจากค่าพลังงานดังกล่าวเป็นค่าเฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุ และขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของอะตอมนั้น [43] การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าวจึงสามารถระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นผิวได้หลากหลายชนิด เช่น โลหะ แก้ว เซรามิกส์ พลาสติก และสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

เทคนิค XPS อาศัยหลักของการอนุรักษ์พลังงาน คือ พลังงานแสงที่กระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอน ($h\nu$) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน (E_k) ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (binding energy, E_B) และค่าพลังงานที่โฟโตอิเล็กตรอนใช้ในการที่จะหลุดออกจากผิววัสดุหรือเวิร์คฟังก์ชัน (work function, ϕ)

$$h\nu = E_k + E_B + \phi \quad (2.12)$$

เมื่อ $h\nu$ เป็นค่าคงที่ที่ทราบค่า และเมื่อมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างสารตัวอย่างกับเครื่องมือวัด ค่า ϕ คือค่าเวิร์คฟังก์ชันของเครื่องมือวัดพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนซึ่งเป็นค่าเฉพาะของเครื่องมือวัดแต่ละระบบ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวซึ่งเป็นค่าเฉพาะของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นพลังงานของอะตอมธาตุแต่ละธาตุและบ่งบอกชนิดของอะตอมและปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวดังกล่าว ดังนั้น จึงบ่งบอกถึงปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างนั้น

สเปกตรัม XPS ได้จากการฉายรังสีลงบนวัสดุด้วยลำรังสีเอกซ์ ซึ่งในขณะเดียวกันก็วัดพลังงานจลน์และจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิววัสดุในช่วง 0 ถึง 10 nm ของวัสดุที่กำลังถูกวิเคราะห์ โดยทั่วไปสเปกตรัม XPS แกนตั้งคือจำนวนอิเล็กตรอนที่ตรวจพบ (บางครั้งต่อหน่วยเวลา) เทียบกับแกนนอน คือพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนที่ถูกตรวจพบ แต่ละธาตุจะมีสเปกตรัม XPS และพลังงานยึดเหนี่ยวแบบเฉพาะซึ่งสามารถระบุองค์ประกอบที่อยู่ในหรือบนพื้นผิววัสดุที่ถูกวิเคราะห์ได้โดยตรง ลักษณะของสเปกตรัมเหล่านี้สอดคล้องกับองค์ประกอบของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอม เช่น 1s, 2s, 2p, และ 3s เป็นต้น จำนวนอิเล็กตรอนที่ตรวจพบในแต่ละพีคจะสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนธาตุภายในตัวอย่าง ในการสร้างค่าเปอร์เซ็นต์อะตอมจะต้องแก้ไขสัญญาณ XPS ที่

ได้มา โดยการหาความเข้มของสัญญาณ (จำนวนอิเล็กตรอนที่ตรวจพบ) โดยใช้ “ค่าความไวสัมพัทธ์ (RSF)” และจะเป็นค่ามาตรฐานสำหรับทุกธาตุที่ตรวจพบ เนื่องจากไฮโดรเจนไม่ถูกตรวจวัด เปอร์เซ็นต์อะตอมเหล่านี้จึงไม่มีไฮโดรเจน

ในการนับจำนวนอิเล็กตรอนในระหว่างการได้รับคลื่นความถี่ที่มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด เครื่องตรวจจับ XPS ต้องทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศสูงเป็นพิเศษ เนื่องจากเครื่องตรวจจับอิเล็กตรอนในเครื่อง XPS โดยทั่วไปจะอยู่ห่างจากวัสดุที่ถูกฉายรังสี X-ray จึงต้องอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ultra-high vacuum; pressure $<10^{-9}$ mbar)

การตอบสนองต่อพื้นผิว

โดยปกติเทคนิค XPS จะตรวจจับเฉพาะอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากตัวอย่างเข้าสู่สุญญากาศของเครื่องและมีพลังงานสามารถเดินทางไปถึงเครื่องตรวจวัด โฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาสามารถเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น เกิดการรวมตัวกันใหม่ การกระตุ้นตัวอย่าง การย้อนกลับ การถูกดักจับในสถานะถูกกระตุ้นต่าง ๆ ภายในวัสดุ ซึ่งเหตุการณ์ทั้งหมดเหล่านี้สามารถลดจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาได้ ผลกระทบเหล่านี้จะปรากฏเป็นฟังก์ชันการลดทอนเชิงตัวเลข เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณที่ตรวจพบอะตอมสารที่ผิวหน้ามากกว่าสัญญาณที่ตรวจพบจากตัวอย่างที่ได้รับการวิเคราะห์บริเวณใต้ผิวตัวอย่าง ดังนั้น สัญญาณที่วัดได้โดย XPS คือสัญญาณที่มีการถ่วงน้ำหนักแบบเลขยกกำลังและความเป็นจริงนี้สามารถใช้เพื่อประเมินความลึกของวัสดุตัวอย่างได้

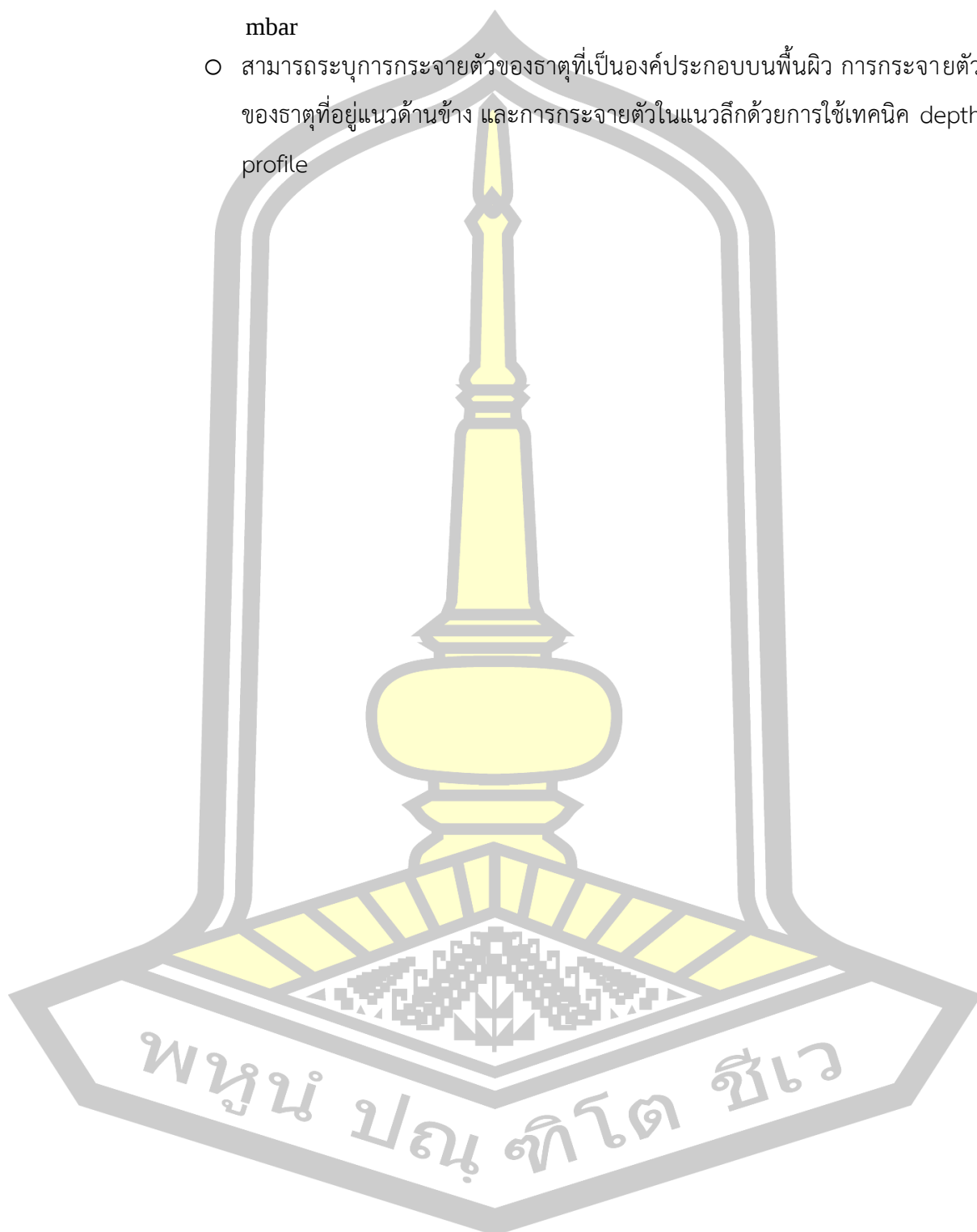
ข้อมูลและลักษณะเฉพาะของเทคนิค XPS

- สามารถระบุชนิดของธาตุตั้งแต่ Li ถึง U ที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่าง
- สามารถระบุสถานะทางเคมีของตัวอย่างได้ เช่น สถานะของการเกิดออกซิเดชันหรือพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง
- สามารถระบุสัดส่วนของธาตุเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับธาตุอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง
- เป็นเทคนิคที่วัดคุณสมบัติของตัวอย่างในระดับพื้นผิวที่ตรวจวัดความลึกอยู่ในระดับ $5 - 100 \text{ \AA}$ เหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง
- เทคนิคนี้หลังจากกระบวนการตรวจวัดจะไม่ทำลายตัวอย่าง
- สามารถตรวจวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อย หรือความเข้มข้นต่ำในระดับร้อยละ 0.1 (parts per thousand rang)

- กระบวนการตรวจวัดเกิดขึ้นภายใต้ระบบสุญญากาศความดันต่ำในระดับ 10^{-9}

mbar

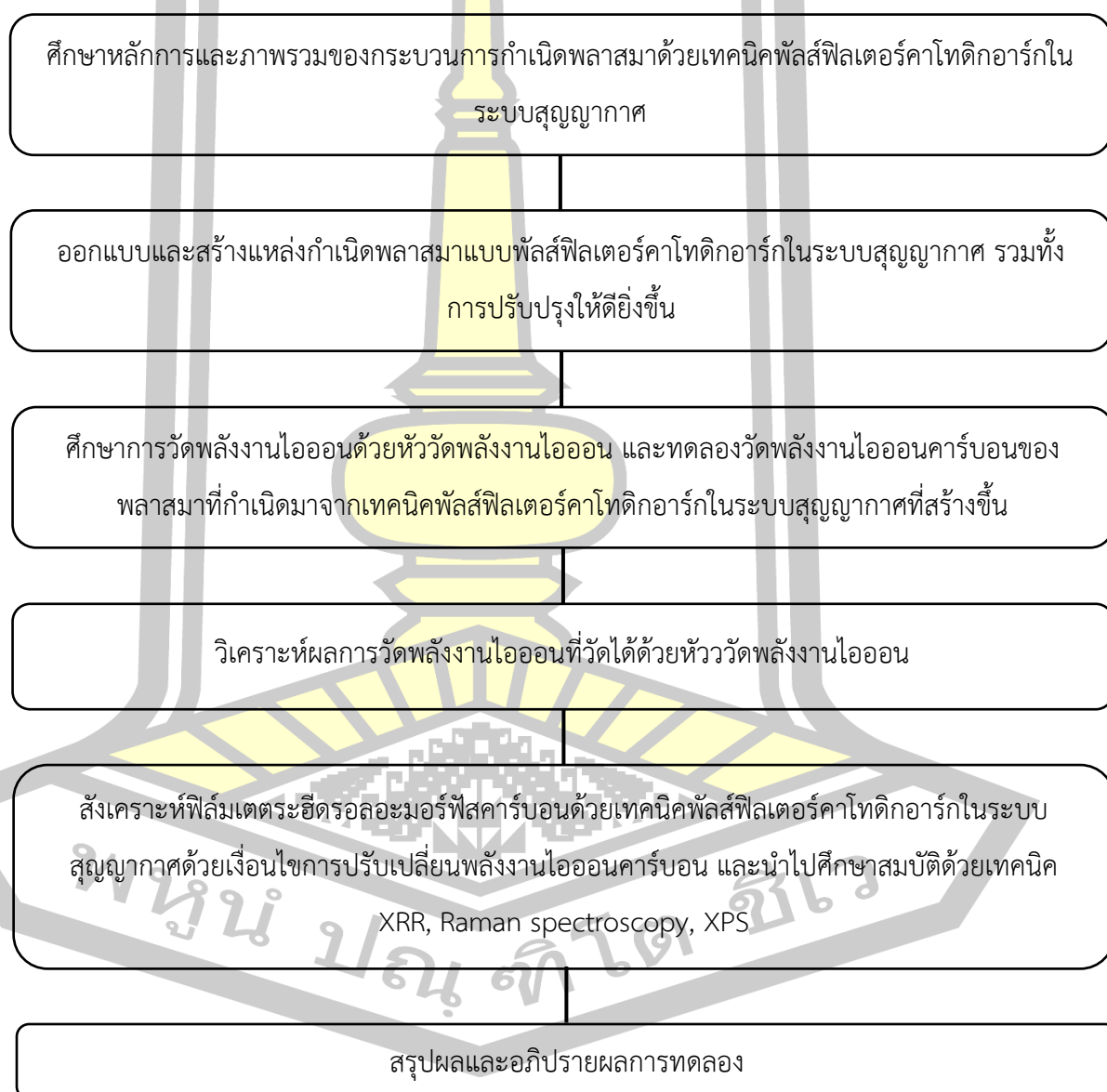
- สามารถระบุการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิว การกระจายตัวของธาตุที่อยู่แนวด้านข้าง และการกระจายตัวในแนวลึกด้วยการใช้เทคนิค depth profile



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนของพลาสมาที่กำเนิดมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ รายละเอียดของการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง กระบวนการวัดพลังงาน กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง รวมไปถึงกระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม ทั้งหมดนี้จะถูกอธิบายในบทนี้ กระบวนการดำเนินการวิจัยได้ดำเนินการเป็นลำดับ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

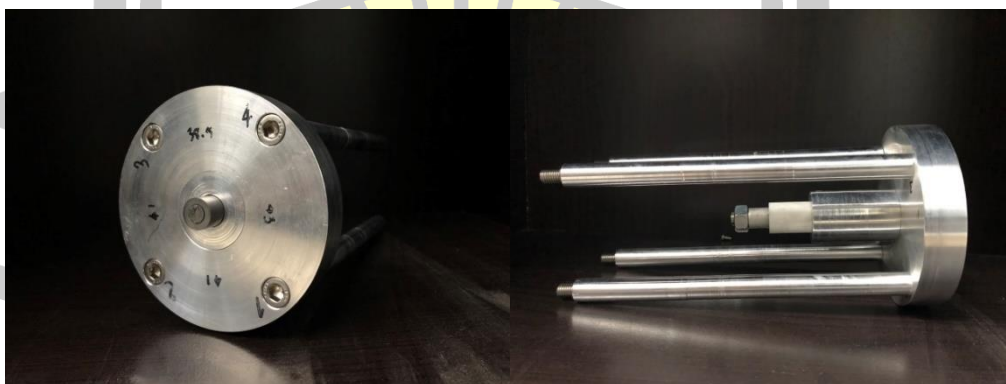
3.1 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

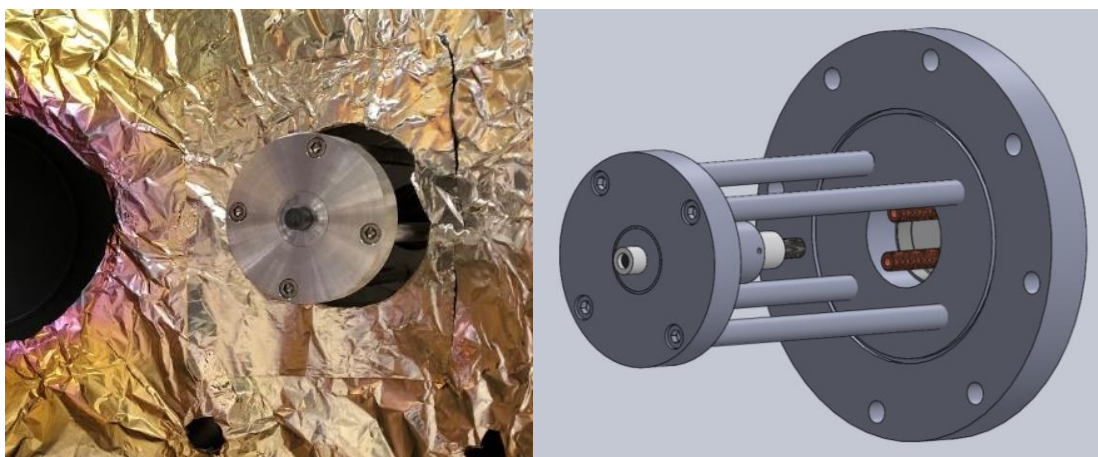
3.1.1 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

แหล่งกำเนิดพลาสมาในระบบฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ (Arc source) ถูกศึกษาและออกแบบภายใต้แนวคิดของโครงสร้างแบบปราศจากข้อผิดพลาด (triggerless of arc source) ของ A. Anders และคณะ แหล่งกำเนิดพลาสมารูปแบบเริ่มต้นที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

- ขั้วแคโทด เป็นแท่งแกรไฟต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 mm ความบริสุทธิ์ 99.997% ถูกใช้เป็นวัสดุขั้วแคโทดในกระบวนการกำเนิดไอออนคาร์บอน อีกทั้งประกอบด้วยส่วนจับยึดแท่งแกรไฟต์ที่ขึ้นรูปจากสแตนเลส
- ขั้วแอโนด ขึ้นรูปจากวัสดุอะลูมิเนียม เป็นแผ่นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 86 mm หนา 15 mm เจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm สำหรับใส่ขั้วแคโทด
- ฉนวน ระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนดจะถูกคั่นด้วยฉนวนที่ขึ้นรูปจากเซรามิกส์อลูมินา 99.5% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm จากนั้นผิวของเซรามิกส์จะถูกฉนวนด้วยดินสอให้พื้นผิวของเซรามิกส์มีความต้านทานต่ำกว่า 500 Ω

ส่วนประกอบทั้งสามส่วนถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน จากนั้นถูกนำไปติดตั้งในระบบสุญญากาศเพื่อทดลองเริ่มต้นการกำเนิดพลาสมา แสดงดังรูปที่ 3.2

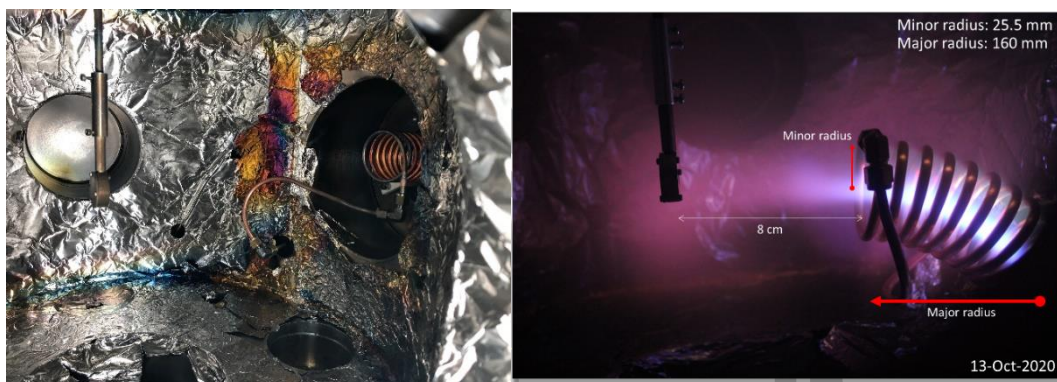




รูปที่ 3.2 แผนภาพแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์ก รูปแบบที่ 1

แหล่งกำเนิดพลาสมาในรูปแบบเริ่มต้น ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีขึ้นด้วยการเพิ่มระบบหล่อเย็นเพื่อให้กระบวนการอาร์กสามารถใช้งานได้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน อีกทั้งยังเพิ่มขดลวดทองแดงเพื่อทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนลำพลาสมาและกรองอนุภาคระดับไมโครเมตรที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอาร์ก ขดลวดทองแดงขึ้นรูปจากเส้นลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 mm นำมาขึ้นรูปและติดตั้งเข้ากับหัวแอโนด ขดลวดมีรัศมีความโค้งภายใน (minor radius) เท่ากับ 25.5 mm และรัศมีความโค้งของการเบี่ยงเบน (major radius) เท่ากับ 160 mm แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์กแบบที่ถูกพัฒนาเป็นรูปแบบปัจจุบันที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3

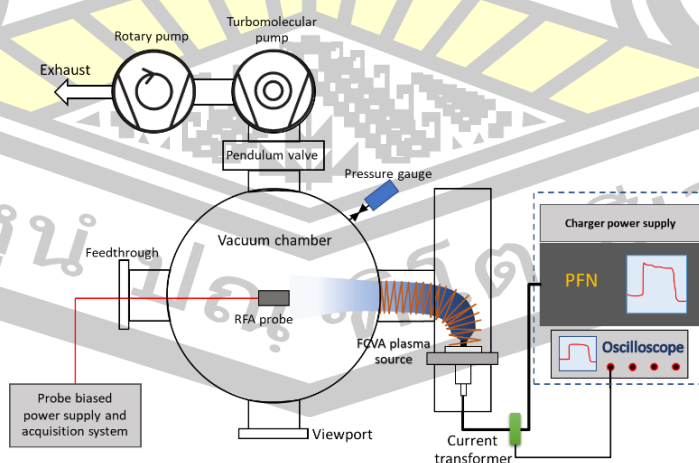




รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์กแบบมีขดลวดตัวกรอง (FCVA) รูปแบบปัจจุบัน

3.1.2 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศขึ้นรูปจากท่อสแตนเลส 304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm สูง 50 cm ปัมกลโรตารีและเทอร์โบโมเลกุลาร์ปั๊มถูกใช้เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศที่มีความดันฐานเท่ากับ 10^{-6} torr หรือ 10^{-4} Pa วาล์วเพนดูลัมถูกติดตั้งไว้ระหว่างห้องสุญญากาศกับปั๊มเทอร์โบ เพื่อทำหน้าที่ปรับแต่งความดันภายในระบบสุญญากาศ เกจวัดความดันที่ติดตั้งบริเวณด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ ประกอบด้วยเกจ 2 ชนิด คือ เกจวัดความดันช่วงกว้าง (wide-range gauge) ที่สามารถวัดความดันอยู่ในช่วง 10^{-10} torr ถึงความดันบรรยากาศ และคาปาซิแตนซ์เกจ (capacitance gauge) หน้าที่ตรวจวัดความดันในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ในกระบวนการที่จำเป็นต้องใช้แก๊สอาร์กอน แก๊สอาร์กอนจะถูกควบคุมจากเครื่องควบคุมอัตราการไหล (mass-flow controller) แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบสุญญากาศรวมถึงแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์ก แสดงดังรูปที่ 3.4

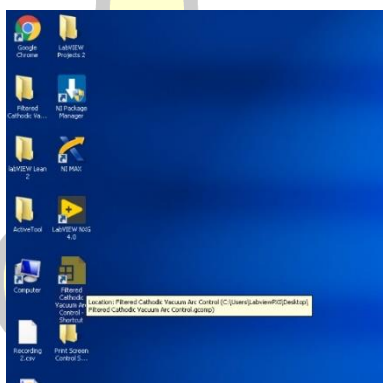


รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแสดงระบบสุญญากาศของแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิค FCVA

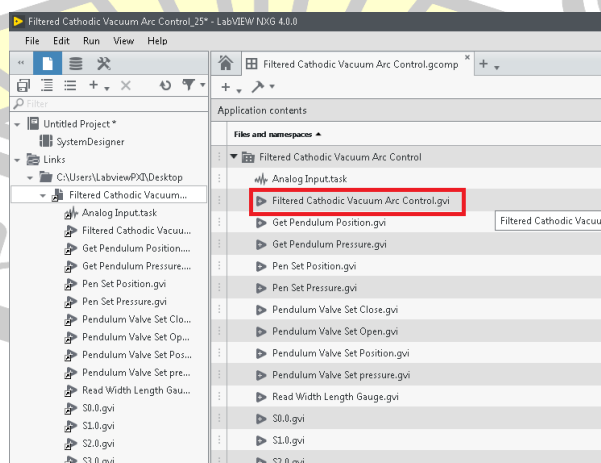
3.1.3 ขั้นตอนการเดินระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังหัวข้อที่ผ่านมา อุปกรณ์ส่วนใหญ่จะถูกควบคุมด้วยไฟฟ้าผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้น ในการเริ่มต้นการเดินระบบสุญญากาศจะมีขั้นตอนดังนี้

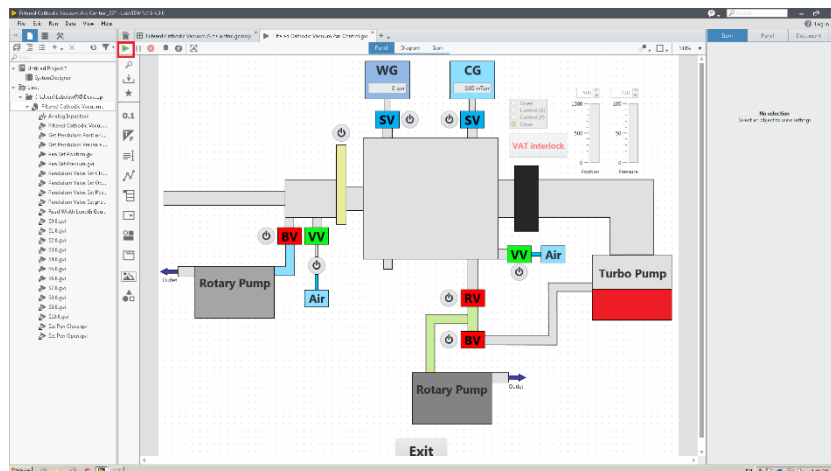
1. เช็ควิตซ์ไฟด้านหลังแล็ปให้ยู่ตำแหน่ง ON
2. เปิด 24 V DC Power Supply [จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับ Pendulum Valve, Width length gauge, Gate valve และ Solenoid valve ทุกตัว]
3. เปิด 15 V DC power supply ที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับ Mass flow controller
4. เปิด PXI และหน้าจอคอมพิวเตอร์
5. เปิดสวิตซ์ไฟ 110 V ที่ตู้ควบคุมระบบไฟห้องแลป เพื่อจ่ายไฟให้กับ Pinnacle power supply
6. เปิดโปรแกรมควบคุมที่ icon “Filtered Cathodic Vacuum Arc”



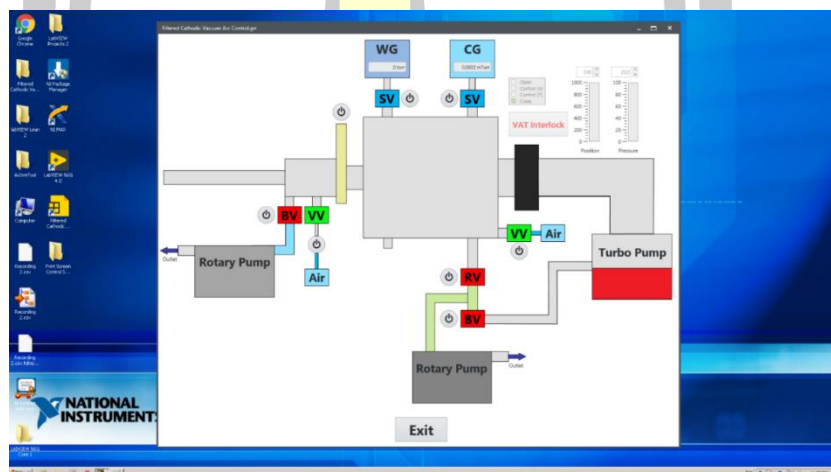
7. คลิกเลือกโปรแกรมควบคุมที่ “Filtered Cathodic Vacuum Arc Control”



8. จะปรากฏหน้าจอของโปรแกรมขึ้นมา ดังภาพ จากนั้นคลิก Run โปรแกรม

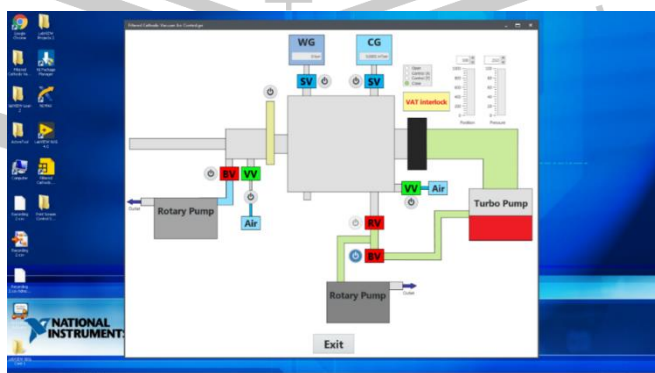


9. หลังจากคลิก Run จะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรมที่พร้อมใช้งาน



10. ปิด Leak valve [VV] และปิดจุกล็อคด้านนอกให้เรียบร้อย

11. เมื่อเริ่มเปิดระบบในตอนแรกที turbo pump ปิดอยู่ จะทำการสูบลอากาศออกจาก Rotary pump ผ่าน BV ดังนั้น กด VAT Interlock เพื่อให้สามารถควบคุม Pendulum valve ได้



12. กด Open เพื่อเปิด Pendulum valve
13. กด BV และค่อยๆเปิด manual valve เพื่อสูบลู่อากาศออกด้วย Rotary pump
14. รอ 5 นาที และกดเปิด WG เพื่ออ่านความดัน ในขั้นตอนนี้เราจะรอให้ความดันภายในระบบลดลงไปอยู่ที่ประมาณ 6×10^{-2} torr
15. เช็กระบบน้ำหล่อเย็น และเปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นทุกตัวที่ใช้งาน
16. เปิด DCU ของ Turbo pump รอให้แหล่งจ่ายไฟอยู่ในสถานะพร้อมใช้งาน
17. กดปุ่ม ON turbo pump และสังเกตการทำงานของ Turbo pump ที่จะค่อยๆแสดงรอบการทำงานจาก 0 – 660 Hz และกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นจาก 0 – 4 A และเมื่อ Turbo pump มีรอบการหมุนเต็มที่ 660 Hz จะอ่านกระแสได้ประมาณ 1 A และจะสามารถอ่านความดันที่ลดลงได้มากกว่า 5×10^{-6} torr

3.1.4 ขั้นตอนการกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก

ในส่วนของการเริ่มต้นการกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนการปรับค่าอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและรายละเอียดความปลอดภัย ดังนี้

1. หลังจากกระบวนการเตรียมแท่งแกรไฟต์สำหรับเป็นวัสดุขั้วแคโทด นำมาติดตั้งเข้ากับแหล่งกำเนิดพลาสมา โดยค่าความต้านทานระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดต่ำกว่า 500Ω (วัดที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแคโทด กับภาชนะสุญญากาศที่ถูกต่อลงกราวด์เป็นจุดอ้างอิง)
2. ความดันบรรยากาศภายในระบบสุญญากาศมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 5×10^{-6} torr เรียกว่าความดันฐาน
3. ต่อสายไฟฟ้าทนกระแสสูงเข้ากับขั้วไฟฟ้าแคโทดของแหล่งกำเนิดพลาสมา
4. เปิดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) และเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์กระแสสูง (PFN) เปิดแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า 5 V ที่ทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใน PFN เปิด Function Generator ที่จะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณความถี่ของการอาร์ก ปิดเกจอ่านความดันของระบบโดยใช้คำสั่งผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. ปรับ power supply ในการกำหนดกระแสอาร์ก
6. กดปุ่ม output ที่ Function Generator กระบวนการอาร์กจะเริ่มต้นขึ้น

7. ในระหว่างกระบวนการอาร์ก การสัมผัสกับส่วนของระบบสุญญากาศควรกระทำด้วยความระมัดระวัง และไม่สัมผัสกับสายไฟฟ้าที่ชั่วคราว เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอาร์กควรปิด PFN เพื่อตัดกระแสไฟที่อยู่กับแหล่งกำเนิดพลาสมา

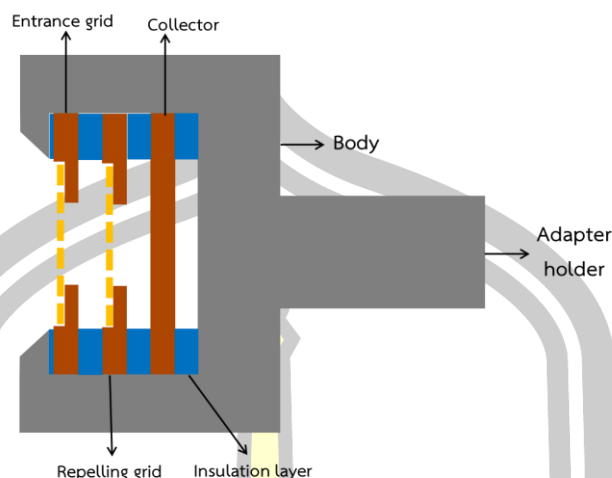
3.2 กระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอน

พลังงานไอออน เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการกำหนดคุณสมบัติของฟิล์ม จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยได้ทำการวัดพลังงานไอออนของพลาสมาที่กำเนิดมาจากเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศโดยมีคาร์บอนเป็นชั่วคราว ในกระบวนการวัดพลังงานฯ ได้ใช้เครื่องมือที่แตกต่างกันไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการวัดฯ ดังนี้

3.2.1 หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง

หัววัดพลังงานไอออน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานจลน์ของไอออนจากการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ เพื่อยับยั้งไม่ให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านมายังส่วนตรวจวัดสัญญาณไอออน หัววัดพลังงานไอออนประกอบขึ้นจากส่วนประกอบพื้นฐาน คือ ขั้วกริดนำไฟฟ้า และขั้วรับสัญญาณไอออน ที่วางเรียงซ้อนกันในลักษณะมีแกนกลางร่วมกัน ขั้วกริดนำไฟฟ้าจะได้รับการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวผลักอิเล็กตรอน (Electron repeller) และยอมให้เฉพาะไอออนเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังส่วนตรวจวัดสัญญาณไอออนได้ ก่อนที่ไอออนจะเคลื่อนที่ไปถึงส่วนตรวจวัดหรือขั้วรับสัญญาณไอออน ไอออนจะผ่านบริเวณสนามหลวง ซึ่งพลังงานจลน์ของไอออนจะถูกแปลงค่าจากค่าศักย์หลวง โดยไอออนที่มีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานศักย์หลวงเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงขั้วรับสัญญาณไอออนได้และได้รับการวัดเป็นกระแสไฟฟ้า ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและศักย์หลวงจึงมีความเชื่อมโยงไปถึงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์เฉลี่ยของไอออน

หัววัดพลังงานไอออนมีส่วนประกอบแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยตามไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.2 คือ ส่วนโครงด้านนอก (Body) แหวนตัวนำพร้อมกริดด้านนอก (Entrance grid) แหวนตัวนำพร้อมกริดด้านใน (Repelling grid) แผ่นรับไอออน (Collector) และแหวนฉนวน



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมส่วนประกอบโครงสร้างหัววัดพลังงานไอออน

ส่วนโครงด้านนอก (Body) ขึ้นรูปจากวัสดุโพลีเอเทอร์เทอร์โมพลาสติกอินทรีย์ ที่เรียกว่า Polyether ether ketone (PEEK) กลึงเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm สูง 40 mm เจาะรูกลางด้านในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และเจาะรูเพื่อทำเกลียวสำหรับสกรูขนาด M2 เพื่อเป็นตัวยึดส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัววัดพลังงานเข้าด้วยกัน

แหวนตัวนำขึ้นรูปจากแผ่นทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm หนา 0.35 mm เจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 mm และ 2 mm สำหรับใช้เป็นขั้วกริดด้านนอกและด้านในตามลำดับ แผ่นกริดถูกติดตั้งบนแหวนตัวนำทองแดงโดยใช้สารยัดนำไฟฟ้า (Conductive paint) แหวนตัวนำพร้อมกริดด้านนอกถูกต่อลงกราวด์ และแหวนตัวนำพร้อมกริดด้านในถูกไบอัสด้วยศักย์ลบ

แผ่นรับไอออน (Collector) ขึ้นรูปจากแผ่นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm หนา 0.35 mm ถูกเชื่อมด้วยสายไฟไปยังแหล่งจ่ายศักย์ทnungและวัดกระแสไอออน (SMU) และแหวนฉนวนขึ้นรูปจากแผ่นวัสดุโพลีเอเทอร์เทอร์โมพลาสติกอินทรีย์ (PEEK) หนา 1 mm ทำหน้าที่แยกกันทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นส่วนที่นำไฟฟ้าภายในหัววัดพลังงานไอออน

กริดด้านนอกถูกใช้เป็นชั้นป้องกันไม่ให้พลาสมาทะลุเข้ามาภายในหัววัดพลังงาน และกริดด้านในเป็นตัวกรองให้ไอออนผ่านไปยังส่วนตรวจวัด ในงานวิจัยนี้จะใช้ที่ไอเอ็มกริดที่เป็นฐานรับตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) มาเป็นขั้วกริดความละเอียดสูงสำหรับหัววัดพลังงานไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูง ซึ่งในการสร้างหัววัดพลังงานไอออนจะมีข้อพิจารณาการออกแบบ คือ

ช่องเปิดของขั้วกริดด้านนอกต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเดอบาย (debye length) เพื่อป้องกันการทะลุผ่านของพลาสมาและยังควรรักษาชั้นหุ้มพลาสมาให้มีโครงสร้างแบบระนาบ อีกหนึ่งข้อที่ควรคำนึง คือ ระยะห่างระหว่างขั้วกริดด้านนอกและขั้วกริดด้านในรวมถึงระยะระหว่างขั้วกริดด้านในถึงขั้วรับไอออนต้องสั้นกว่าระยะทางเฉลี่ยก่อนชนของการแตกตัว (mean free path of electron collision ionization) เพื่อป้องกันการเกิดไอออนชุดใหม่ภายในหัววัดฯ ซึ่งมีฟังก์ชันแจกแจงพลังงานที่แตกต่างจากไอออนในพลาสมาภายนอกหัววัด

3.2.2 หลักการตรวจวัดพลังงานไอออนด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วง

ในการประกอบชิ้นส่วนของหัววัดพลังงานไอออน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้วกริดด้านนอก (outer grid) ขั้วกริดด้านใน (inner grid) และขั้วรับสัญญาณ (collector) มีระยะห่างระหว่างชิ้นน้อยกว่า 1 mm ทำให้ส่วนประกอบแต่ละชิ้นมีโอกาสสัมผัสกันและทำให้เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าในระหว่างการประกอบและขั้นตอนการใช้งาน ดังนั้นภายหลังการติดตั้งในระบบสุญญากาศจำเป็นต้องมีการวัดสัญญาณไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยมัลติมิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบหัววัดพลังงานด้วยมัลติมิเตอร์

1. ปรับมัลติมิเตอร์ในโหมดวัดความต้านทานไฟฟ้า
2. วัดความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสาม (กริดด้านนอก, G1 กริดด้านใน, G2 ขั้วรับไอออน, C) กับจุดอ้างอิงสัญญาณ (ผนังภาชนะสุญญากาศเป็นจุดอ้างอิงไฟฟ้าของระบบ)
3. ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสามของหัววัดฯ กับจุดอ้างอิงสัญญาณที่ถูกต้อง เป็นดังนี้
 - กริดด้านนอก (G1) เทียบจุดอ้างอิงมีค่าน้อยกว่า 0.5 Ω
 - กริดด้านใน (G2) เทียบจุดอ้างอิงมีค่ามากกว่า 10 M Ω
 - ขั้วรับไอออน (C) เทียบจุดอ้างอิงมีค่ามากกว่า 10 M Ω
 - กริดด้านใน (G2) กับขั้วรับไอออน (C) มีค่ามากกว่า 10 M Ω
4. ผลการวัดตามข้อที่ 3 บ่งชี้ว่า กริดด้านนอก (G1) มีศักย์เทียบเท่ากับจุดอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าทั้งสามภายในหัววัดฯ ไม่สัมผัสกัน ดังนั้น หัววัดจึงพร้อมทำงานและทดสอบขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนการทดสอบหัววัดฯ ด้วยการวัดศักย์ไฟฟ้า (Floating voltage)

1. ต่อสายสัญญาณที่ขั้วทั้งสาม (G1, G2, C) กับออสซิลโลสโคปเพื่อดูสัญญาณของศักย์ไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านขั้วกริดด้านนอกเข้ามาถึงกริดด้านในและขั้วรับไอออน ตามลำดับ

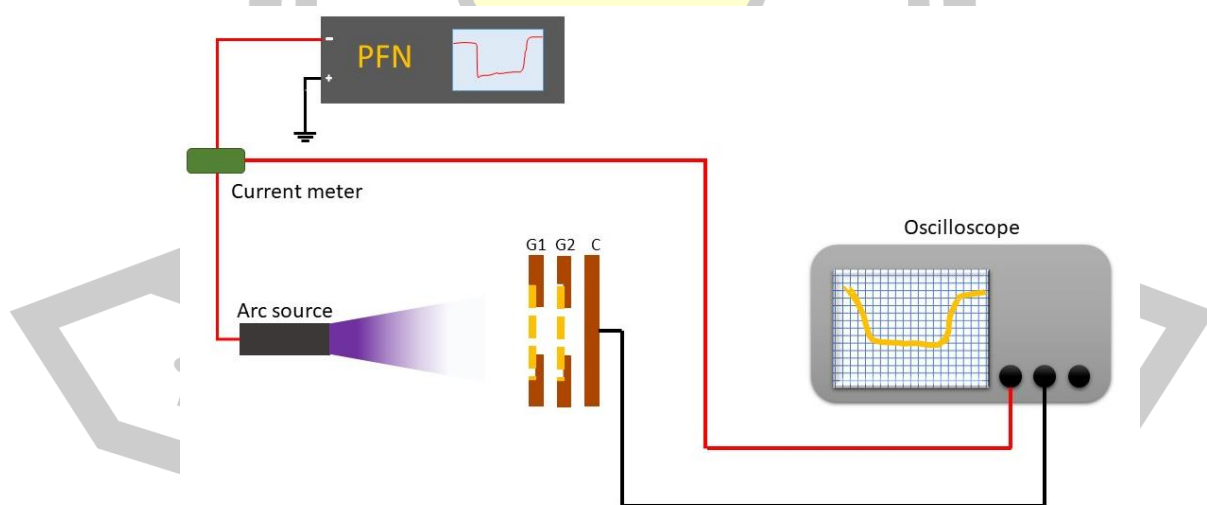
2. ทำการจุดพลาสมาตามเงื่อนไข

3. สัญญาณที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคป ควรเป็นดังนี้

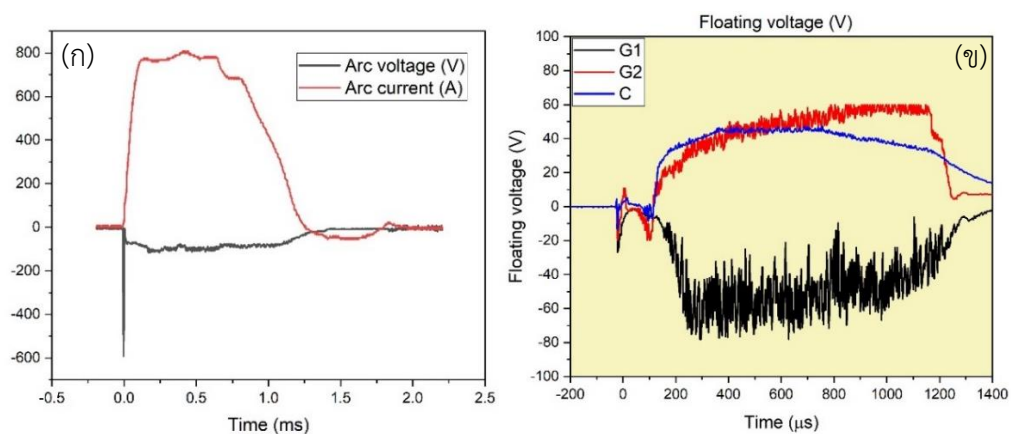
- สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว G1 มีค่าติดลบ
- สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว G2 มีค่าติดลบน้อยกว่าสัญญาณที่ขั้ว G1
- สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วรับไอออน C มีค่าติดลบน้อยกว่า G1 , G2 หรือมีสัญญาณเป็นศักย์ไฟฟ้าบวก

4. จากผลการวัดศักย์ไฟฟ้าที่ได้บ่งชี้ว่ามีอนุภาคประจุไฟฟ้า (ทั้งอิเล็กตรอนและไอออน) เคลื่อนที่ผ่านขั้วกริดด้านนอก ขั้วกริดด้านใน และขั้วรับไอออน ตามลำดับ สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าติดลบเป็นผลมาจากความไม่สมดุลระหว่าง Γ_e และ Γ_i ที่ตกกระทบขั้วทั้งสาม

ตัวอย่างสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้ว G1 , G2 และ C ด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าการอาร์ก 600 โวลต์ สัญญาณกระแสการอาร์กเป็นดังรูปที่ 3.7 (ก) และสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ตกกระทบขั้วทั้งสามเป็นดังรูปที่ 3.7 (ข)



รูปที่ 3.6 การต่อสายสัญญาณในการวัดศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดพลังงาน



รูปที่ 3.7 สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากหัววัดพลังงาน

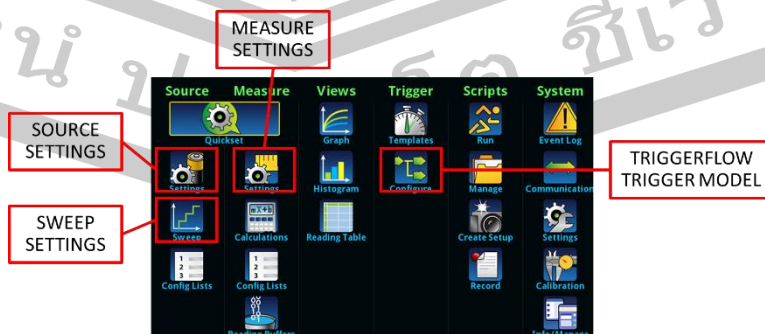
3.2.3 การตั้งค่าเครื่องจ่ายศักย์หน่วยและวัดกระแสไอออน

เครื่องจ่ายศักย์หน่วยและวัดกระแสไอออน หรือ Source Unit meter; SMU เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่จ่ายศักย์หน่วยให้กับขั้วรับไอออนตามช่วงที่กำหนด และวัดกระแสไอออนที่สัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของไอออน โดยการตั้งค่า SMU ในกระบวนการวัดพลังงานไอออนมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดเครื่อง SMU ด้วยการกดปุ่ม Power บริเวณมุมด้านล่างซ้ายมือของหน้าจอ เมื่อเครื่องพร้อมใช้งานที่หน้าจอจะแสดงดังรูป



2. กดปุ่ม MENU เพื่อตั้งค่าการวัดพลังงานไอออน หน้าจอจะแสดงดังรูป การตั้งค่าส่วนต่างๆ สามารถเลือกโดยการสัมผัสที่หน้าจอ

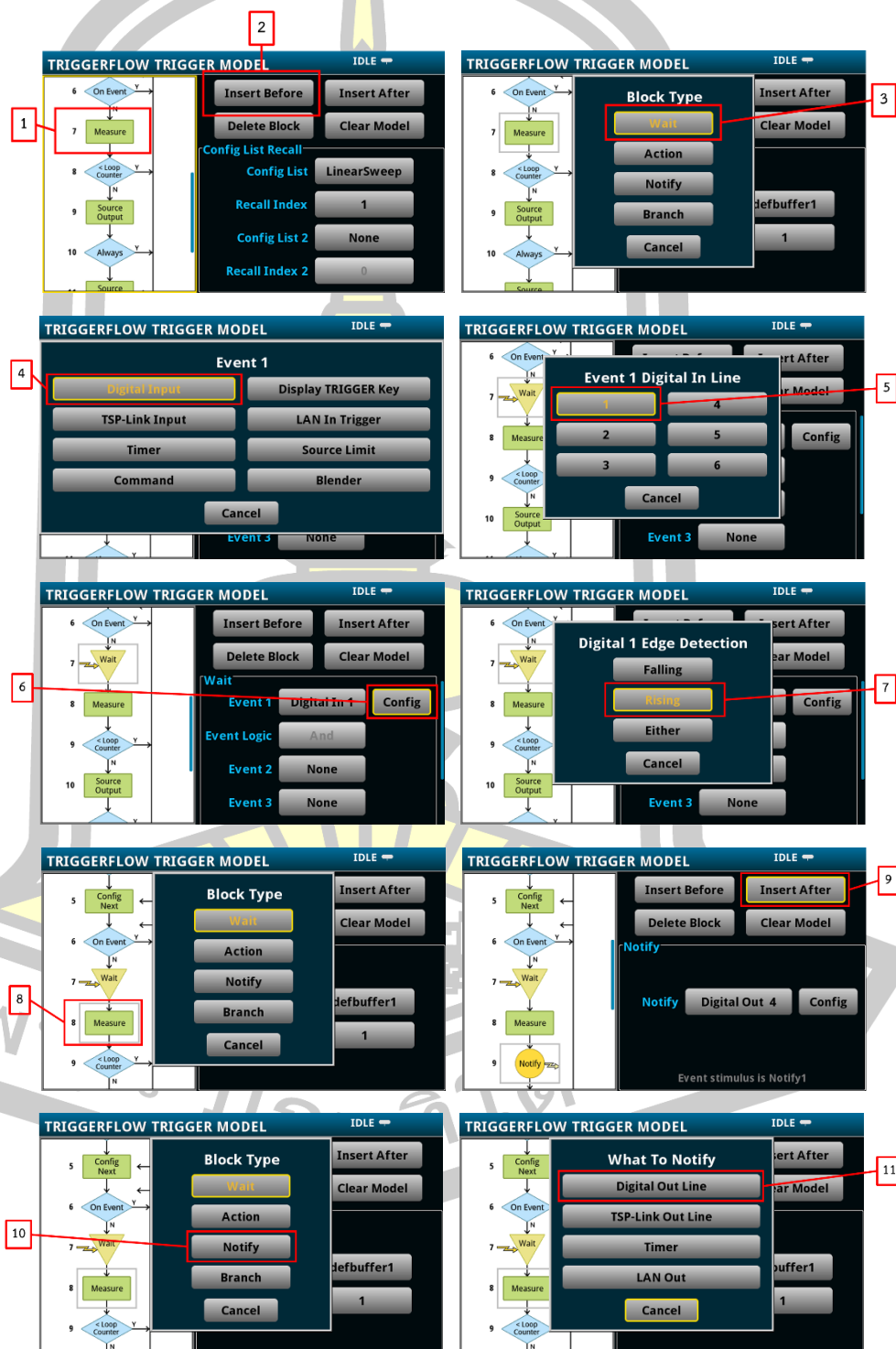


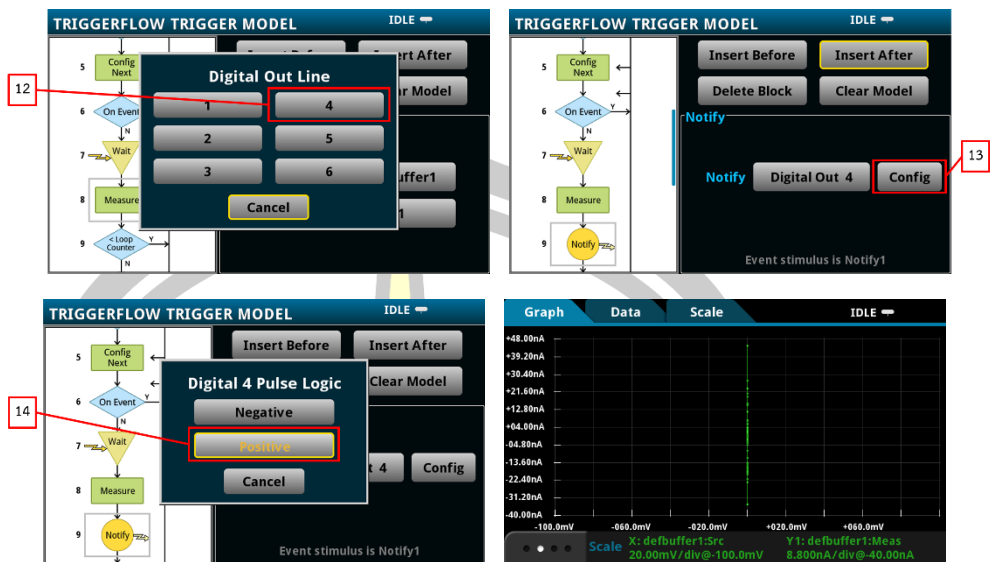
3. กำหนดค่าแหล่งจ่ายศักย์หน่วย โดยตั้งค่าเมนู SOURCE SETTINGS และกำหนดค่าต่าง ๆ ดังรูป

4. กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการวัดพลังงานโดยตั้งค่าเมนู MEASURE SETTINGS ซึ่งส่วนนี้จะถูกปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ต้องการ ได้แก่ Range คือการจำกัดค่าสูงสุดของกระแสที่ต้องการวัด NPLCs คือการกำหนดช่วงเวลาของการวัดข้อมูล ซึ่งค่า 0.01 เป็นค่าที่ละเอียดที่สุดตามความสามารถของอุปกรณ์ โดยจะมีช่วงเวลาการวัดข้อมูลเท่ากับ $450\mu\text{s}$ ส่วนค่าอื่น ๆ ตั้งค่าดังรูป

5. กำหนดค่าช่วงการกวาดศักย์หน่วยที่ชั่วรับไอออน โดยไปที่เมนู SWEEP SETTINGS ในส่วนนี้จะมีการกำหนดค่าที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงของการกวาดศักย์หน่วยโดยกำหนดค่า Start คือค่าศักย์หน่วยเริ่มต้นที่จะจ่ายให้กับชั่วรับไอออนกวาดไปจนถึงค่าศักย์หน่วยที่กำหนดไว้ในส่วนเมนู Stop โดยค่าความละเอียด (resolution) ของการกวาดศักย์หน่วยจะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดของข้อมูลที่กำหนดในส่วนเมนู Points และส่วน Source Limit ตั้งค่าเท่ากับค่า Range ในส่วนการตั้งค่า MEASURE SETTINGS ส่วนค่าอื่น ๆ กำหนดดังรูป

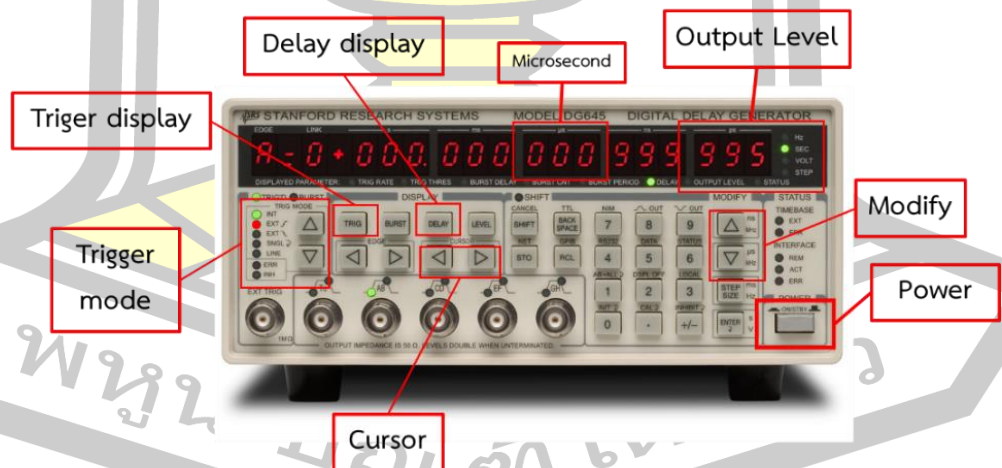
6. ในกระบวนการวัดพลังงานที่แหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นแบบห้วงหรือแบบพัลส์ เครื่อง SMU จะมีส่วนการสร้างรูปแบบคำสั่งเพื่อให้กระบวนการวัดข้อมูลสอดคล้องกับพลาสมาที่กำลังกำเนิดขึ้นมาในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยการตั้งค่าที่เมนู TRIGGERFLOW TRIGGER MODEL และกำหนดค่าตามลำดับของหมายเลขกำกับ ดังรูป





3.2.4 การตั้งค่าแหล่งกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลา

แหล่งกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลา (delay generator) เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการวัดพลังงานไอออนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ ที่ต้องการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาของสัญญาณพัลส์อาร์ก หรือที่เรียกว่า time-resolved RFA ซึ่งแหล่งกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลานี้จะทำงานสอดคล้องกันกับ SMU โดยจะทำหน้าที่หน่วงเวลาตามที่กำหนดและจะส่งสัญญาณไปควบคุม SMU ในการเริ่มกระบวนการวัดพลังงาน โดยการตั้งค่าแหล่งกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลามีขั้นตอนดังนี้



1. เปิดเครื่องโดยกดปุ่ม Power
2. ตั้งค่าหน้าจอเพื่อกำหนดโหมดสัญญาณการทริกซ์ กดเลือกปุ่มเมนู Trigger display หน้าจอจะแสดงข้อมูลของการตั้งค่าสัญญาณทริกซ์ เลือกโหมดการทริกซ์ตามสัญญาณกระแสอาร์

กของระบบ โดยกดปุ่มลูกศรชี้ขึ้น - ลง ในงานวิจัยนี้สัญญาณกระแสอาร์กมีลักษณะชี้ขึ้น ดังนั้นเลือกโหมดการทริกซ์เป็นแบบทริกซ์ชี้ขึ้น (ตำแหน่งจุดสีแดง)

3. เมื่อเลือกโหมดการทริกซ์เสร็จแล้ว ทำการกำหนดค่าในส่วน Output Level ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขว่า สัญญาณกระแสอาร์กมีค่าเท่าใดแหล่งกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลาจะส่งสัญญาณทริกซ์ไปยัง SMU ในงานวิจัยนี้ตั้งค่า Output Level เท่ากับ 0.5

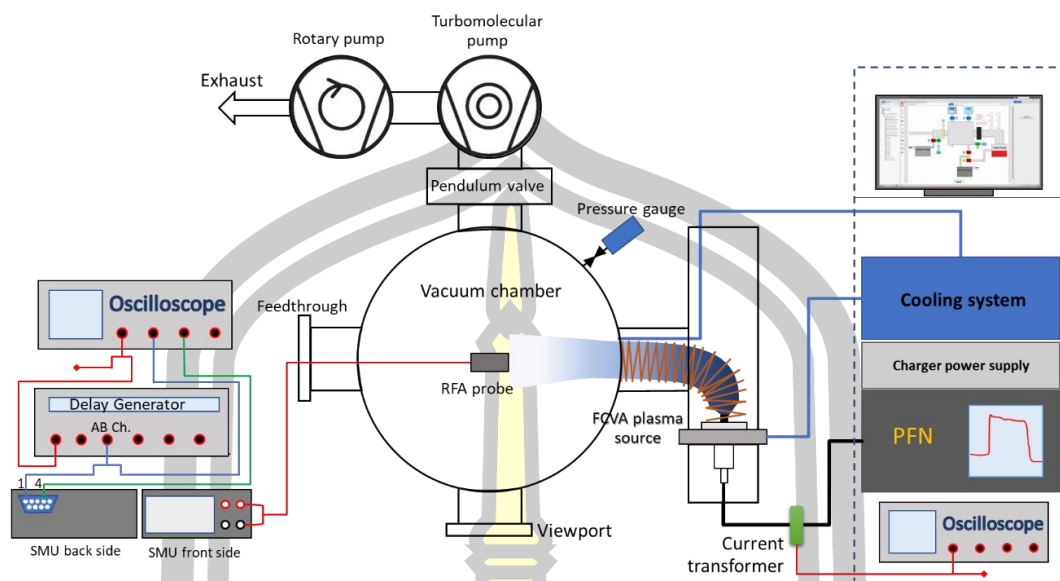
4. เพื่อกำหนดค่าหน่วงเวลา กดปุ่ม Delay display จากนั้นจะสามารถเลือกหน่วยของเวลาโดยใช้ปุ่ม Cursor เป็นตัวเลื่อนเพื่อเลือกหน่วยเวลา ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าหน่วงเวลาในหน่วยไมโครวินาที

5. การกำหนดค่าเวลาที่จะกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลานั้นจะใช้ปุ่ม Modify ในการตั้งค่า โดยปุ่มชี้ขึ้นจะเพิ่มค่าตัวเลข และปุ่มชี้ลงจะลดค่าตัวเลขลง

3.2.5 เงื่อนไขการวัดพลังงานไอออนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ

3.2.5.1 วัดพลังงานจลน์ที่ติดตัวของไอออนคาร์บอน

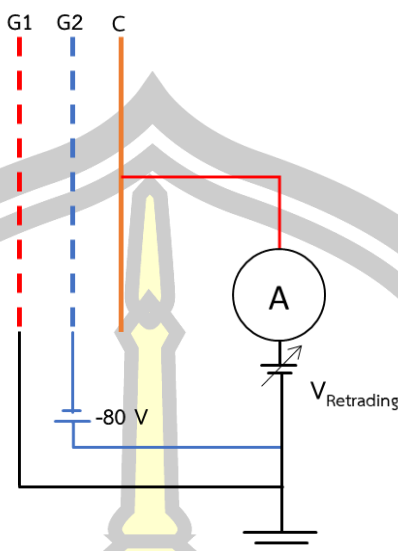
จากการแนวคิด การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศโดยใช้แนวคิดการสร้างพลาสมาแบบพัลส์ของ Ander และคณะ (Anders et al., 1998) เพื่อศึกษาพลาสมาที่กำเนิดขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้น ได้ทำการวัดพลังงานจลน์ที่ติดตัวของไอออนคาร์บอน โดยหัววัดพลังงานไอออนฯ ถูกติดตั้งเข้าไปภายในระบบสุญญากาศตำแหน่งที่ติดตั้งขึ้นงานในกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง ระยะห่างระหว่างหัววัดพลังงานฯ กับปลายขดลวดตัวกรอง เท่ากับ 8 cm หัววัดพลังงานไอออนถูกต่อสายสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมการต่อสายสัญญาณระหว่างหัววัดพลังงานฯ กับอุปกรณ์ต่าง ๆ

ในกระบวนการวัดพลังงานจลน์ที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอน ชั่วกริดไฟฟ้าด้านนอกสุด (G1) ถูกต่อลงกราวด์ (เทียบกับจุดอ้างอิง) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองไม่ให้พลาสมาทะลุเข้ามาภายใน หัววัดฯ และรักษาพื้นผิวของพลาสมาให้อยู่ในแนวระนาบกับหัววัดฯ ชั่วกริดไฟฟ้าที่ 2 (G2) ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าคงที่ -80 V ทำหน้าที่เป็นชั้นผลึกอิเล็กตรอนไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปถึงหัวรับไอออนด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากการไบอัส หัวรับไอออน (C) ถูกไบอัสด้วยศักย์หนึ่งตั้งแต่ -40 ถึง 100 V ทำหน้าที่หน่วงไอออนที่มีพลังงานสอดคล้องกันกับแต่ละค่าของศักย์หนึ่งและวัดค่าออกมาในรูปของกระแสไอออน กำหนดค่า NPLC เท่ากับ 0.04 ซึ่งจะเป็นการวัดพลังงานไอออนเฉลี่ย ทั้งความกว้างพัลส์ สัญญาณหน่วงเวลาถูกกำหนดไว้เท่ากับ 0 นั่นคือกระบวนการวัดพลังงานจะเริ่มต้นพร้อมกันกับการเริ่มต้นการอาร์ก ไดอะแกรมแสดงการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับหัวไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.9

พหุบัน ปณ สิโต ชีเว



รูปที่ 3.9 โต๊ะกรรมชั่วไฟฟ้าภายในหัววัดพลังงานฯ กับเครื่องตรวจวัดสัญญาณกระแสไอออน

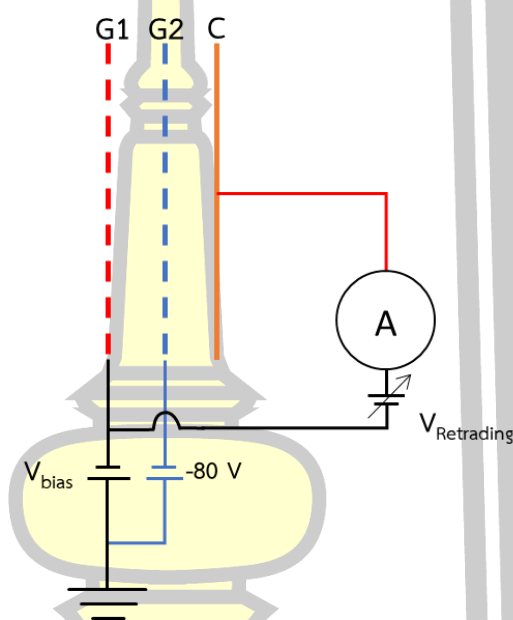
กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์ก เริ่มต้นขึ้นเมื่อความดันฐานมีค่าเท่ากับ 4.4×10^{-6} torr จ่ายกระแสอาร์กให้กับขั้วแคโทดเท่ากับ 736 A ความถี่ของการอาร์ก 1 Hz ความกว้างพัลส์อาร์กเท่ากับ $1200 \mu\text{s}$ ในการทดลองนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.2.5.2 วัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ

จากงานผลการวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ทำการวัดพลังงานไอออนด้วยเทคนิคต่าง ๆ อย่างหลากหลาย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการวัดพลังงานไอออนด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหมุนในพลาสมาที่กำเนิดมาจากเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ และนักวิจัยหลายท่านชี้ให้เห็นว่าการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบให้กับชิ้นงานจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณพื้นผิวชิ้นงานจากอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้า เมื่อไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้ามายังบริเวณสนามไฟฟ้า ไอออนจะได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงให้ไอออนมีพลังงานเพิ่มมากขึ้น เพื่อชี้ให้เห็นความชัดเจนของอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากการไบอัสต่อพลังงานไอออน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวัดพลังงานไอออนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหมุน

หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหมุนถูกติดตั้งเข้าไปในระบบสุญญากาศที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งของการติดตั้งชิ้นงาน ซึ่งห่างจากขดลวดตัวกรองเป็นระยะ 22 cm ดังรูปที่ 3.8 ขั้วกริดไฟฟ้าด้านนอกสุด (G1) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของชิ้นงานจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบที่จะไบอัสให้กับชิ้นงาน ในกระบวนการศึกษาอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าไบอัสต่อพลังงานไอออนนี้ได้ทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสจาก 0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70 และ -80 V ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 2 (G2)

ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าคงที่ -80 V ทำหน้าที่เป็นชั้นผลึกอิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปถึงขั้วรับไอออนด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากการไบอัส ขั้วรับไอออน (C) ถูกไบอัสด้วยศักย์หนึ่งตั้งแต่ -20 ถึง 120 V ทำหน้าที่หนึ่งไอออนที่มีพลังงานสอดคล้องกันกับแต่ละค่าของศักย์หนึ่งและวัดค่าออกมาในรูปของกระแสไอออน กำหนดค่า NPLC เท่ากับ 0.04 ซึ่งจะเป็นการวัดพลังงานไอออนเฉลี่ยทั้งความกว้างพัลส์ สัญญาณหนึ่งเวลาถูกกำหนดไว้เท่ากับ 0 นั่นคือกระบวนการวัดพลังงานจะเริ่มต้นพร้อมกันกับการเริ่มต้นการอาร์ก ไดอะแกรมแสดงการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมขั้วกริดไฟฟ้าภายในหัววัดพลังงานฯ กับการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วกริดที่ 1

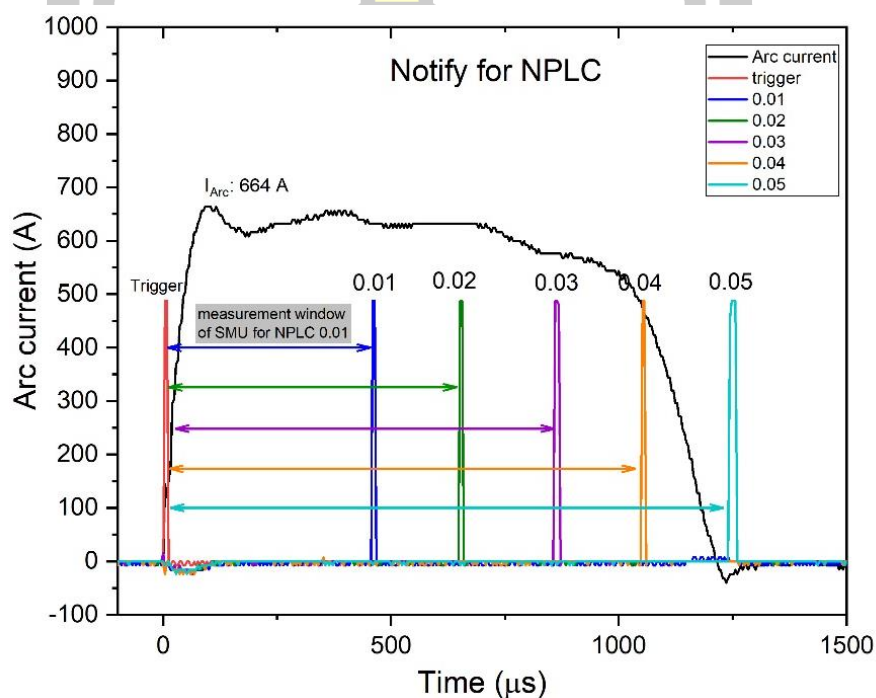
กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์ก เริ่มต้นขึ้นเมื่อความดันฐานมีค่าเท่ากับ 4.4×10^{-6} torr จ่ายกระแสอาร์กให้กับขั้วแคโทดเท่ากับ 648 A ความถี่ของการอาร์ก 1 Hz ความกว้างพัลส์อาร์กเท่ากับ $1200\text{ }\mu\text{s}$

3.2.5.3 วัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก

ในกระบวนการกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ ที่มีความกว้างของพัลส์อาร์กเท่ากับ $1200\text{ }\mu\text{s}$ เพื่อวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาความกว้างสัญญาณพัลส์อาร์ก ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

○ การปรับค่า NPLC

ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา การตั้งค่าเครื่อง SMU ที่เมนู NPLC จะเป็นการปรับช่วงเวลาของการวัดพลังงานไอออน ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงได้ทำการปรับค่า NPLC ตั้งแต่ 0.01 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 สัญญาณช่วงเวลาของการวัดพลังงานจากการปรับค่า NPLC แสดงดังรูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดสัญญาณช่วงเวลาถูกกำหนดค่าเท่ากับ 0 ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 (G) ถูกต่อลงกราวด์ ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 2 (G2) ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าคงที่ -80 V ขั้วรับไอออน (C) ถูกไบอัสด้วยศักย์หนึ่งตั้งแต่ -20 ถึง 100 V กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์กเริ่มต้นขึ้นเมื่อความดันฐานมีค่าเท่ากับ 4.4×10^{-6} torr จ่ายกระแสอาร์กให้กับขั้วแคโทดเท่ากับ 736 A ความถี่ของการอาร์ก 1 Hz ความกว้างพัลส์อาร์กเท่ากับ 1200 μ s

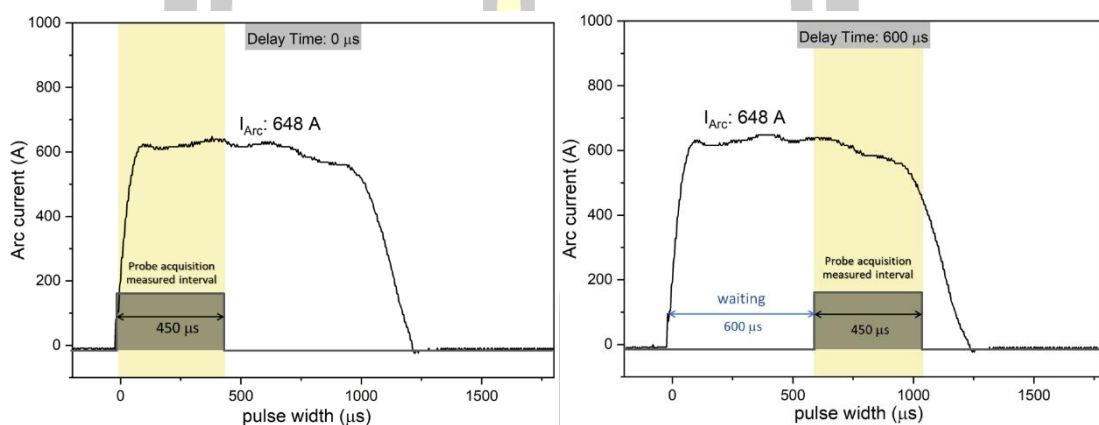


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะสัญญาณกระแสอาร์กกับสัญญาณตำแหน่งช่วงของการวัดพลังงานไอออน ด้วยการปรับค่า NPLC

○ การปรับค่าสัญญาณช่วงเวลา

การทดลองนี้จึงได้ทำการปรับค่าสัญญาณช่วงเวลา ตั้งแต่ 0, 200, 400, 600, 800 และ 1000 μ s เทียบกับจุดเริ่มต้นของสัญญาณกระแสอาร์ก ค่า NPLC ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.01 ซึ่งเป็นช่วงเวลาของการวัดที่ละเอียดที่สุด คือ 450 μ s ตัวอย่างสัญญาณช่วงเวลาของการบันทึกข้อมูล

ตามความกว้างพัลส์อาร์ก แสดงดังรูปที่ 3.12 ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 (G) ถูกต่อลงกราวด์ ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 2 (G2) ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าคงที่ -80 V ขั้วรับไอออน (C) ถูกไบอัสด้วยศักย์หนึ่งตั้งแต่ -40 ถึง 120 V กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์ก เริ่มต้นขึ้นเมื่อความดันฐานมีค่าเท่ากับ 4.4×10^{-6} torr จ่ายกระแสอาร์กให้กับขั้วแคโทดเท่ากับ 648 A ความถี่ของการอาร์ก 1 Hz ความกว้างพัลส์อาร์ก เท่ากับ 1200 μs ในการทดลองนี้ ได้ทำการวัดพลังงานไอออนโดยการปรับค่าสัญญาณหน่วงเวลาในกรณีที่ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -30 V และ -60 V



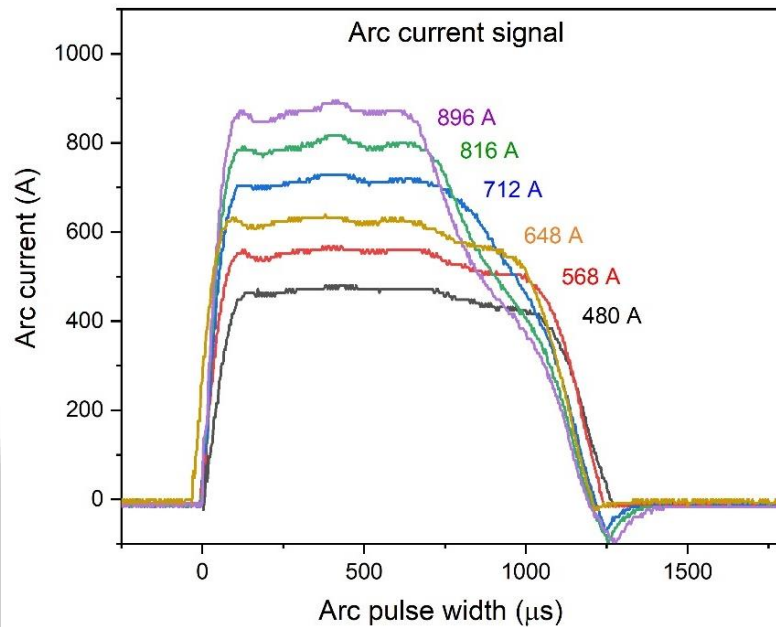
รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณกระแสอาร์กและช่วงเวลาของการวัดพลังงานฯ ภายในสัญญาณอาร์กพัลส์จากการกำหนดสัญญาณหน่วงเวลา

จากรูปที่ 3.12 (ก) แสดงช่วงเวลาการวัดพลังงานเทียบสัญญาณกระแสอาร์ก เมื่อกำหนดค่าหน่วงเวลาเท่ากับ 0 การวัดพลังงานฯ จะเริ่มต้นขึ้นพร้อมกับกระบวนการอาร์กและวัดพลังงานไปตามความกว้างพัลส์อาร์ก 450 μs รูปที่ 3.12 (ข) แสดงสัญญาณช่วงการวัดพลังงานเมื่อกำหนดค่าหน่วงเวลาเท่ากับ 600 μs การวัดพลังงานจะเกิดขึ้นหลังจากการเริ่มการอาร์กเป็นเวลา 600 μs ข้อมูลของการวัดพลังงานจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 600 – 1050 μs ของความกว้างพัลส์อาร์ก

3.2.5.4 วัดพลังงานไอออนคาร์บอนด้วยการปรับเปลี่ยนกระแสอาร์ก

จากการทดลองที่ผ่านมา ที่มีการใช้ค่ากระแสอาร์กในการกำเนิดพลาสมาที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอาร์กต่อพลังงานไอออน การทดลองนี้จึงได้ทำการปรับค่ากระแสอาร์ก ตั้งแต่ 480, 568, 648, 712, 816 และ 896 A ค่า NPLC ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.04 ซึ่งเป็นการวัดพลังงานเฉลี่ยทั้งความกว้างพัลส์ สัญญาณหน่วงเวลาถูกกำหนดไว้เท่ากับ 0 นั่นคือกระบวนการวัดพลังงานจะเริ่มพร้อมกับการเริ่มกระบวนการอาร์ก ตัวอย่างสัญญาณกระแสอาร์กที่ถูกปรับค่า แสดงดังรูปที่ 3.13 ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 (G) ถูกต่อลงกราวด์ ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 2 (G2) ถูกไบอัส

ด้วยศักย์ไฟฟ้าคงที่ -80 V ขั้วรับไอออน (C) ถูกไบอัสด้วยศักย์หนึ่งตั้งแต่ -40 ถึง 100 V กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยการอาร์ก เริ่มต้นขึ้นเมื่อความดันฐานมีค่าเท่ากับ $4.4 \times 10^{-6}\text{ torr}$



รูปที่ 3.13 แสดงสัญญาณกระแสอาร์กของการกำเนิดพลาสมา

3.3 วิธีวิเคราะห์และประมวลผลการวัดพลังงานไอออน

ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากหัววัดพลังงานไอออนจะอยู่ในรูปของกราฟระหว่างค่าศักย์หนึ่ง V_d (แกนนอน) และค่ากระแสไอออนที่ขั้วรับไอออน I_c (แกนตั้ง) การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของไอออนจากกราฟ $I_c - V_d$ มีขั้นตอนดังนี้

1. ประมวลกราฟ $I_c - V_d$ ให้เรียบร้อย เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากการวัดด้วยเทคนิค Savitzky-Golay
2. ประมวลหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ I_c เทียบกับ V_d ซึ่งแปรผันตรงกับฟังก์ชันการแจกแจงความเร็วของไอออน $f(v)$ ดังสมการ (3.1)

$$f(v) = \frac{M_i}{\chi e^2 A} \frac{dI_c}{dV_d} \quad (3.1)$$

เมื่อ M_i คือ ion mass, A คือ aperture area, χ คือ total transparency of grid electrons, e คือ electron charge

3. คำนวณค่าอัตราเร็ว v จากค่าศักย์หนึ่ง V_d ตามสมการ

$$v = \sqrt{\frac{2eV_d}{M_i}} \quad (3.2)$$

4. พล็อตกราฟระหว่างอัตราเร็ว v ให้เป็นแกนนอน และค่า $f(v)$ เป็นแกนตั้ง

5. คำนวณค่าความหนาแน่นของไอออน n_i จากสมการ

$$n_i = \int_0^{\infty} f(v) dv \quad (3.3)$$

6. คำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยของไอออน $\langle v \rangle$ จากสมการ

$$\langle v \rangle = \frac{1}{n_i} \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (3.4)$$

7. คำนวณค่าความเร็วของประชากรส่วนใหญ่ v_{most} ค่าเฉลี่ยความเร็วกำลังสอง $\langle v \rangle^2$ ค่าฟลักซ์ Γ ค่าพลังงานจลน์ E และความหนาแน่นพลังงานจลน์ Ψ ของไอออน ตามสมการ

$$v_{most} = \left(\frac{df(v)}{dv} = 0 \right)_{at\ point} \quad (3.5)$$

$$\langle v \rangle^2 = \frac{1}{n_i} \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv \quad (3.6)$$

$$\Gamma = \langle v \rangle n_i \quad (3.7)$$

$$E = \frac{1}{2} M_i \langle v \rangle^2 \quad (3.8)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} M_i \langle v \rangle^2 n_i \quad (3.9)$$

8. ประมวลหาค่าฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของไอออน $f(\varepsilon)$ ตามสมการ

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2M_i\varepsilon}} f(v) \quad (3.10)$$

9. คำนวณค่าพลังงานจลน์ ε จากค่าแรงดันกรองพลังงาน V โดย $\varepsilon = eV$ โดยประมาณระดับประจุไอออนในระบบเป็น +1

10. พล็อตกราฟระหว่างค่าพลังงานจลน์ ε ให้เป็นแกนนอน และค่า $f(\varepsilon)$ เป็นแกนตั้ง

11. คำนวณค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของไอออน จากสมการ

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{n_i} \int_0^\infty \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.11)$$

พารามิเตอร์ของไอออนเหล่านี้ที่ได้ความได้จากกราฟ $I_c - V_d$ ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะถูกนำไปแสดงผล เพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างกันและแสดงค่าพลังงานไอออนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยพลาสมาต่อไป

3.4 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเตตระอีตรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม ta-C ด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ โดยเริ่มจากกล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการเตรียมชิ้นงาน และรายละเอียดกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม ta-C ตามลำดับ

3.4.1 กระบวนการทำความสะอาดชิ้นงาน

ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยกระบวนการตกสะสมด้วยไอของพลาสมา ความสะอาดของชิ้นงานมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าหากชิ้นงานมีความสกปรกจะทำให้เกิดความบกพร่องและสิ่งเจือปนของการตกสะสมของฟิล์ม เป็นสาเหตุของการหลุดลอกและคุณภาพของฟิล์มต่ำ ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มลงบนชิ้นงานเพื่อนำไปศึกษาสมบัติของฟิล์มนั้น แผ่นซิลิกอนจะถูกใช้เป็นชิ้นงานในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม แผ่นซิลิกอนจะถูกทำความสะอาดด้วยสารละลายทางเคมี ตามลำดับดังนี้

1. ตัดแผ่นซิลิกอนให้มีขนาดตามความต้องการที่จะนำไปใช้งาน
2. ทำความสะอาดด้วยสารละลายอะซิโตน นำแผ่นซิลิกอนใส่ลงในบล็อกรักแกว่งล้างชิ้นงาน เทสารละลายอะซิโตนลงไปให้ท่วมชิ้นงาน จากนั้นนำบล็อกรักแกว่งไปวางในเครื่องอัลตราโซนิกที่มีน้ำ RO บรรจุอยู่ จากนั้นกดปุ่มเริ่มเพื่อให้เครื่องอัลตราโซนิกทำงาน กระบวนการล้างชิ้นงานด้วยสารละลายอะซิโตนใช้เวลา 10 นาที จำนวน 1 รอบ เมื่อครบ 10 นาที เทสารละลายอะซิโตนออกจากชิ้นงาน และนำสารละลายอะซิโตนเทลงในขวดทิ้งสาร
3. ทำความสะอาดด้วยสารละลายเมทานอล เทสารละลายเมทานอลลงในบล็อกรักแกว่งให้ท่วมชิ้นงาน จากนั้นนำไปวางในเครื่องอัลตราโซนิกและทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที กระบวนการล้างด้วยสารละลายเมทานอลจะทำซ้ำจำนวน 2 รอบ จากนั้นนำสารละลายเมทานอลเทลงในขวดทิ้งสาร (แยกขวดกันกับสารละลายอะซิโตน)

4. ทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุ หรือน้ำ DI โดยเทน้ำ DI ลงในบล็อกแก้วให้ท่วมชิ้นงาน และนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที กระบวนการล้างด้วยน้ำ DI นี้ จะทำซ้ำจำนวน 3 รอบ

5. นำแผ่นซิลิกอนที่ล้างด้วยสารละลาย เป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนเพื่อให้ชิ้นงานปราศจากความชื้น เก็บชิ้นงานใส่ลงในกล่องบรรจุชิ้นงานและนำไปเก็บไว้ในตู้เก็บชิ้นงานเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มต่อไป

หมายเหตุ: ทุกกระบวนการที่มีการสัมผัสชิ้นงานควรสวมถุงมือที่สะอาดและสวมหน้ากากอนามัยตลอดกระบวนการทดลอง

3.4.2 กระบวนการตกสะสมฟิล์มเตตระไฮดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน

กระบวนการตกสะสมฟิล์ม ta-C เกิดจากเทคนิค pulse-FCVA ที่มีแท่งแกรไฟต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 mm ความบริสุทธิ์ 99.997% แผ่นซิลิกอนชนิดพี (p-type) หนา 100 μm ถูกติดตั้งเข้ากับแผ่นฐานรองรับชิ้นงานและติดตั้งเข้าไปภายในภาชนะสุญญากาศ ณ ตำแหน่งห่างจากปลายขดลวดตัวกรองเป็นระยะ 22 cm ความดันฐานก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบมีค่า 4×10^{-4} torr ในกระบวนการตกสะสมฟิล์ม ta-C นี้ ประกอบด้วยกระบวนการสำคัญ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมาพลังงานสูงเพื่อกำจัดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวชิ้นงานและกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.2.1 กระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมาพลังงานสูง

- ปรับตำแหน่งให้ด้านหน้าชิ้นงานอยู่ในแนวเดียวกันกับ anode layer ion source
- ฉีดแก๊สอาร์กอน อัตราการไหล 40 sccm เข้าไปในภาชนะสุญญากาศทำหน้าที่เป็นตัวตั้งต้นเพื่อแตกตัวเป็นพลาสมา
- จ่ายแรงดันไฟฟ้า 1.84 kV ให้กับ anode layer ion source
- กระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมาพลังงานสูงจะใช้เวลานาน 10 นาที

3.4.2.2 กระบวนการตกสะสมฟิล์ม ta-C ด้วยเทคนิค pulse-FCVA

- เมื่อกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมาพลังงานสูงสิ้นสุดลง ปิดแหล่งจ่ายแก๊สอาร์กอนและแหล่งจ่ายไฟของ anode layer ion source
- ปรับตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่แนวเดียวกันกับแนวของลำพลาสมาจากเทคนิค FCVA

- ต่อแผ่นฐานรองรับชิ้นงานลงกราวด์(เทียบจุดอ้างอิง) หรือจ่ายศักย์ไฟฟ้าไบอัสให้กับชิ้นงาน (กรณีศึกษาผลของการเพิ่มพลังงานไอออน)
- ปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ชาร์จ PFN ให้กระแสอาร์กมีค่า 720 A
- เริ่มกระบวนการตกสะสมฟิล์มด้วยการกดปุ่ม Output ที่ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ที่สร้างความถี่พัลส์อาร์ก 1 พัลส์ ต่อ 1 วินาที (1 Hz)
- ในกระบวนการตกสะสมฟิล์มจะใช้จำนวนพัลส์ในการตกสะสม 3600 พัลส์ เป็นเวลา 60 นาที
- หลังจากกระบวนการตกสะสมฟิล์มสิ้นสุดลง จะให้ฟิล์มลดอุณหภูมิของฟิล์มลงหลังกระบวนการตกสะสมเป็นเวลา 20 นาที ก่อนนำชิ้นงานออกมาจากภาชนะสุญญากาศ
- ในกระบวนการที่ชิ้นงานถูกไบอัส จะให้ศักย์ไฟฟ้าลบกับชิ้นงานตั้งแต่ -20 ถึง -160 V

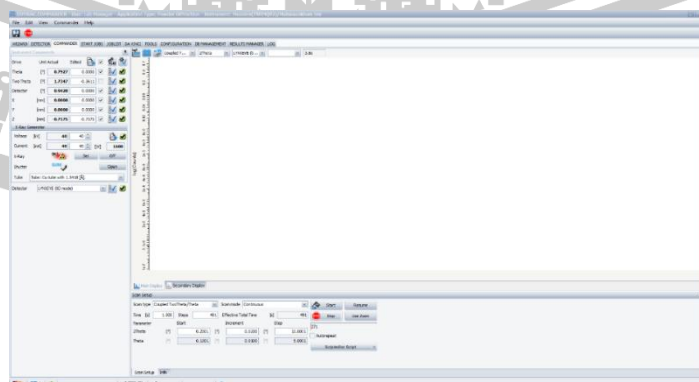
3.5 วิธีวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มเตตระไฮดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน

ฟิล์ม ta-C ที่ได้จากกระบวนการตกสะสมด้วยเทคนิค pulse-FCVA ถูกนำไปศึกษาด้วยเทคนิค X-ray reflectometry, เทคนิค Raman spectroscopy และเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy ซึ่งแต่ละเทคนิคจะมีกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนี้

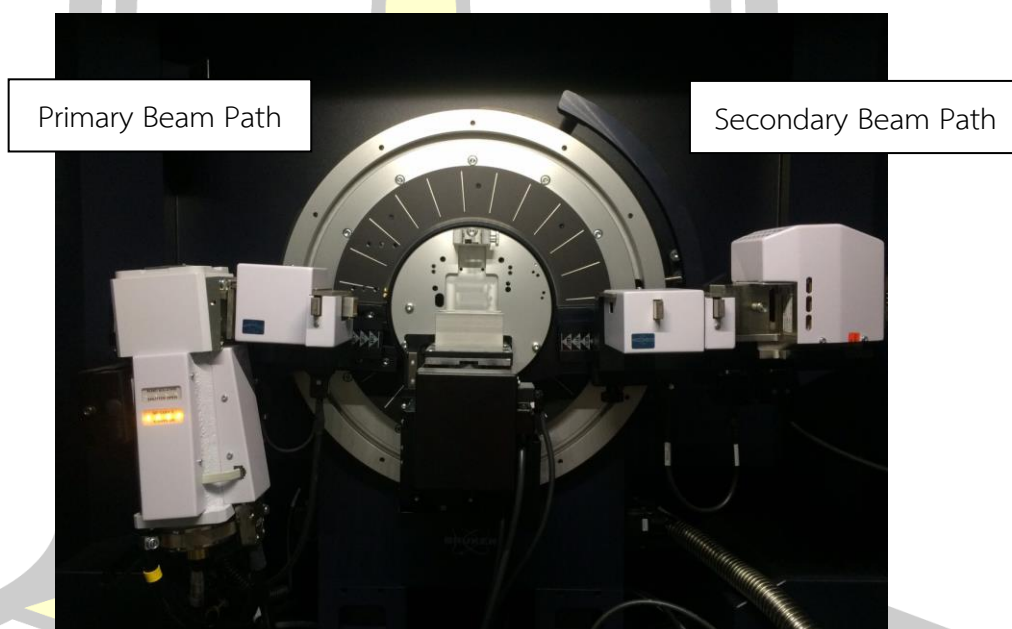
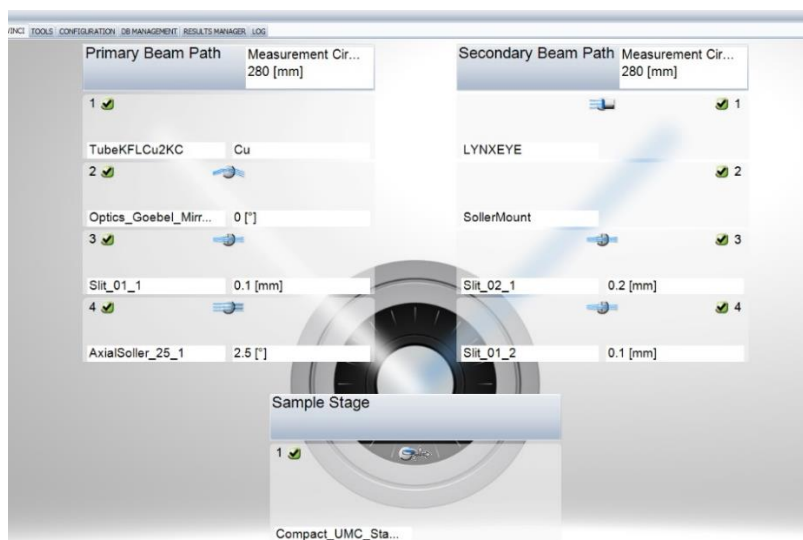
3.5.1 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray reflectometry

เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โหมดการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRR ใช้บริการ ณ หน่วยบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในส่วนนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเริ่มต้นการวิเคราะห์ชิ้นงาน รวมถึงการวิเคราะห์ผล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเทคนิค XRR
1. เปิดโปรแกรม Diffrac commander ลักษณะของโปรแกรมแสดงดังรูป

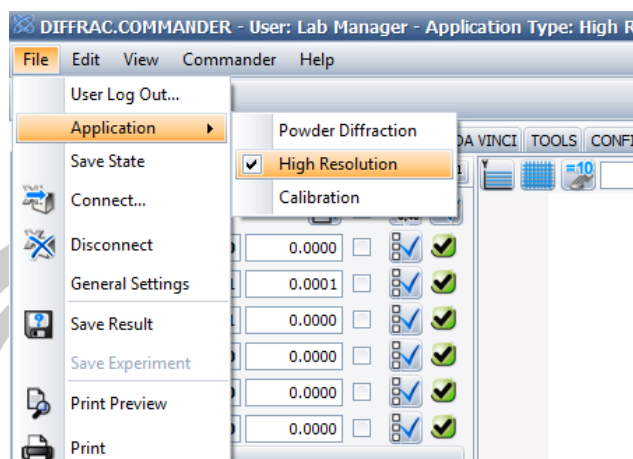


2. ทำการ setup davinci ที่เครื่อง XRD ดังรูป



3. ในหน้าต่างของโปรแกรม ไปที่เมนู File >> Application >> High Resolution

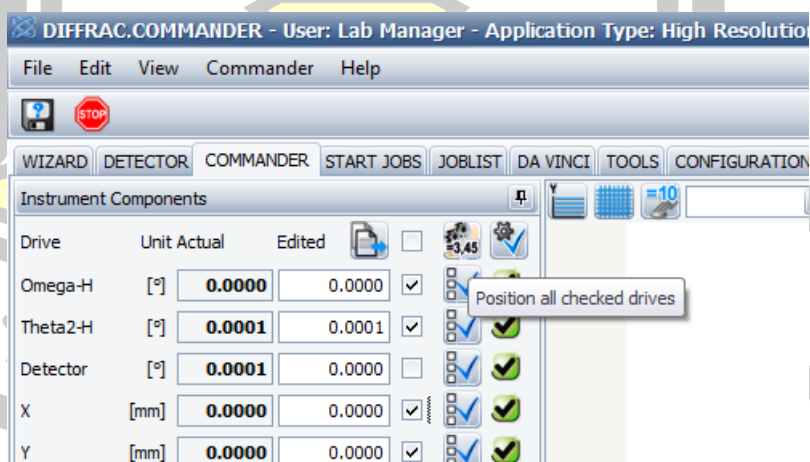
พหุบัน ปณ จิต ชีเว



4. ที่แถบ Commander ให้ Set parameter ดังนี้

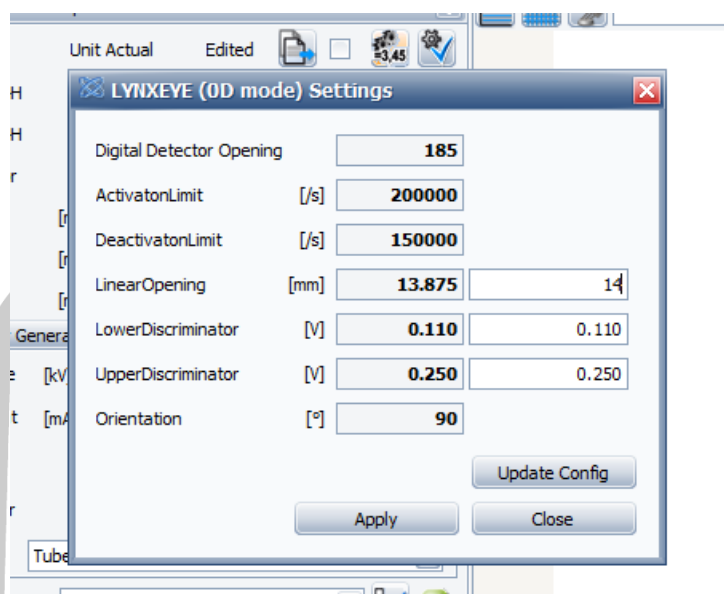
Omega-H	: 0	☒	
Thata2-H	: 0	☒	
Detector	: 0	☐	
X	: 0	☒	
Y	: 0	☒	
Z	: -3	☒	(ขึ้นอยู่กับความสูงของชิ้นงาน)

จากนั้นกดยืนยันค่า Parameter ที่ Set ไว้ที่สัญลักษณ์  (Position and checked drives)



5. เลือกโหมดของ Detector เป็น LYNXE (0D mode)

6. คลิกที่สัญลักษณ์  ข้างโหมด Detector >> Linear Opening >> ใส่ค่าเป็น 14 mm



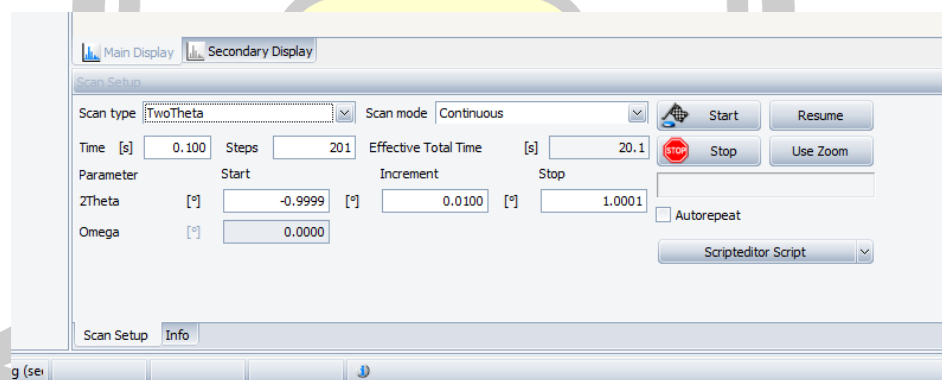
7. ที่แถบ Scan Setup ให้ Set parameter ดังนี้

Scan type : Two Theta

Scan mode : Continuous

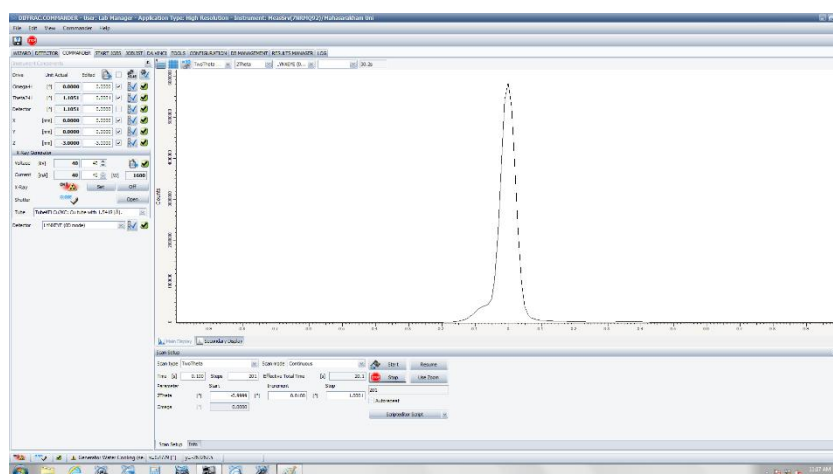
Time : 0.1 (เป็นการสแกนแบบหยาบ)

2Theta : 0 ถึง 1 (Increment 0.01)

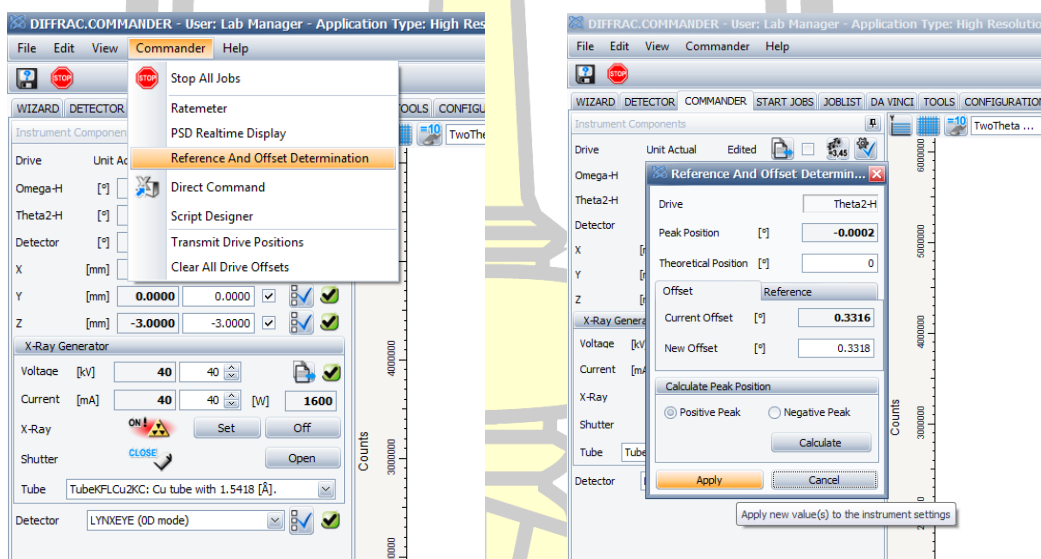


8. กดปุ่ม Start

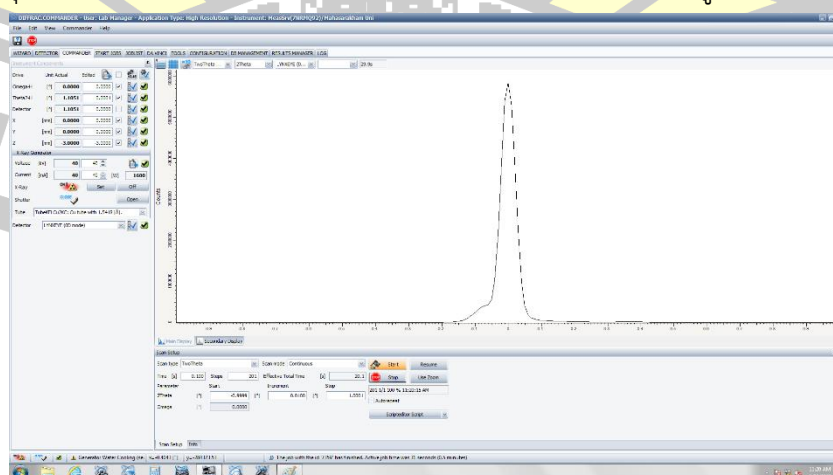
9. จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นพีกเดียว ยอดพีกอยู่ที่ตำแหน่ง 0 (บางครั้งอาจไม่อยู่ที่ตำแหน่ง 0)



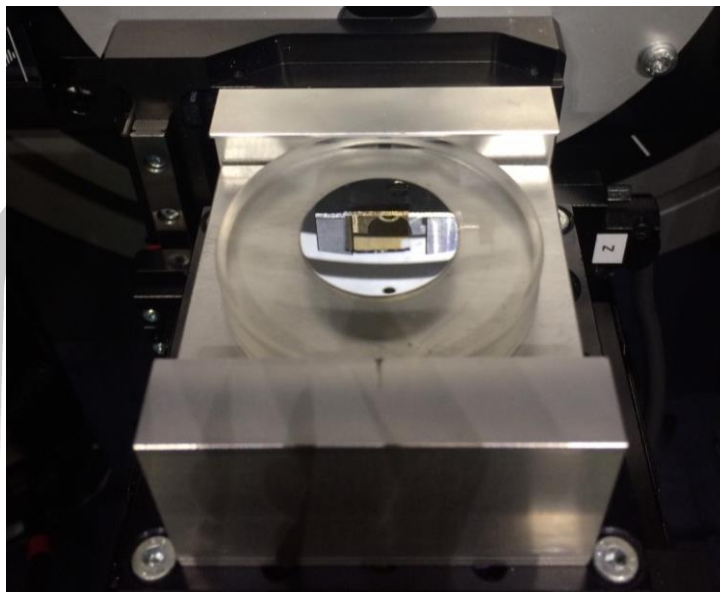
10. ทำการเซตยอดฟิคอีกรอบ โดยคลิกที่เมนู Commander >> Reference and offset determination >> จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา >> Apply >> 



11. กดปุ่ม Start อีกรอบ จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นฟิคเดี่ยว ยอดฟิคอยู่ที่ตำแหน่ง 0



12. ติดตั้งชิ้นงานที่ต้องการวัดบน Stage ของเครื่อง XRD ให้ชิ้นงานอยู่ที่กึ่งกลางของ Stage



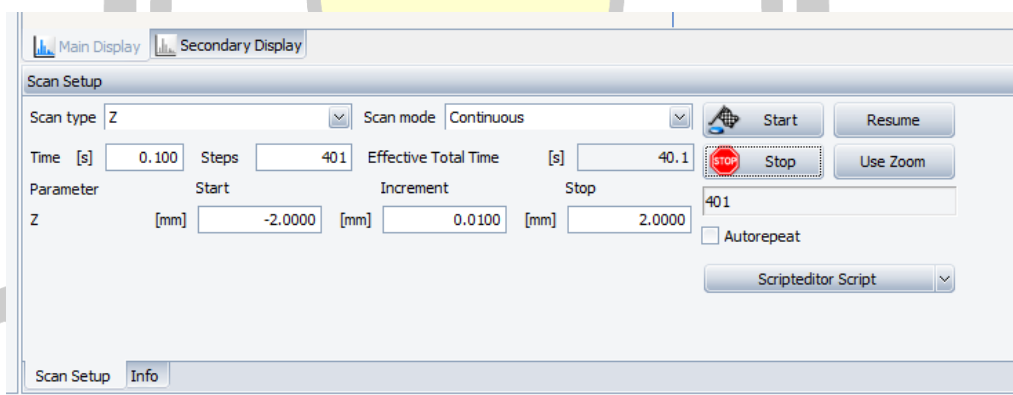
13. ที่แถบ Scan Setup ให้ Set parameter ดังนี้

Scan type : Z

Scan mode : Continuous

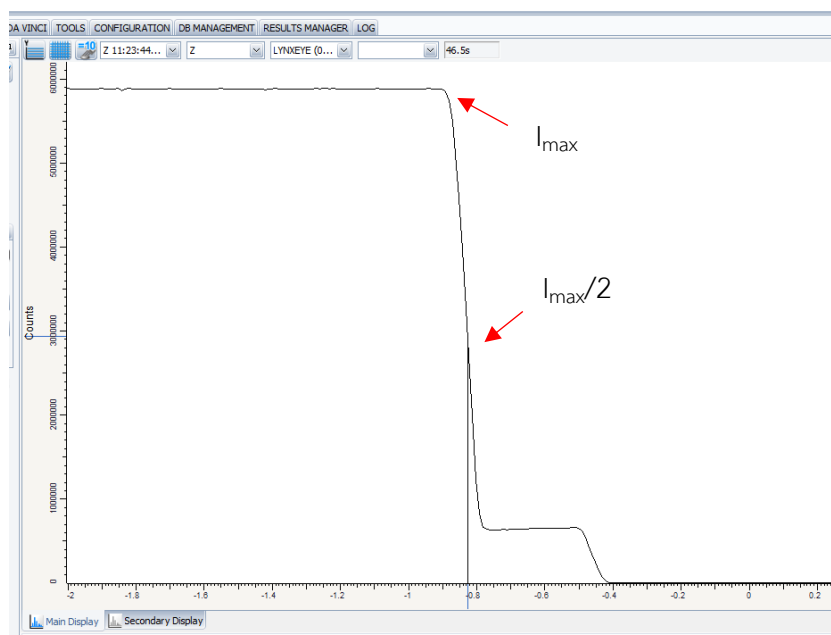
Time : 0.1 (เป็นการสแกนแบบหยาบ)

2Theta : -2 ถึง 2 (Increment 0.01)



14. กดปุ่ม Start

15. จะได้กราฟความเข้มที่มีลักษณะคล้ายหน้าผา ให้ดับเบิ้ลคลิกเส้นกราฟที่ค่าความเข้มครึ่งหนึ่ง ($I_{\max}/2$)



16. ที่แถบ Scan Setup ให้ Set parameter ดังนี้

Scan type : Rocking curve

Scan mode : Continuous

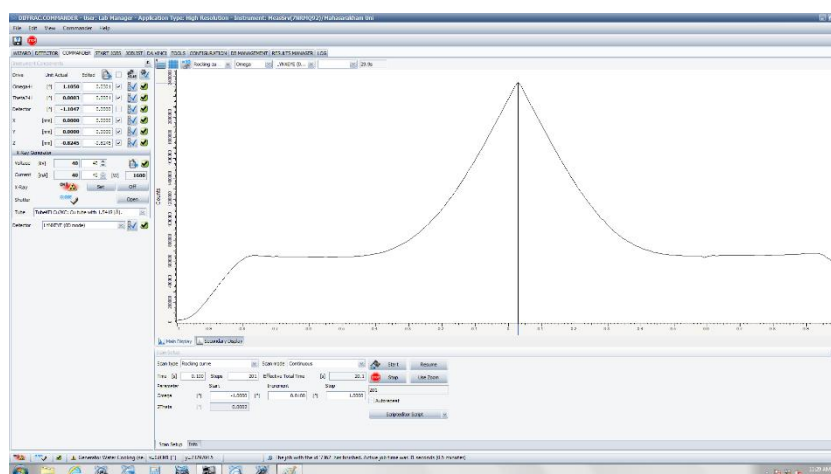
Time : 0.1 (เป็นการสแกนแบบหยาบ)

2Theta : -1 ถึง 1 (Increment 0.01)

17. กดปุ่ม Start

18. จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นพีกเดียว ให้ดับเบิลคลิกที่กึ่งกลางของยอดพีก

พูน ปณ ภัโต ชเว



19. ที่แถบ Scan Setup ให้ Set parameter ดังนี้

Scan type : Z

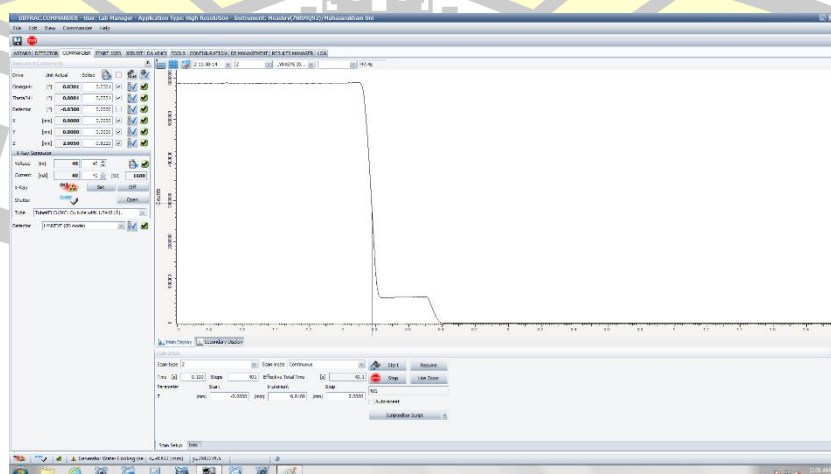
Scan mode : Continuous

Time : 0.1 (เป็นการสแกนแบบหยาบ)

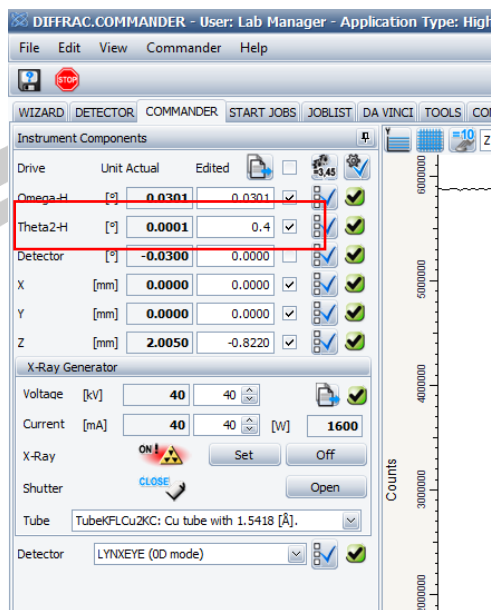
2Theta : -2 ถึง 2 (Increment 0.01)

20. กดปุ่ม Start

21. จะได้กราฟความเข้มที่มีลักษณะคล้ายหน้าผา ให้ดับเบิลคลิกเส้นกราฟที่ค่าความเข้มครึ่งหนึ่ง ($I_{max}/2$)



22. ที่แถบ Commander ให้เปลี่ยนค่า Theta2-H เป็น 0.4



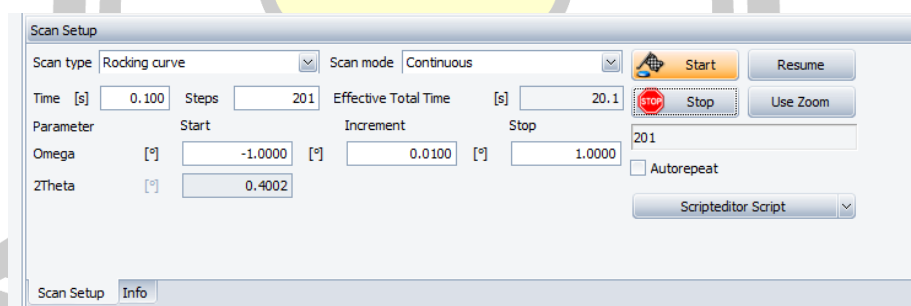
23. ที่แถบ Scan Setup ให้ Set parameter ดังนี้

Scan type : Rocking curve

Scan mode : Continuous

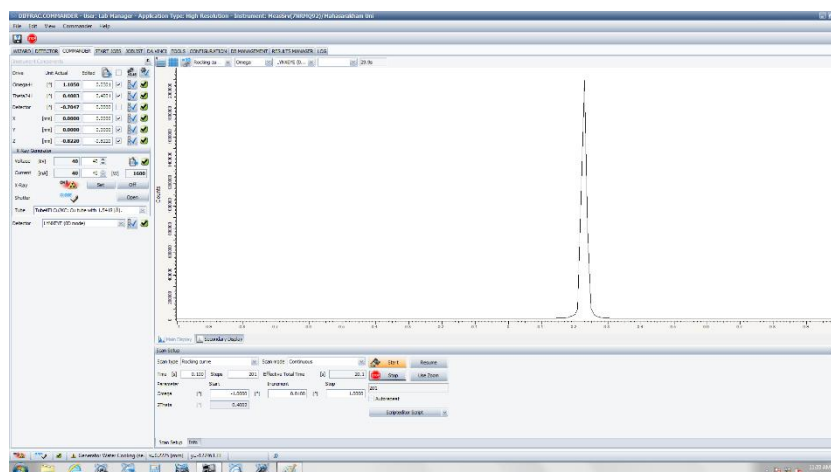
Time : 0.1 (เป็นการสแกนแบบหยาบ)

2Theta : -1 ถึง 1 (Increment 0.01)



24. กดปุ่ม Start

25. จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นพีกเดียว ให้ดับเบิ้ลคลิกที่กึ่งกลางของยอดพีก



26. ที่แถบ Scan Setup ให้ Set parameter ดังนี้

Scan type : 2Theta-Omega

Scan mode : Continuous

Time : 0.5 (เป็นการสแกนแบบละเอียด)

2Theta : 0 ถึง 5 (Increment 0.01)

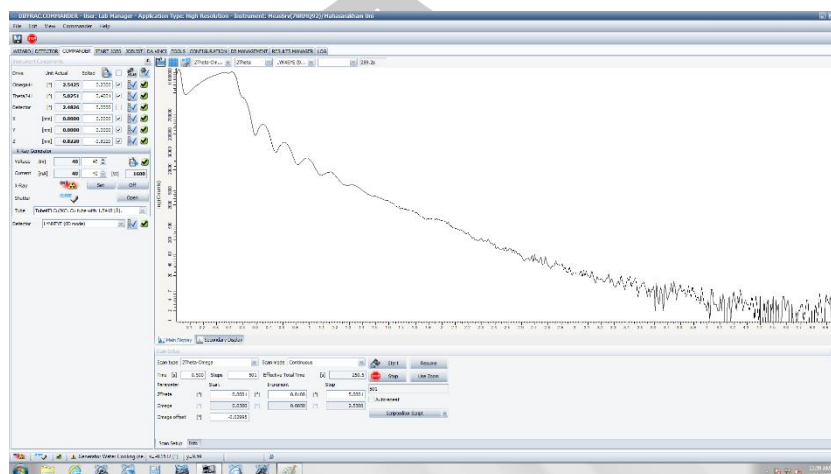
27. เปลี่ยนสเกลของแกน Y เป็นแบบ logY

Drive	Unit	Actual	Edited	Buttons
Omega-H	[°]	2.5425	0.2300	Buttons
Theta2-H	[°]	5.0251	0.4001	Buttons
Detector	[°]	2.4826	0.0000	Buttons
X	[mm]	0.0000	0.0000	Buttons
Y	[mm]	0.0000	0.0000	Buttons
Z	[mm]	-0.8220	-0.8220	Buttons

เปลี่ยนสเกล

28. กดปุ่ม Start

29. จะได้กราฟ XRR ของตัวอย่างที่ทำการวัด



30. Save file โดยใช้สกุล (.raw)

31. เอาชิ้นงานออก

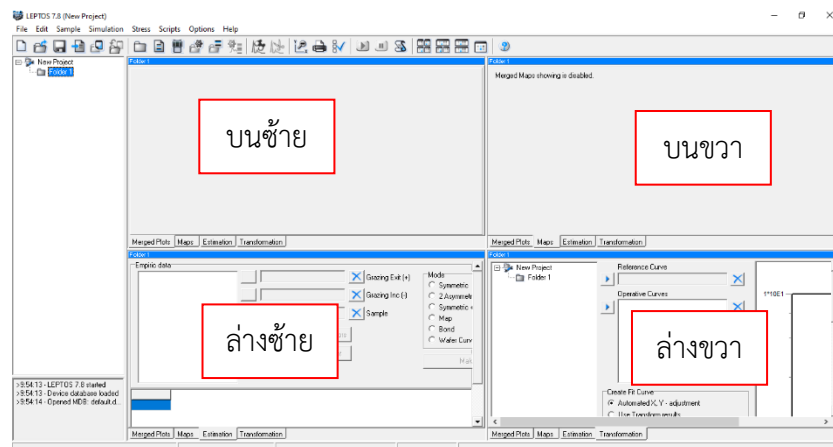
32. ถ้าต้องการวัดตัวอย่างชิ้นใหม่ให้เริ่มที่ขั้นตอนที่ 4 และเปลี่ยนสเกลแกน Y กลับมาเป็นแบบ Counts

○ รายละเอียดขั้นตอนการตีความข้อมูลด้วยโปรแกรม LEPTOS 7.8

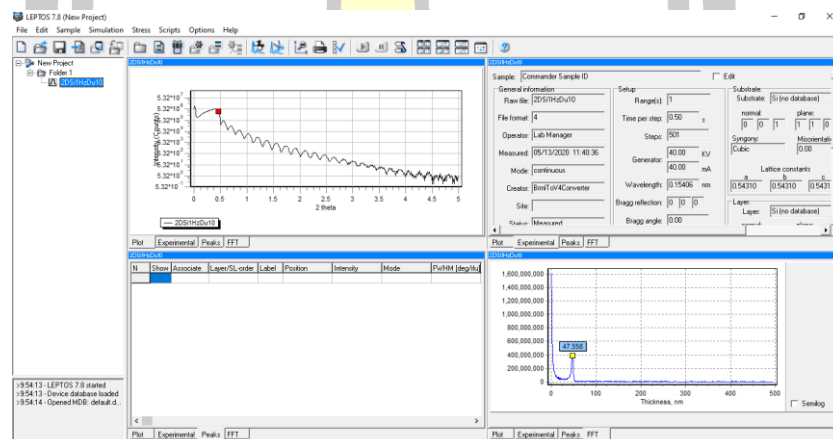
ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRR จะอยู่ในไฟล์ .raw จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยการพิตกราฟจำลองข้อมูลด้วยโปรแกรม LEPTOS 7.8



1. เปิดโปรแกรม LEPTOS 7.8 (จะปรากฏ 4 หน้าต่างย่อยในหน้าโปรแกรม)

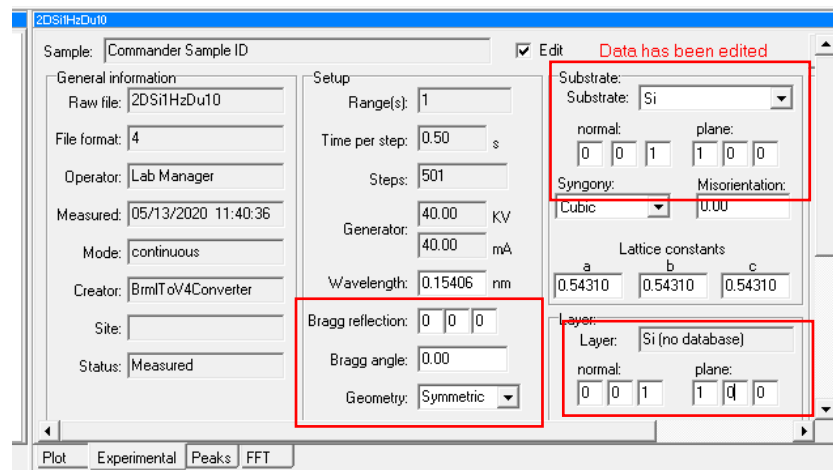


2. เพิ่มข้อมูลที่ต้องการป้อนเข้าสู่โปรแกรม โดยการคลิกที่สัญลักษณ์  (Import) >> เลือกไฟล์ข้อมูลที่ต้องการ (.raw) และกด Open จะปรากฏข้อมูลทีเลือก บนหน้าต่างของโปรแกรม ดังรูป

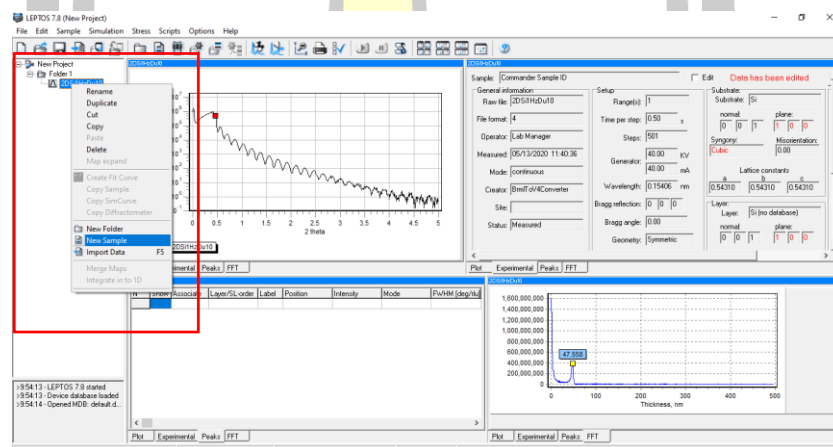


3. ตีเครื่องหมาย ✓ ในช่อง Edit ในหน้าต่างบนขวา และกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

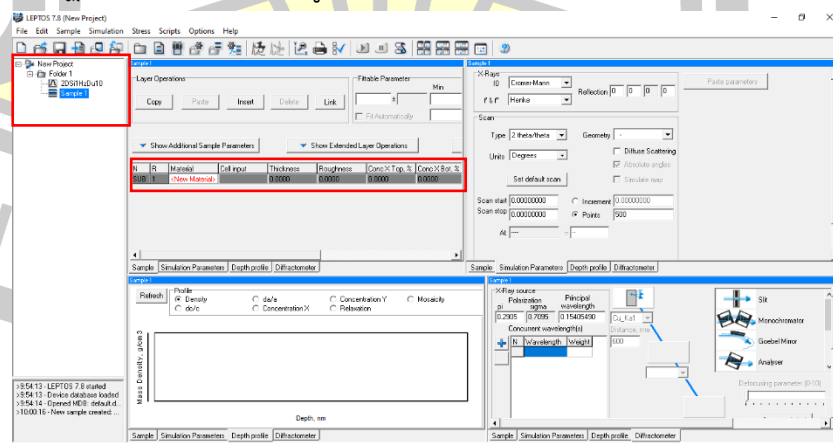
Substrate : Si
 Normal : 0 0 1
 Plane : 1 0 0 (ขึ้นอยู่กับ substrate)
 Bragg reflection : 0 0 0
 Geometry : Symmetric



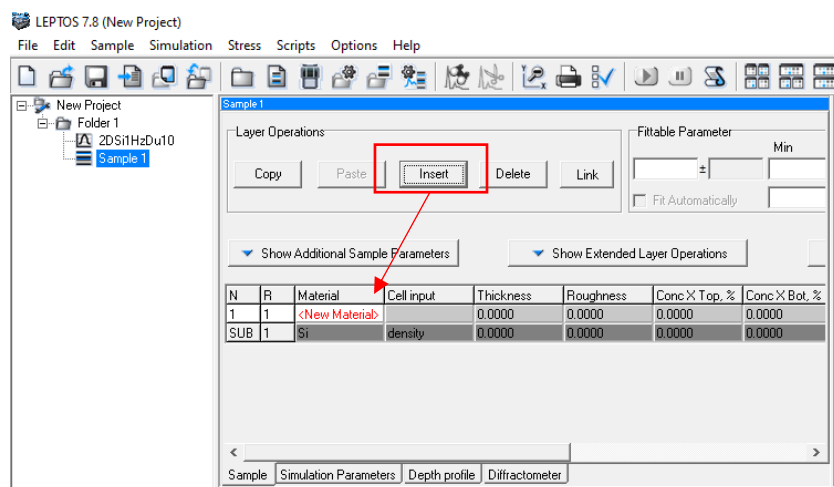
4. หลังจากกำหนดค่าเสร็จแล้วให้ติ๊กเครื่องหมาย ✓ ออกจากช่อง Edit
5. คลิกขวาที่ไฟล์ข้อมูลในแถบด้านข้างฝั่งซ้าย >> New sample



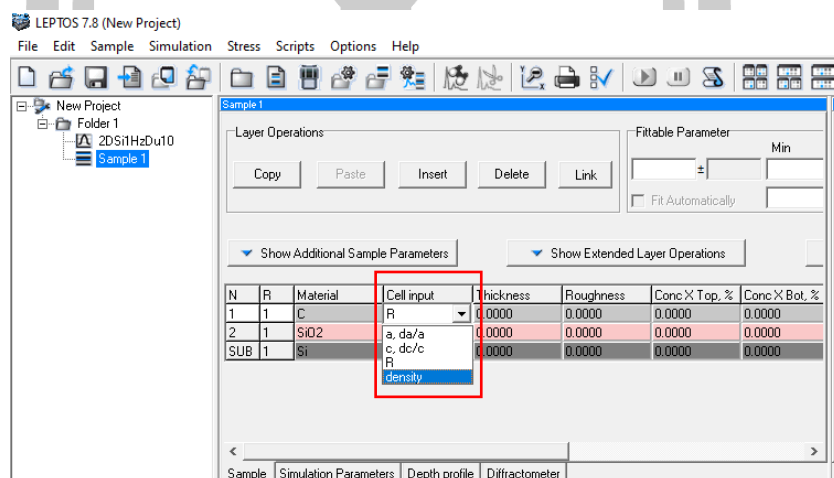
จะปรากฏแถบ sample ขึ้นดังรูป



6. เลือกชนิดของ Substrate ในช่อง Material เป็น Si จากนั้นกด Insert เพื่อเพิ่มชั้น Native oxide และ Insert ชั้นฟิล์ม

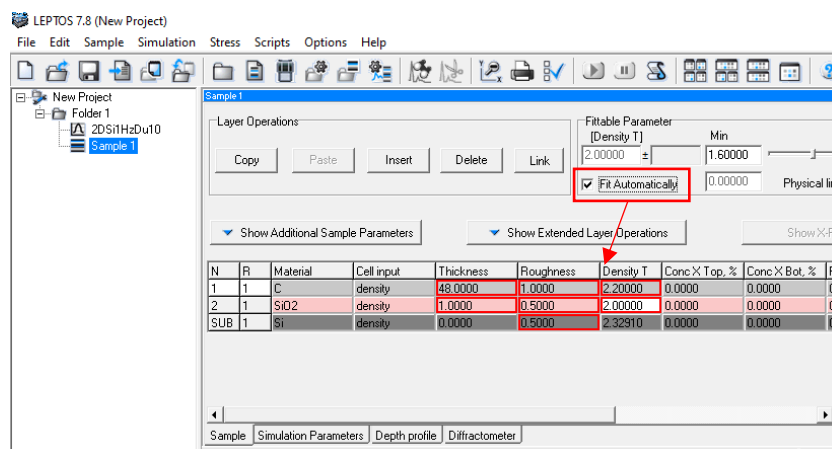


7. เปลี่ยนค่าในช่อง Cell input เป็น Density ทั้งหมด



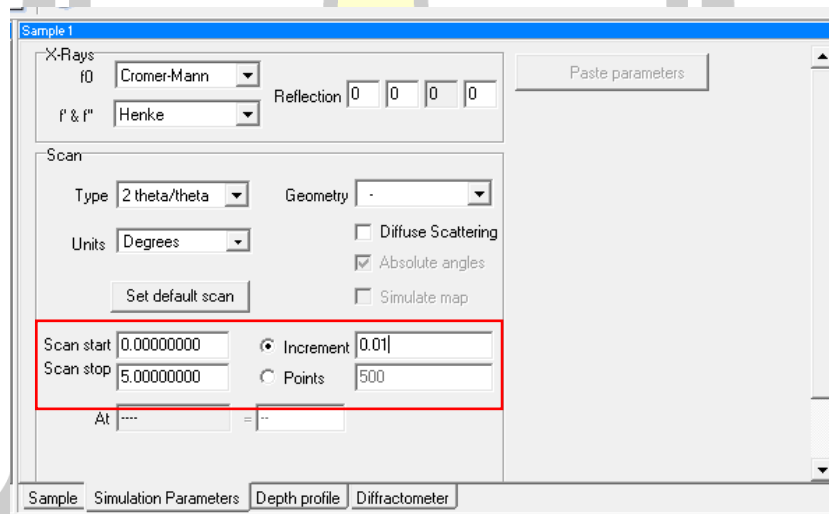
8. กำหนดค่า Thickness, Density และ Roughness โดยประมาณ (Thickness โดยประมาณ สามารถดูได้โดยการคลิกที่ไฟล์ข้อมูล จะปรากฏที่หน้าต่างล่างขวา) และตั้งเครื่องหมาย ✓ ในช่อง Fit automatically ทุกค่าที่ต้องการฟิต จะสังเกตเห็นกรอบสีแดงปรากฏในช่องที่ติ๊กให้ฟิต

พหุบัน ปณ สิโต ชเว

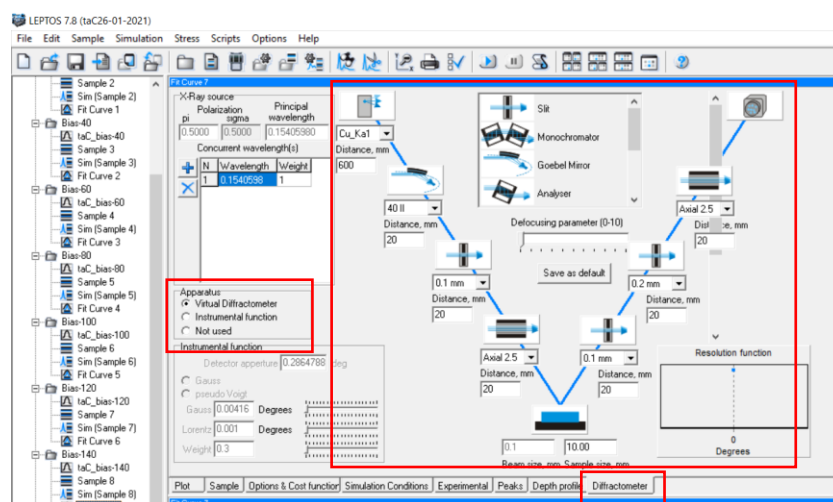


9. กำหนดค่าการสแกนในหน้าต่างบนขวา ดังนี้

Scan start : 0
Scan stop : 5
Increment : 0.01



10. ไปที่แถบ Diffractometer ในหน้าต่างบนขวา และกำหนดค่าในช่อง Apparatus เป็นแบบ Virtual Diffractometer และกำหนดค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามการติดตั้งอุปกรณ์ที่เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่าง รวมถึงกำหนดพื้นที่ของชิ้นงานเพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความแม่นยำ

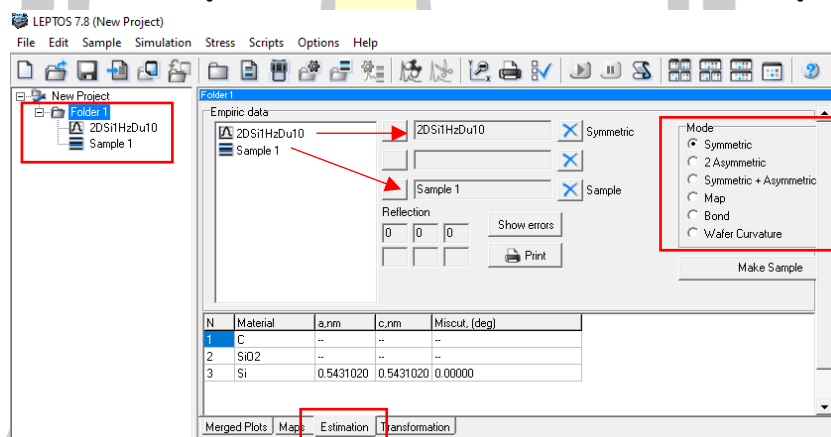


11. คลิก Folder ในแถบซ้ายมือ >> Estimation

เลือก Mode เป็นแบบ Symmetry

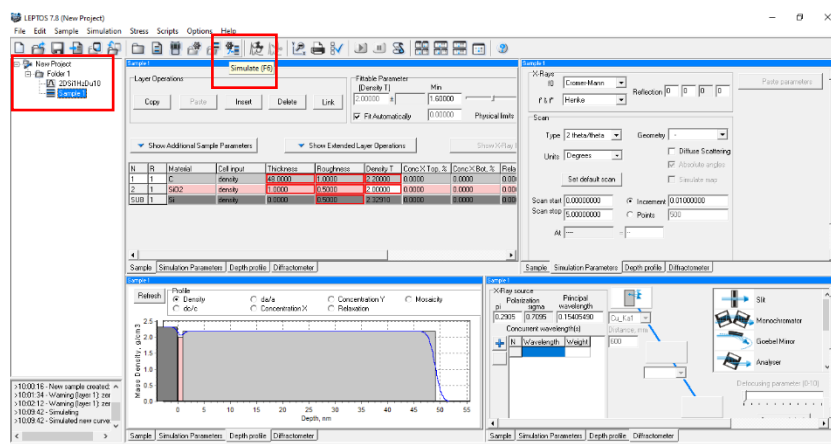
คลิก File ข้อมูล จะขึ้นลูกศรสีน้ำเงิน ให้เลือกไปไว้ที่ช่อง Symmetry >> คลิกที่ลูกศร

คลิก Sample จะขึ้นลูกศรสีน้ำเงิน ให้เลือกไปไว้ที่ช่อง Sample >> คลิกที่ลูกศร



12. คลิกที่ไฟล์ Sample ในแถบซ้ายมือ >> คลิกสัญลักษณ์ (simulate)

พหุ ประสิทธิภาพ

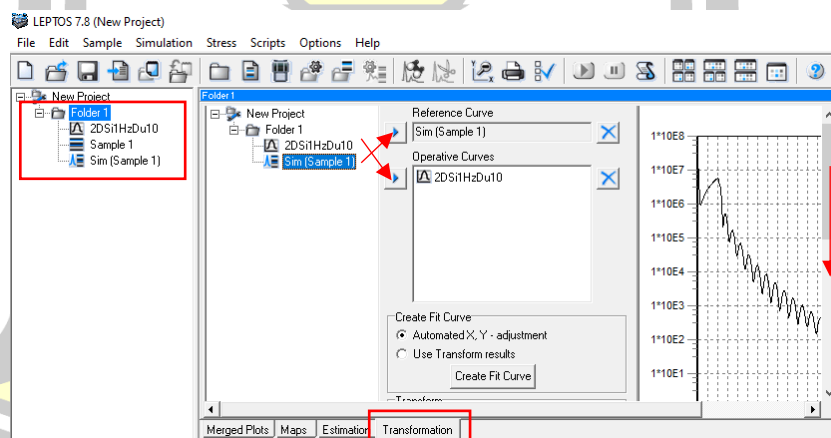


13. คลิก Folder ในแถบซ้ายมือ >> Transformation

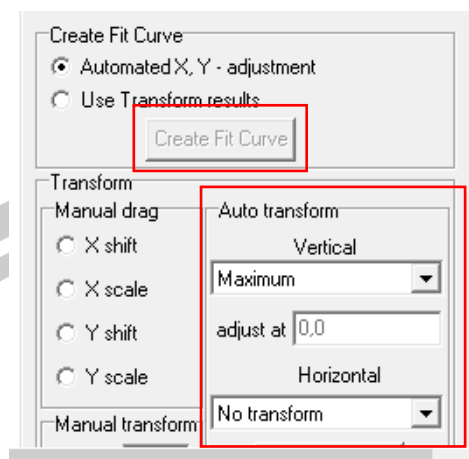
คลิก File ข้อมูล จะขึ้นลูกศรสีน้ำเงิน ให้เลือกไปไว้ที่ช่อง Operative Curves >> คลิกที่ลูกศร

คลิก Sim (sample) จะขึ้นลูกศรสีน้ำเงิน ให้เลือกไปไว้ที่ช่อง Reference Curves >> คลิกที่ลูกศร

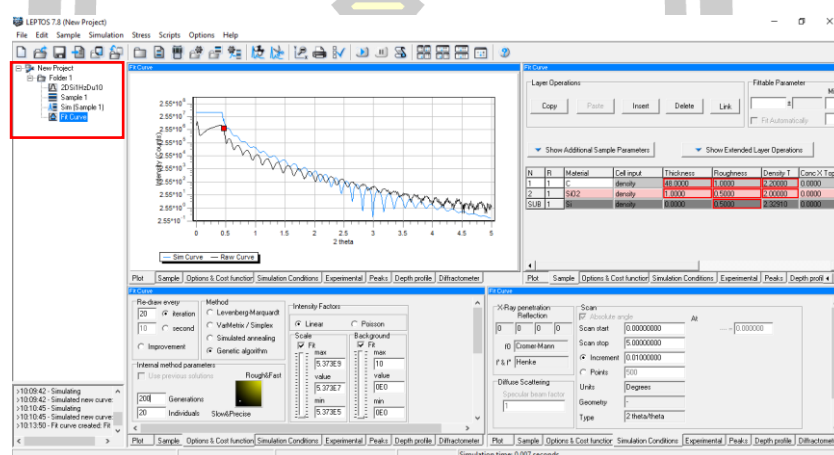
จากนั้นเลื่อนแถบลงมาด้านล่าง ที่แถบ Auto transform ในช่อง Vertical เลือกเป็น Maximum และช่อง Horizontal เลือกเป็น No transform >> Create Fit Curve



พหุบัน ฤทธิ โท ชีเว



14. จะปรากฏไฟล์ Fit Curve ขึ้นที่แถบด้านซ้าย >> คลิกเข้าไปที่ไฟล์นั้น



15. ที่หน้าต่างล่างซ้าย

แถบ Re-draw every เลือกเป็น iteration : 20

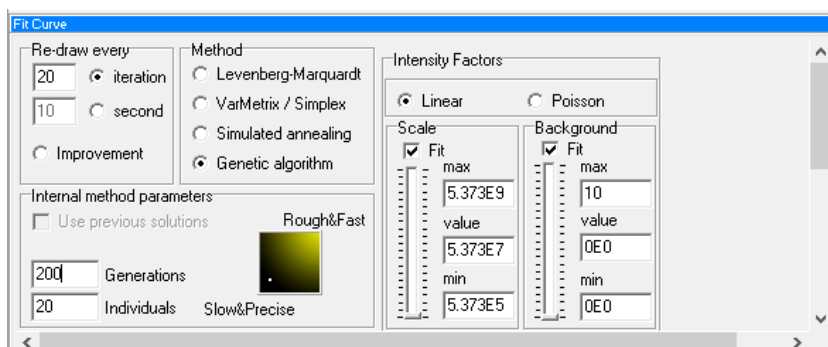
แถบ Method เลือกเป็น Genetic algorithm

แถบ Intensity Factors เลือกเป็น Linear >> ตี๊ก ✓ ในช่อง Scale Fit และช่อง Background Fit

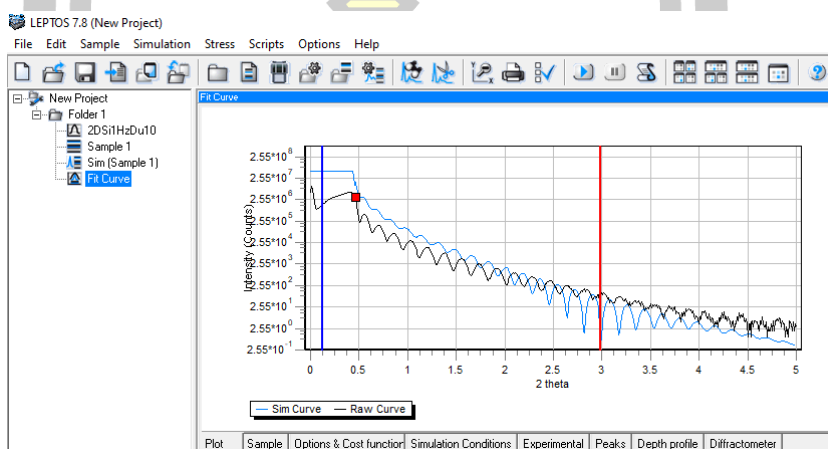
แถบ Internal method parameters

ช่อง Generations ใส่ค่าเป็น 200 (ปรับเปลี่ยนได้ตามความละเอียดที่ต้องการ)

ช่อง Individuals ใส่ค่าเป็น 20

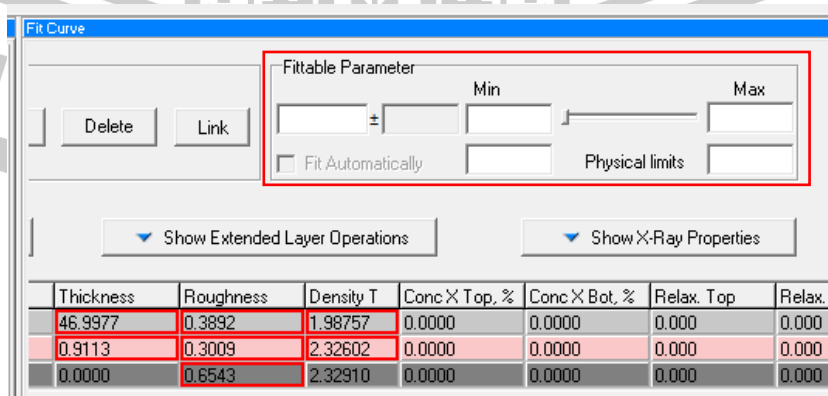


16. เลือกช่วงที่ต้องการฟิตโดยการกด Shift ค้างไว้ และคลิกเลือกจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายในกราฟที่หน้าต่างบนซ้าย (จะขึ้นเส้นสีน้ำเงินสำหรับจุดเริ่มต้น และเส้นสีแดงสำหรับจุดสุดท้ายที่ต้องการฟิต)



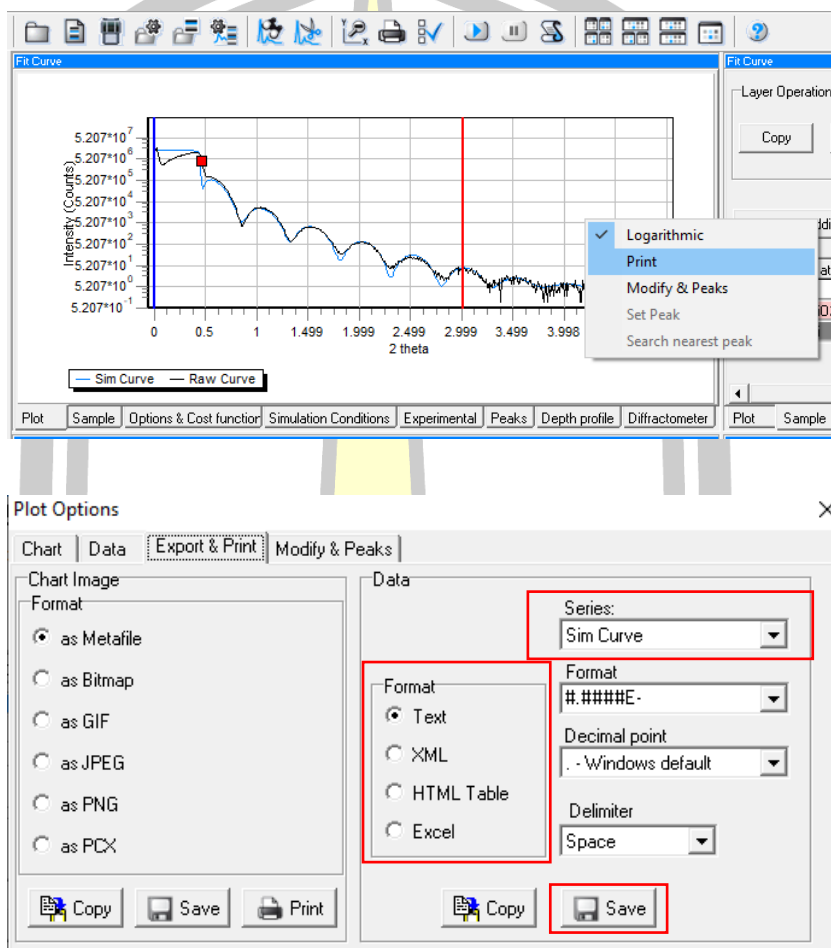
17. คลิกที่สัญลักษณ์  (Strat Fit) เพื่อเริ่ม Simulate

18. ถ้า Simulate แล้วเส้นกราฟยังไม่ทับกัน สามารถปรับช่วงการ Fit ของ Thickness, Roughness และ Density ได้ที่หน้าต่างบนขวา โดยการกำหนดค่า Min, Max แล้วจึงทำการ Simulate อีกครั้ง หรือจนกว่าจะได้ข้อมูลที่ดีที่สุด



19. บันทึกไฟล์ข้อมูลเก็บไว้

20. กรณีจะดึงข้อมูลที่ทำกราฟแล้วออกไปพล็อตกราฟให้คลิกขวาที่กราฟในหน้าต่างบนซ้าย
>> Print >> จะปรากฏหน้าต่างขึ้น >> เลือก Format ที่ต้องการ >> เลือก Series ที่ต้องการ >> Save

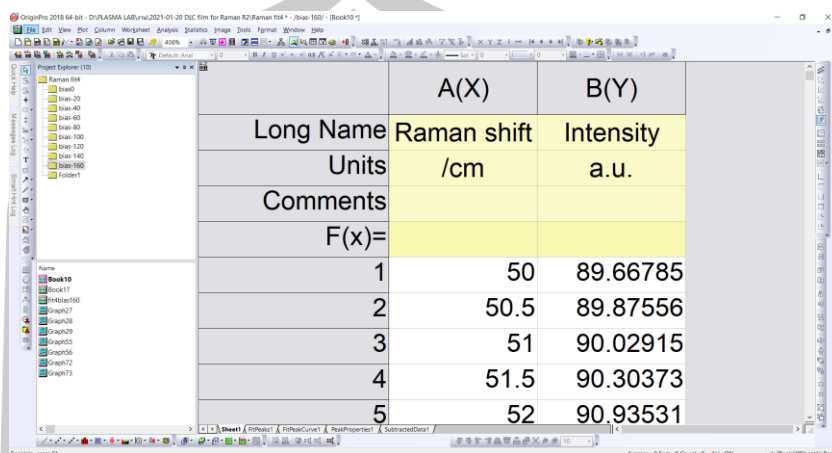


21. สามารถนำข้อมูลที่ Save ไปพล็อตกราฟได้

3.5.2 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

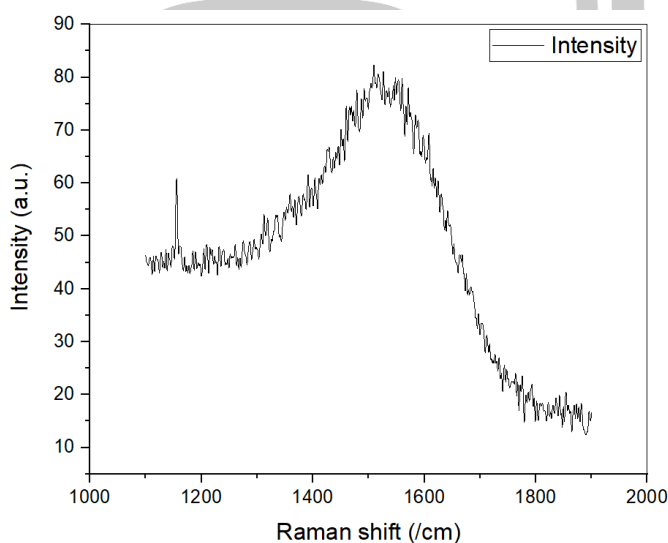
ข้อมูลที่จะจากกระบวนการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ที่ใช้ บริการ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จะได้ข้อมูลการกระเจิงแสงสเปกตรัมรามานกับความเข้มของของการกระเจิงแสงในรูปแบบไฟล์ข้อมูล X-Y (.dpt) จากนั้นจะนำไฟล์ข้อมูลมาทำการปรับเส้นโค้งเพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์ม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. นำข้อมูลจากไฟล์ .dpt ไปเปิดทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OriginPro 2018 64-bit โดยให้คอลัมน์ X เป็นค่าสเปกตรัมรามาน คอลัมน์ Y เป็นความเข้มของการกระเจิง

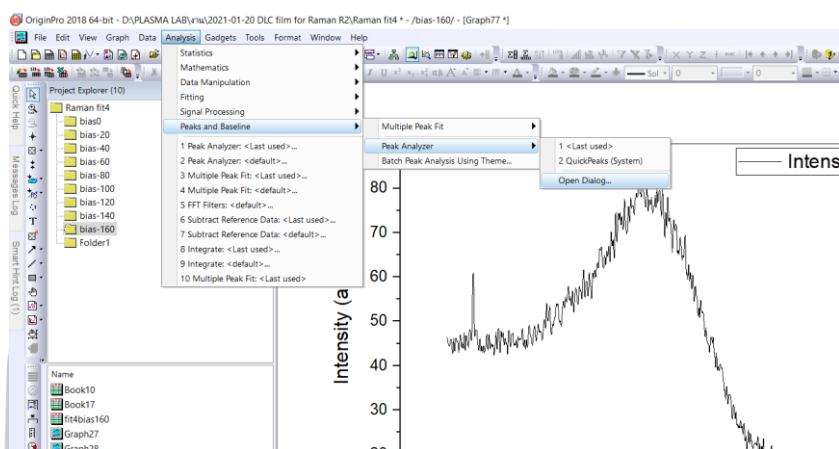


	A(X)	B(Y)
Long Name	Raman shift	Intensity
Units	/cm	a.u.
Comments		
F(x)=		
1	50	89.66785
2	50.5	89.87556
3	51	90.02915
4	51.5	90.30373
5	52	90.93531

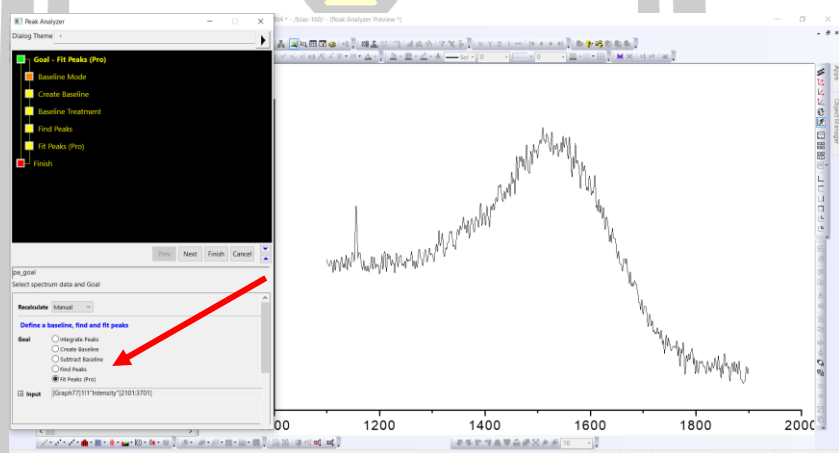
2. ในกรณีฟิล์มคาร์บอน รูปแบบการตอบสนองของการกระเจิงแสงต่อสเปกตรัมรามานจะอยู่ในช่วง $1000 - 2000 \text{ cm}^{-1}$ และในกรณีฟิล์มคาร์บอนชนิด ta-C ที่มีความบางซึ่งส่งผลต่อความเข้มของรูปแบบการกระเจิงแสง เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนของสัญญาณจึงทำการเลือกช่วงสเปกตรัมรามานเพื่อทำการปรับเส้นโค้งในช่วง $1100 - 1900 \text{ cm}^{-1}$



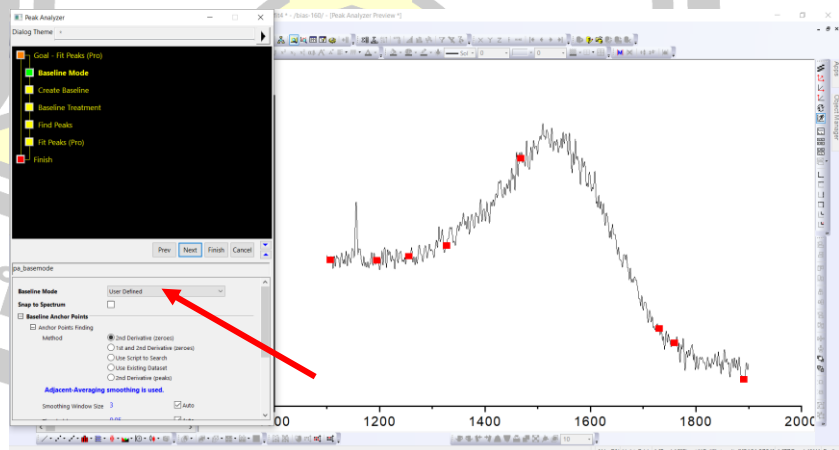
3. เริ่มการปรับเส้นโค้ง โดยไปที่หน้าต่าง Analysis >> Peak and baseline >> Peak analyzer >> Open Dialog



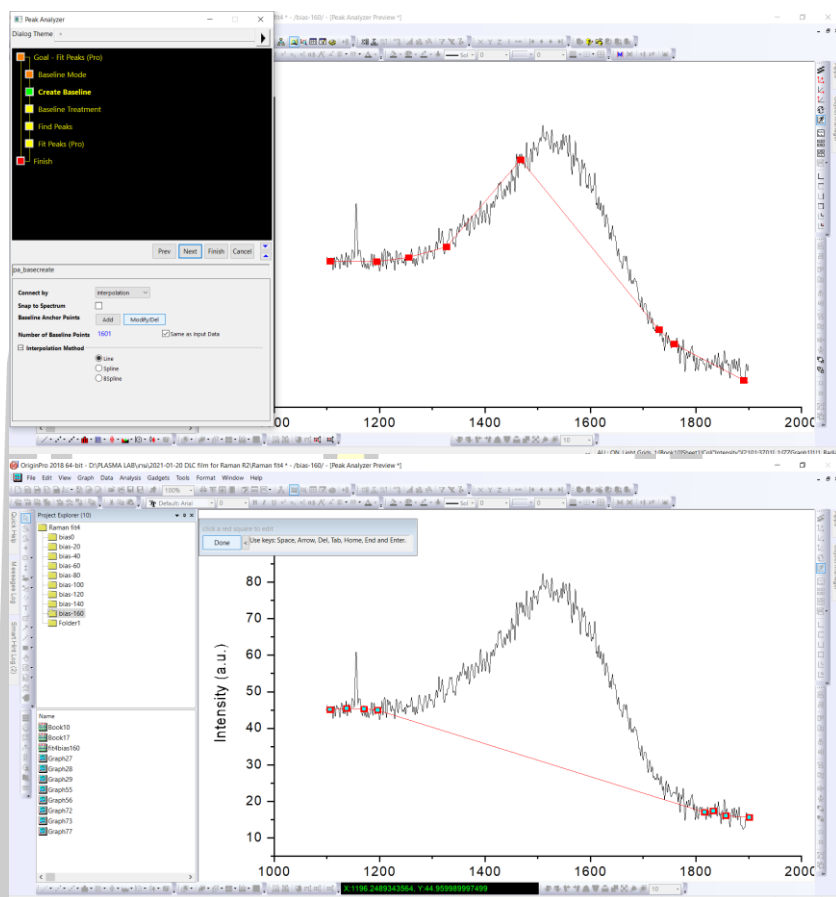
4. เลือกรูปแบบการปรับเส้นฐาน โดย Fit Peaks (Pro) >> Next



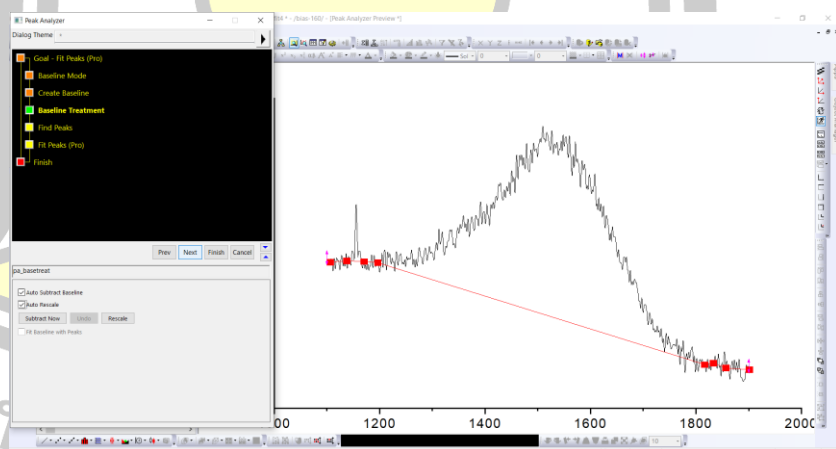
5. รูปแบบการเลือกตำแหน่งเส้นฐานอ้างอิง User Defined >> Next



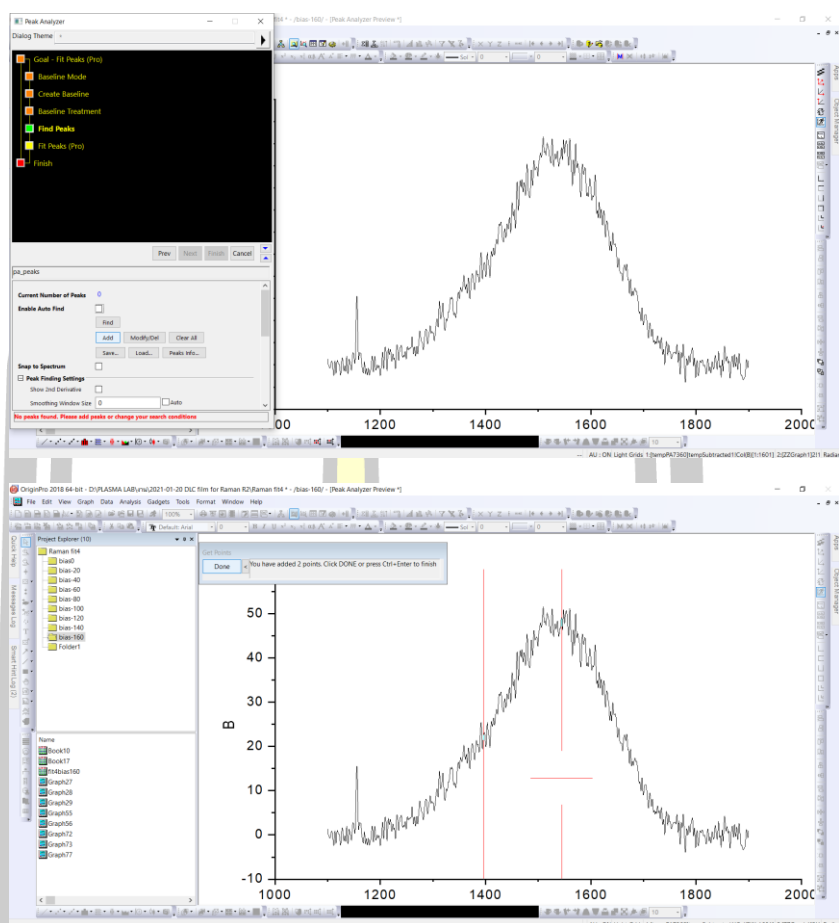
6. ปรับจุดเส้นฐานด้วยการเลือก Modify เมื่อเสร็จแล้วเลือก Done >> Next



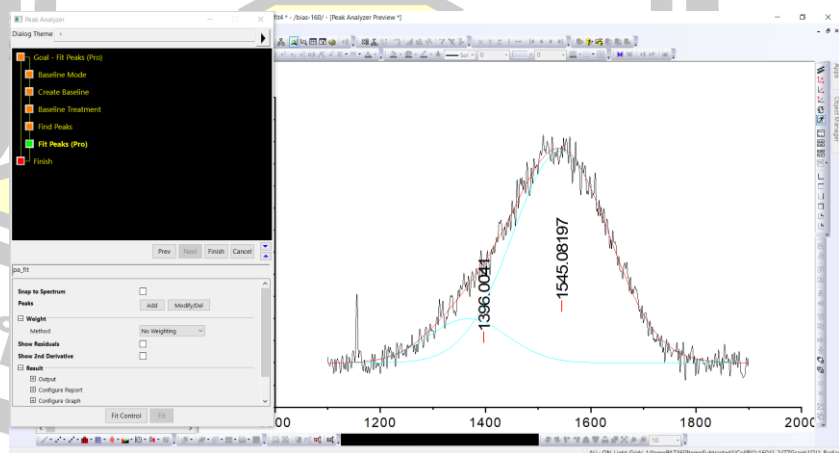
7. เลือกรูปแบบ Auto Subtract Baseline และ Auto Rescale >> Next

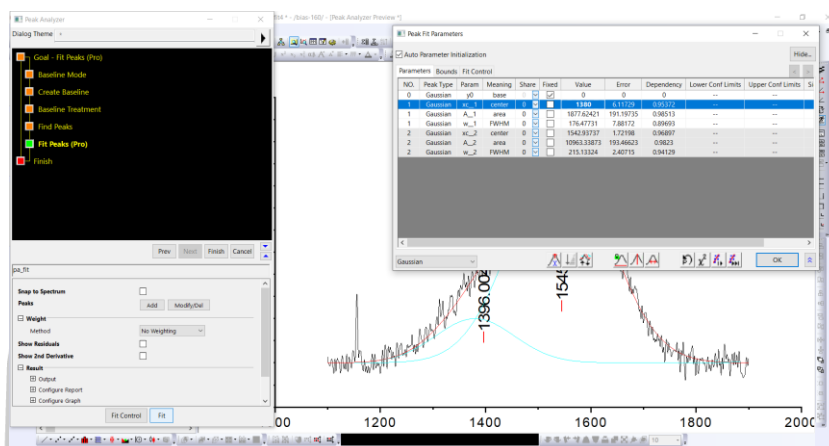


8. ทำการกำหนดพีคหลักเพื่อให้โปรแกรมทำการจำลองเส้นโค้งในเบื้องต้น โดยในกรณีฟิล์ม ta-C จะคลิกเลือกที่ตำแหน่งสเปกตรัมรามาาน 1400 cm^{-1} และ 1550 cm^{-1} จากนั้นเลือก Done >> Next

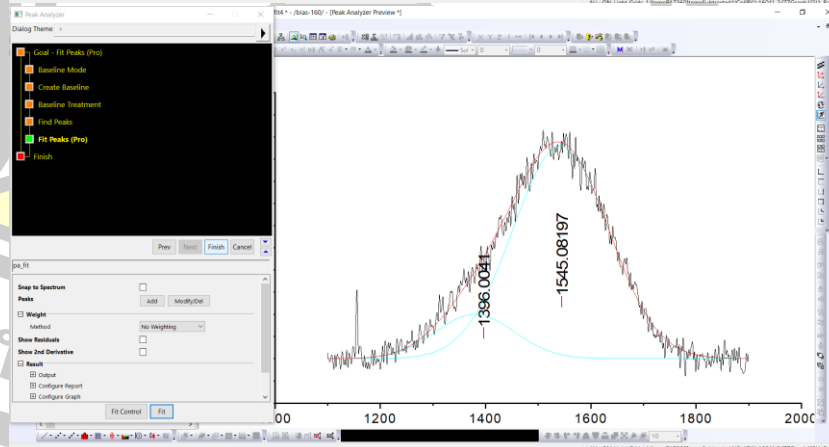
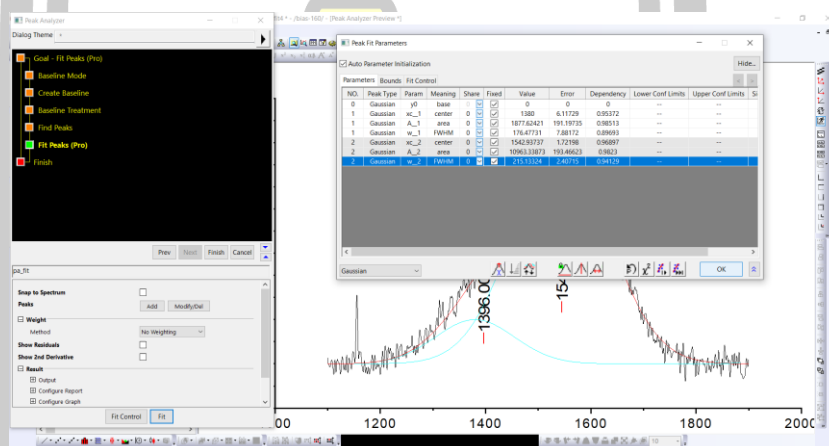


9. เลือก Fit เพื่อให้โปรแกรมปรับเส้นโค้งอัตโนมัติ และ Fit Control สำหรับการปรับเส้นโค้งให้มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับสัญญาณข้อมูล

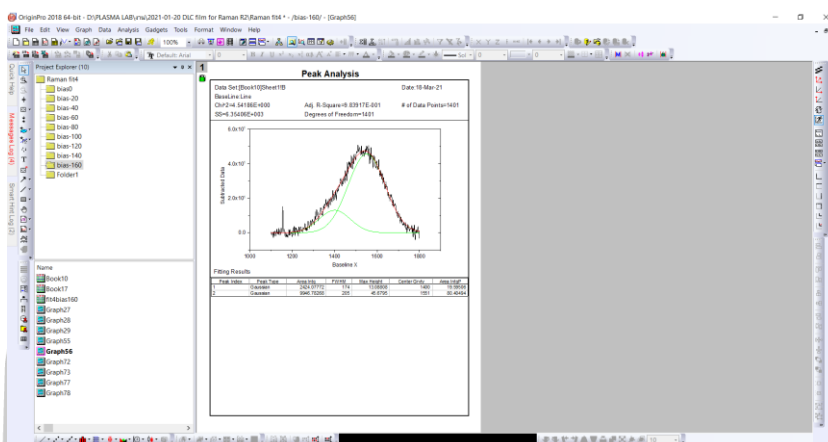




10. เมื่อตำแหน่งของเส้นโค้งที่ทำการปรับ ใกล้เคียงกับเส้นสัญญาณข้อมูลมากที่สุดแล้ว ให้กด Fixed ที่ค่าของข้อมูลทุกค่า >> Finish



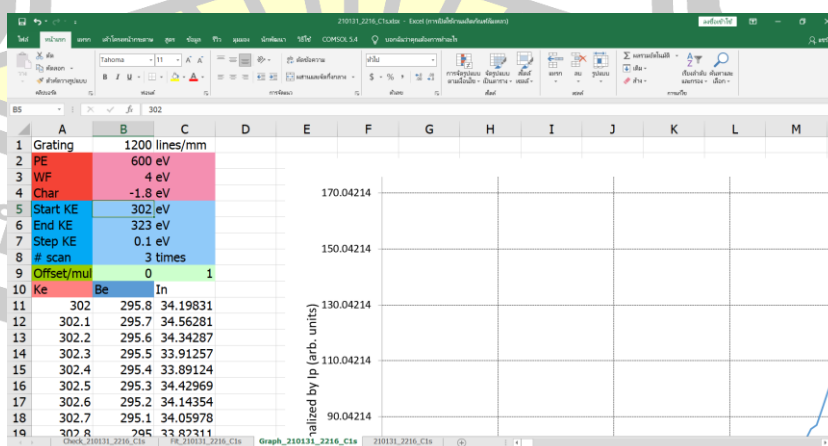
11. ค่าของข้อมูลต่าง ๆ จากการปรับเส้นโค้งจะแสดงถึงค่าตำแหน่ง ค่าพื้นที่ใต้เส้นโค้ง และค่าความกว้างพีคที่กึ่งหนึ่งของเส้นโค้ง ของพีค D และพีค G ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณสัดส่วน sp^2 และ sp^3 ต่อไป



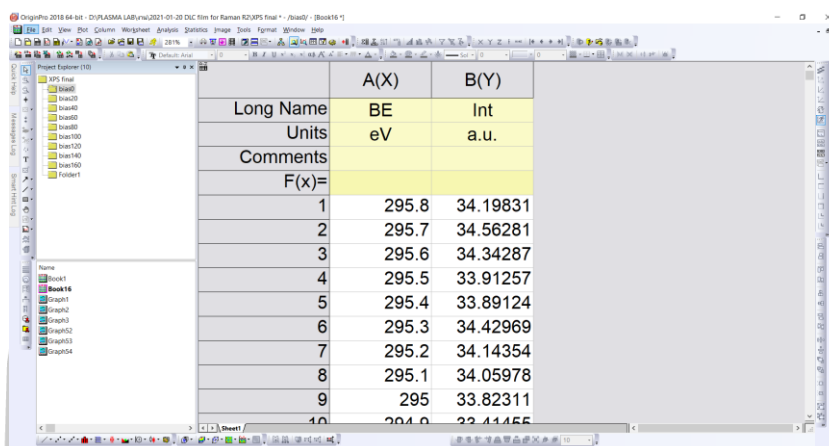
3.5.3 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy

กระบวนการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XPS ที่ใช้บริการ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ข้อมูลที่ได้มาจะเป็นสเปกตรัม XPS ช่วงคลื่นการสแกนแบบกว้าง และสเปกตรัมช่วงของคาร์บอน C1s กับออกซิเจน O1s ซึ่งถูกปรับค่าพลังงานจลน์เป็นพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะด้วยโปรแกรม Macro Excel ที่เขียนรหัสข้อมูลโดยสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ดังนั้น ข้อมูลจะถูกนำมาปรับเส้นโค้งด้วยโปรแกรม Origin Pro 2018 64-bit เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนครีستลอร์ sp^2 กับ sp^3 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ในขั้นตอนการวิเคราะห์ฟิล์ม ta-C จะเปิดไฟล์ข้อมูลสเปกตรัม C1s ด้วยโปรแกรม Macro Excel (.xlsx)

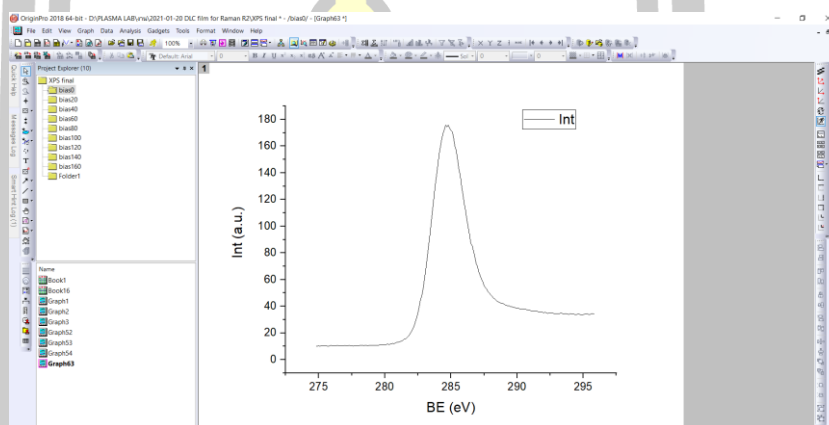


2. นำข้อมูลไปทำการปรับเส้นโค้งด้วยโปรแกรม Origin Pro 2018 64-bit ให้แกนนอนเป็นค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ และแกนตั้งเป็นความเข้มของสเปกตรัม

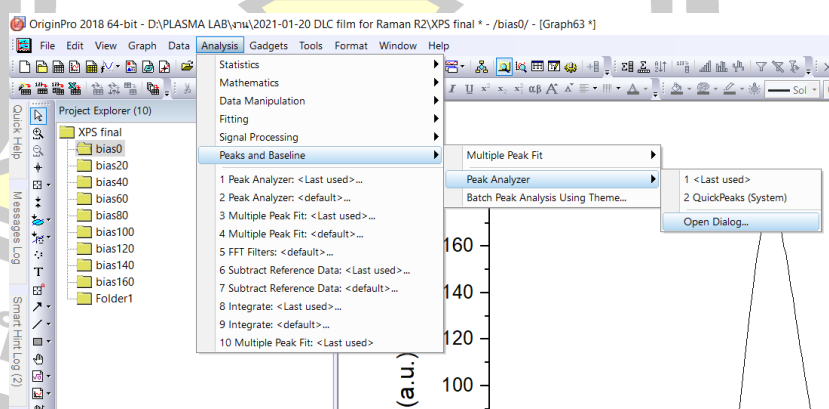


	A(X)	B(Y)
Long Name	BE	Int
Units	eV	a.u.
Comments		
F(x)=		
1	295.8	34.19831
2	295.7	34.56281
3	295.6	34.34287
4	295.5	33.91257
5	295.4	33.89124
6	295.3	34.42969
7	295.2	34.14354
8	295.1	34.05978
9	295	33.82311
10	294.9	33.41455

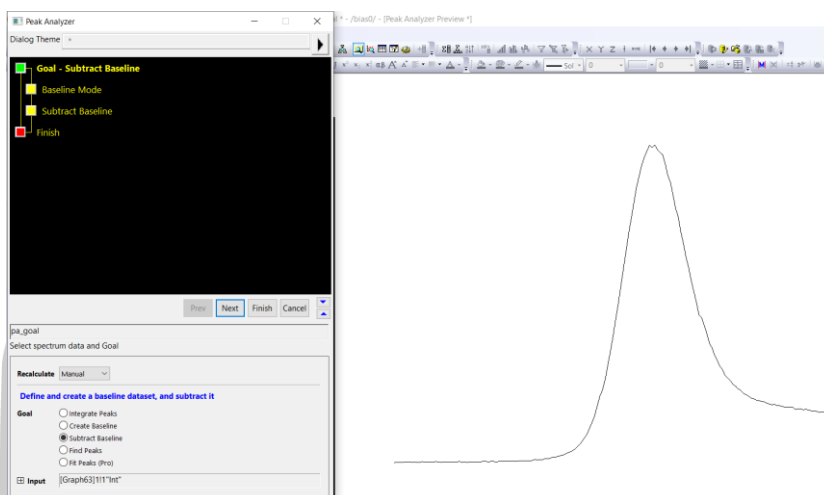
3. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ของสเปกตรัม XPS ของคาร์บอน C1s ได้ดังรูป



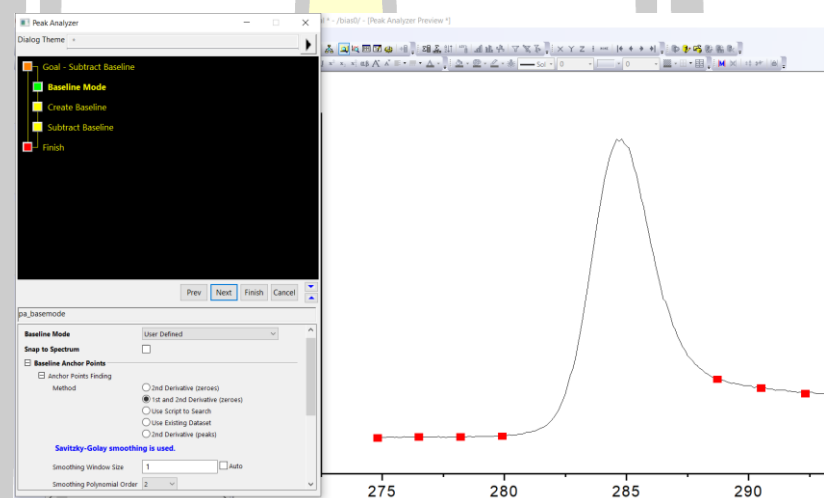
4. ทำการปรับเส้นฐานโดยไปที่หน้าต่าง Analysis >> Peak and Baseline >> Peak Analyzer >> Open Dialog



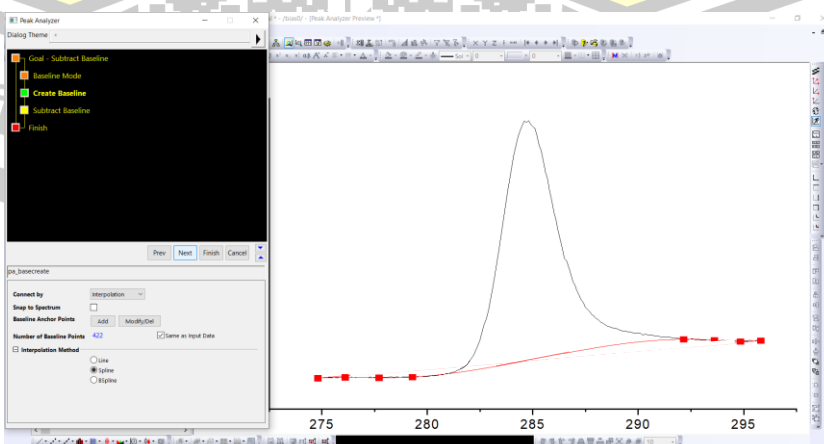
5. เลือกรูปแบบ Subtract Baseline >> Next



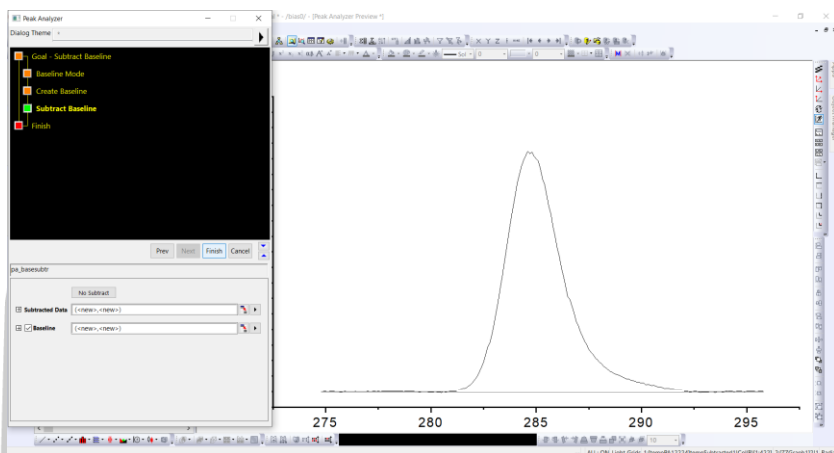
6. เลือกรูปแบบการปรับเส้นฐานเป็นแบบ Savitzky-Golay smoothing ; smoothing window เท่ากับ 1, smoothing polynomial order เท่ากับ 2, Threshold เท่ากับ 0.05
>> Next



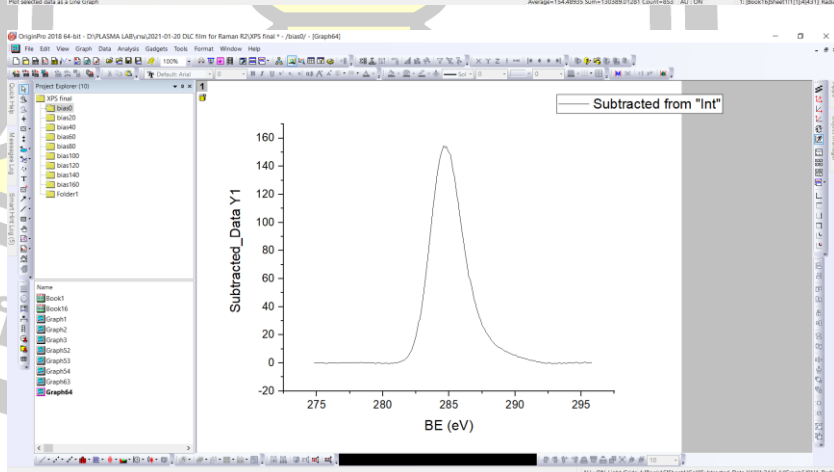
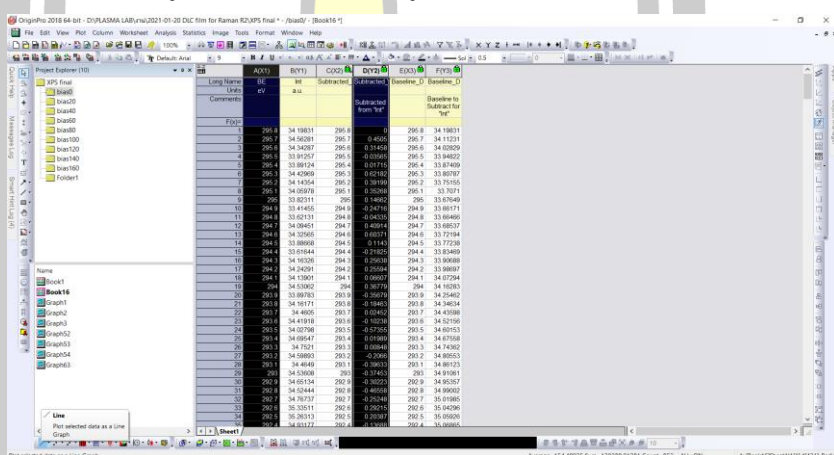
7. ปรับกระบวนการแก้ไขเส้นฐานเป็นแบบ Spline >> Modify ปรับจุดเส้นฐาน >> Done >> Next



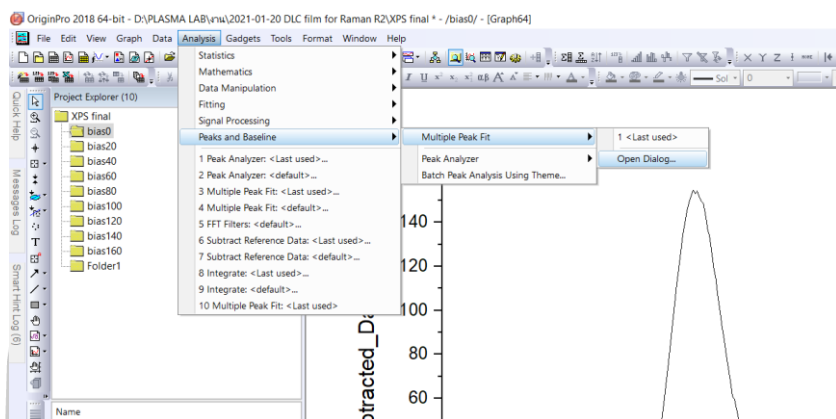
8. ปรับเส้นฐาน Subtract >> Finish



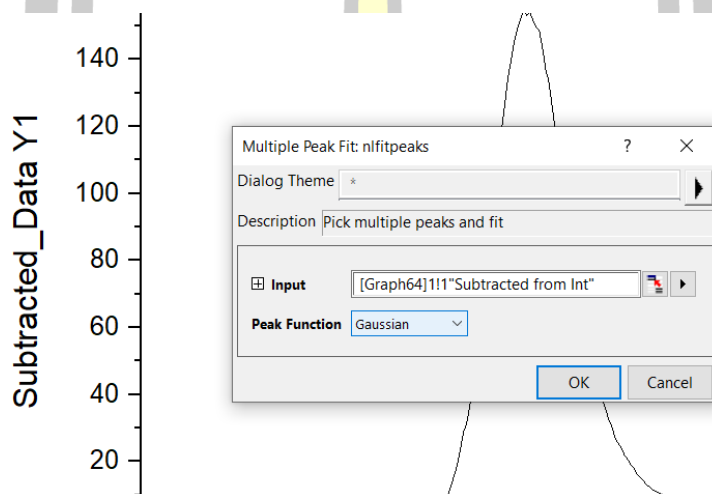
9. พล็อตกราฟพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนกับค่าความเข้มที่ผ่านกระบวนการปรับเส้นฐานแล้ว คอลัมน์ข้อมูลและกราฟ แสดงดังรูป



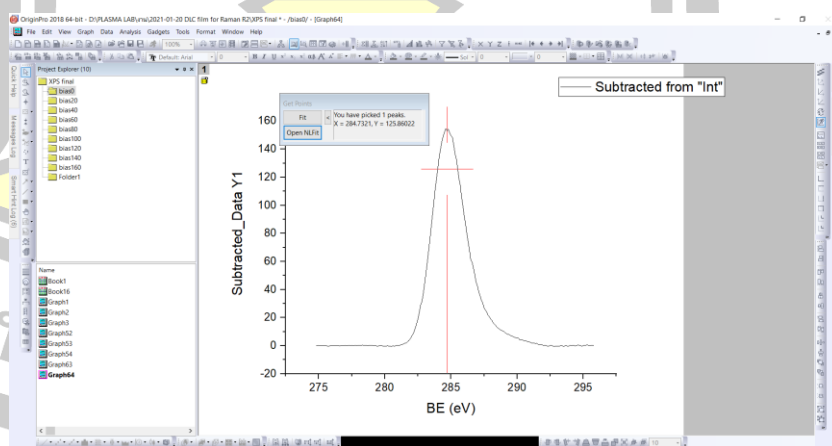
10. ปรับเส้นโค้งเพื่อหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางด้วยเส้นโค้งเกาส์เซียน Analyzer >> Peak and Baseline >> Multiple Peak >> Open Dialog



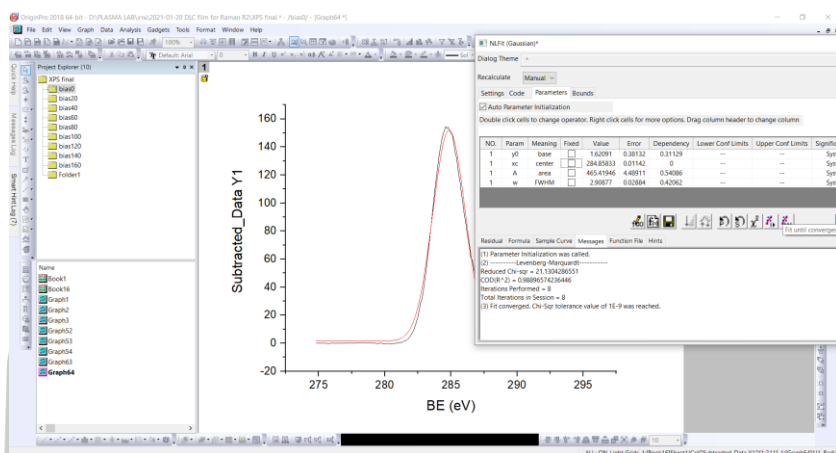
11. เลือกฟังก์ชันเส้นโค้งเป็นแบบ Gaussian >> OK



12. คลิกเลือกตำแหน่งเพื่อปรับเส้นโค้งเกาส์เซียน >> Open NLFit



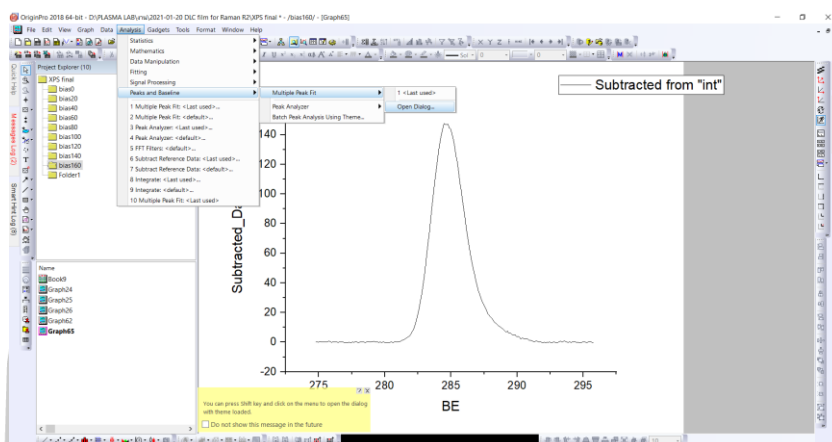
13. ปรับเส้นโค้งด้วยการกด Fit until converged >> Done



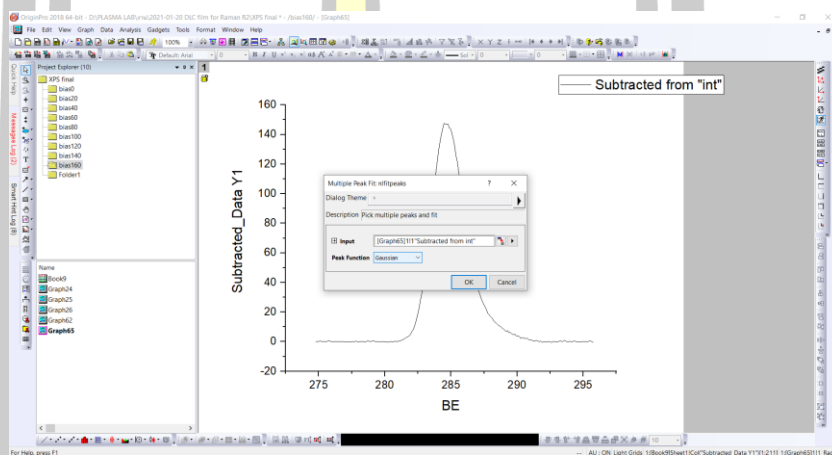
14. จะเห็นจุดศูนย์กลางของเส้นโค้งเกาส์เซียนที่ตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวในแกนอนมีค่าเท่ากับ 284.6 eV (ขึ้นอยู่กับแต่ละไฟล์ข้อมูล) จากนั้นจะทำการปรับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวให้ตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของคาร์บอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 284.8 eV จะได้ว่า $284.8 - 284.6 = 0.2$ ดังนั้น ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวจะถูกเลื่อนตำแหน่งด้วยการบวก 0.2

	A(X1)	B(Y1)	C(X2)	D(Y2)	E(X3)	F(Y3)
Long Name	BE	Int	Subtracted_	Subtracted_	Baseline_Da	Baseline_Da
Units	eV	a.u.				
Comments			Subtracted from "Int"		Baseline to Subtract for "Int"	
F(x)=	col(a)+0.2					
1	296	34.19831	295.8	0	295.8	34.19831
2	295.9	34.56281	295.7	0.4505	295.7	34.11231
3	295.8	34.34287	295.6	0.31458	295.6	34.02829
4	295.7	33.91257	295.5	-0.03565	295.5	33.94822
5	295.6	33.89124	295.4	0.01715	295.4	33.87409
6	295.5	34.42969	295.3	0.62182	295.3	33.80787
7	295.4	34.14354	295.2	0.39199	295.2	33.75155
8	295.3	34.05978	295.1	0.35268	295.1	33.70771
9	295.2	33.82311	295	0.14662	295	33.67649
10	295.1	33.41455	294.9	-0.24716	294.9	33.66171
11	295	33.62131	294.8	-0.04335	294.8	33.66466
12	294.9	34.09451	294.7	0.40914	294.7	33.68537
13	294.8	34.32565	294.6	0.60371	294.6	33.72194

15. เมื่อเลื่อนตำแหน่งของข้อมูลเสร็จแล้ว จะทำการปรับเส้นโค้งเกาส์เซียนของสัดส่วนองค์ประกอบของพันธะที่อยู่ภายในข้อมูล ได้แก่ พันธะ C=C หรือ sp^2 ตรงกับตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 284.5 eV พันธะ C-C หรือ sp^3 ตรงกับพลังงานยึดเหนี่ยว 285.1 eV และพันธะที่คาร์บอนยึดกับออกซิเจน C=O ตรงกับพลังงานยึดเหนี่ยว 288.4 eV
Analyzer >> Peak and Baseline >> Multiple Peak Fit >> Open Dialog

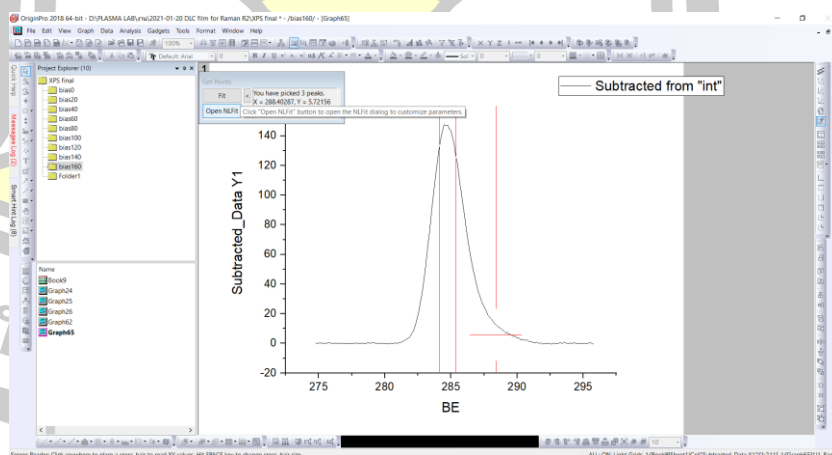


16. เลือกเส้นโค้งเป็นแบบ Gaussian >> OK



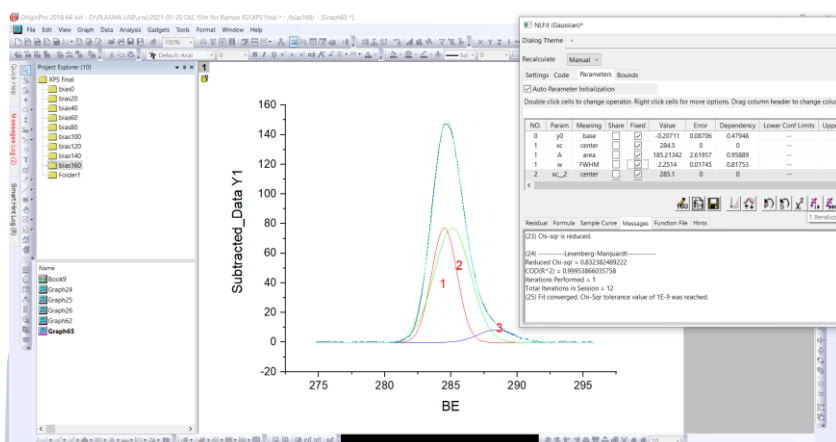
17. กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการปรับเส้นโค้ง โดยเลือกตามตำแหน่งพี้นระที่ประกอบภายในข้อมูล

>> Open NLFit

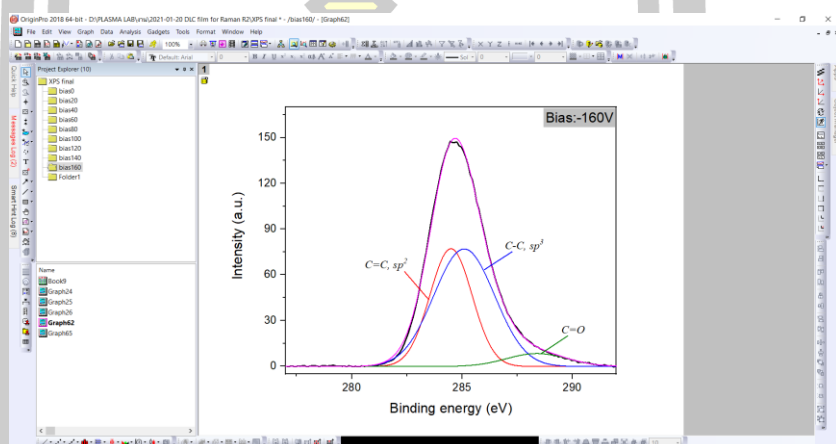


18. ทำการปรับเส้นโค้งของแต่ละสัดส่วนพี้นระ ให้เส้นโค้งจำลองตรงกันกับข้อมูลให้มากที่สุด >>

Done



19. ข้อมูลตำแหน่งพันธะ พื้นที่ใต้เส้นโค้ง จะถูกนำมาวิเคราะห์สัดส่วนคลัสเตอร์ของ sp^2 และ sp^3



พหุคูณ ปณ ภัโต ชีเว

บทที่ 4

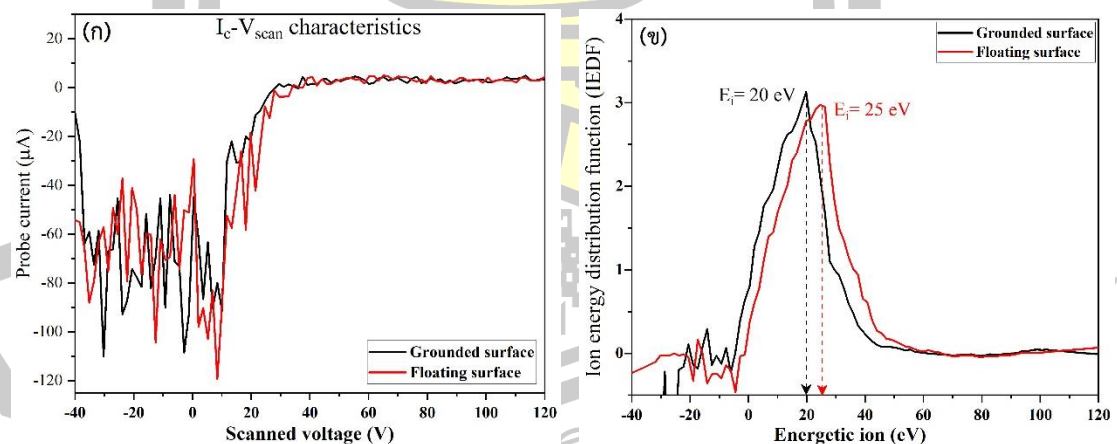
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการวิจัยบ่งชี้ว่าพลังงานไอออนที่ตกกระทบผิวฟิล์มในระหว่างกระบวนการตกสะสมฟิล์มบางส่งผลต่อลักษณะเชิงโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม ซึ่งพลังงานไอออนสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยสนามไฟฟ้าโดยการไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงาน เพื่อวัดพลังงานไอออนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบและเพื่อวัดพลังงานไอออนตามความกว้างสัญญาณพัลส์อาร์กของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ รวมไปถึงผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนพลังงานไอออน ทั้งหมดจะถูกแสดงในบทนี้ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวัดพลังงานไอออน

4.1.1 ผลการวัดพลังงานที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอน

พลาสมาที่กำเนิดจากเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศจะแตกตัวเป็นไอออนพลังงานสูงอยู่ในช่วง 20 V ถึง 150 eV ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นขั้วแคโทด เพื่อศึกษาไอออนที่กำเนิดขึ้นด้วยเทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศที่มีคาร์บอนเป็นวัสดุแคโทด จึงได้ทำการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนที่กำเนิดขึ้น ผลของการวัดพลังงานแสดงในรูปของฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน ดังรูปที่ 4.1



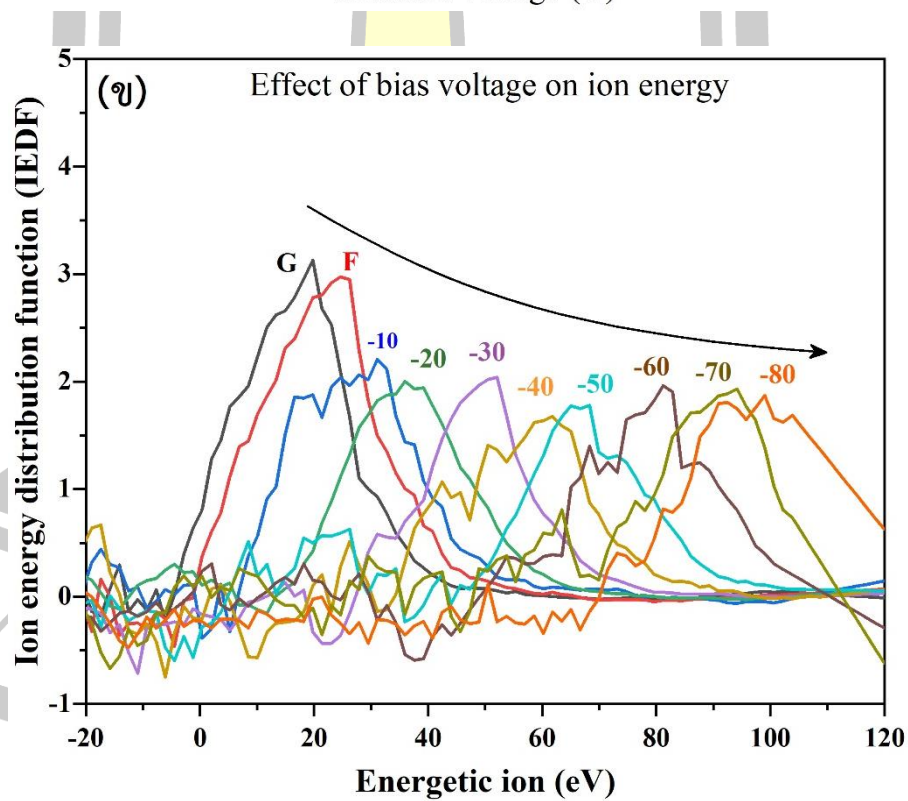
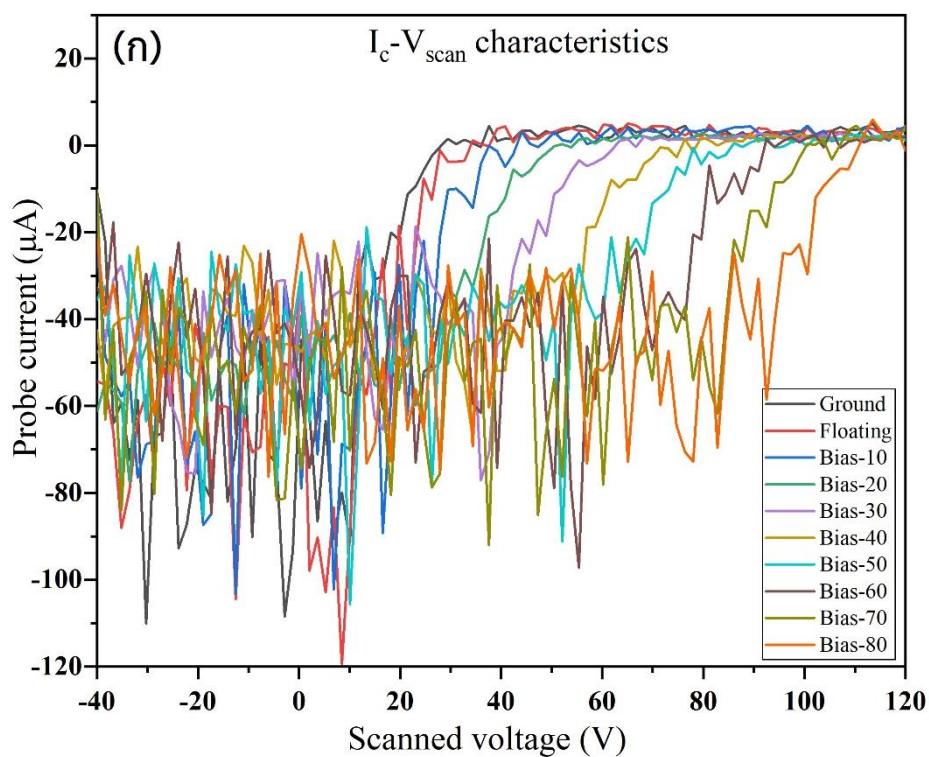
รูปที่ 4.1 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วง (ข) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน

รูปที่ 4.1 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่ตรวจวัดได้ตามช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์หน่วย จากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณที่ 1 ช่วงค่าศักย์หน่วยกราดจาก -40 V ถึง 10 V จะแสดงลักษณะของกระแสไอออนที่คงที่อยู่นานไมโครแอมแปร์ บริเวณที่ 2 ช่วงค่าศักย์หน่วยกราดจาก 10 V ถึง 30 V กระแสไอออนจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยค่ากระแสไอออนจะมีค่าลดลงจนใกล้เข้าสู่ศูนย์ และบริเวณที่ 3 ช่วงค่าศักย์หน่วยกราดจาก 30 V ถึง 120 V กระแสไอออนจะมีค่าเท่ากับศูนย์คงที่ รูปที่ 4.1 (ข) แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน (IEDF) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วย จากกราฟ IEDF ค่าพลังงานไอออนที่จุดสูงสุดแสดงค่าพลังงานของไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุด พบว่า พลังงานไอออนคาร์บอนที่วัดได้จากพลาสมาที่กำเนิดมาจากเทคนิค FCVA มีค่าเท่ากับ 20 eV สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ander ที่ได้ทำการศึกษาในปี 2004 [5] อีกทั้งในกระบวนการวัดพลังงาน เมื่อชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดฯ ไม่ถูกต้องลงกราวด์ ถูกปล่อยให้ลอย พบว่า พลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุดมีค่า 25 eV แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าลอยที่บริเวณหน้าหัววัดมีค่าเป็นลบเล็กน้อย เมื่อทำการวัดพลังงานโดยปล่อยให้หัววัดฯ เป็นศักย์ลอย จึงเปรียบได้ว่าหัววัดฯ ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเล็กน้อย พลังงานไอออนที่วัดได้จึงมีค่ามากกว่ากรณีที่ชั่วกริดที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์

4.1.2 ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ

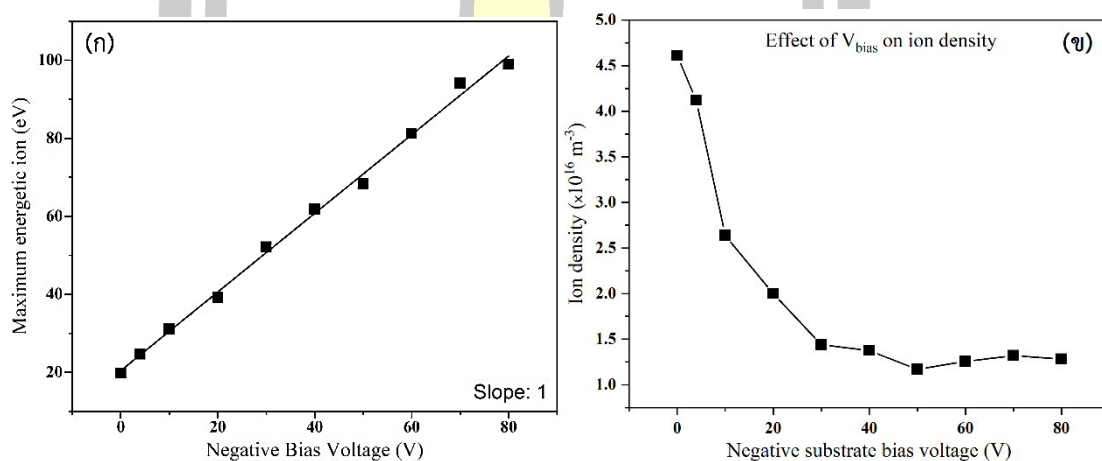
อิทธิพลของการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบให้กับชิ้นงานต่อพลังงานไอออนคาร์บอน แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วย ดังรูปที่ 4.2(ก) พลังงานไอออนถูกแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน ดังรูปที่ 4.2(ข)

พหุ ประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.2 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วงเมื่อถูกไบอัสด้วย ศักย์ไฟฟ้าลบ (ข) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อมีการปรับค่าศักย์ไฟฟ้า ไบอัส

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วยเมื่อมีการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส ดังรูปที่ 4.2(ก) จะเห็นลักษณะช่วงที่กระแสไอออนมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปกับกรณีที่ไม่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส (ศักย์ไบอัสเท่ากับศูนย์) โดยกราฟช่วงของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนจะเลื่อนตามค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่เปลี่ยนแปลงไป กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนแสดงดังรูปที่ 4.2(ข) เมื่อชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดพลังงานฯ ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าจาก 0 ถึง -80 V ผลจากกระบวนการวัดพลังงานไอออนด้วยหัววัด RFA เห็นได้อย่างชัดเจนว่าตำแหน่งพีคของการกระจายพลังงานมีการเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าสูงขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่เพิ่มขึ้น โดยที่การไบอัสศักย์ไฟฟ้า 0 หรือชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ สามารถวัดพลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุด(จุดสูงสุดของพีค) เท่ากับ 20 eV และค่าพลังงานไอออนที่จุดสูงสุดของพีคที่สามารถวัดได้เปลี่ยนแปลงอยู่ในย่าน 20 - 100 eV ตามค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1



รูปที่ 4.3 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุดกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่เปลี่ยนแปลงไป (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของไอออนกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุดกับศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดพลังงานฯ จากกราฟความสัมพันธ์พบว่า พลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้จะมีค่า 20 eV ในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัสเท่ากับ 0 หรือชิ้นงานถูกต่อลงกราวด์ และพลังงานไอออนจะเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1 เช่น ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -20 V พลังงานไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ 40 eV ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -40 V พลังงานไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ 60 eV หรือไบอัสศักย์ไฟฟ้า -80 V พลังงานไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ 100 eV ดังนั้น

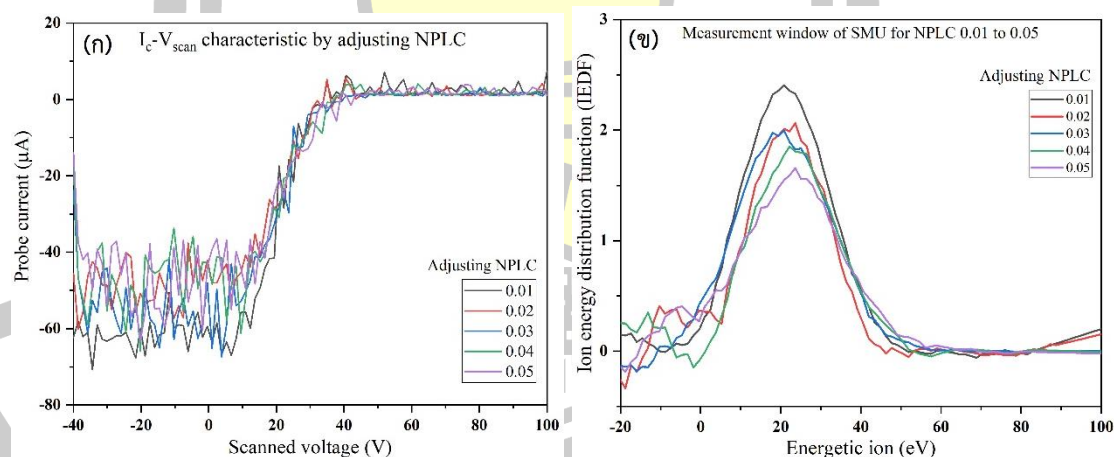
จากแนวโน้มของพลังงานไอออนที่วัดได้จากการไบอัสศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ จึงสามารถอนุมานได้ว่า พลังงานไอออนขณะตกกระทบชิ้นงาน คือผลรวมของพลังงานไอออนเริ่มต้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส [44] รูปที่ 4.3(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของไอออนที่ตรวจวัดได้จากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 พบว่า ค่าความหนาแน่นไอออนที่ตรวจวัดได้อยู่ในย่าน 10^{16} m^{-3} โดยค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุดที่ตรวจวัดได้มีค่า $4.61 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ซึ่งตรวจวัดได้ในกรณีที่ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ และความหนาแน่นไอออนจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น

4.1.3 ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก

ผลของการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กที่ทำการทดลองโดยการปรับค่า NPLC และปรับสัญญาณหน่วงเวลา ผลการทดลองเป็นดังนี้

4.1.3.1 ผลการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กด้วยการปรับค่า NPLC

ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กโดยการปรับค่า NPLC ซึ่งเป็นการปรับช่วงเวลาในการบันทึกข้อมูล ผลการทดลองแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วง ดังรูปที่ 4.4



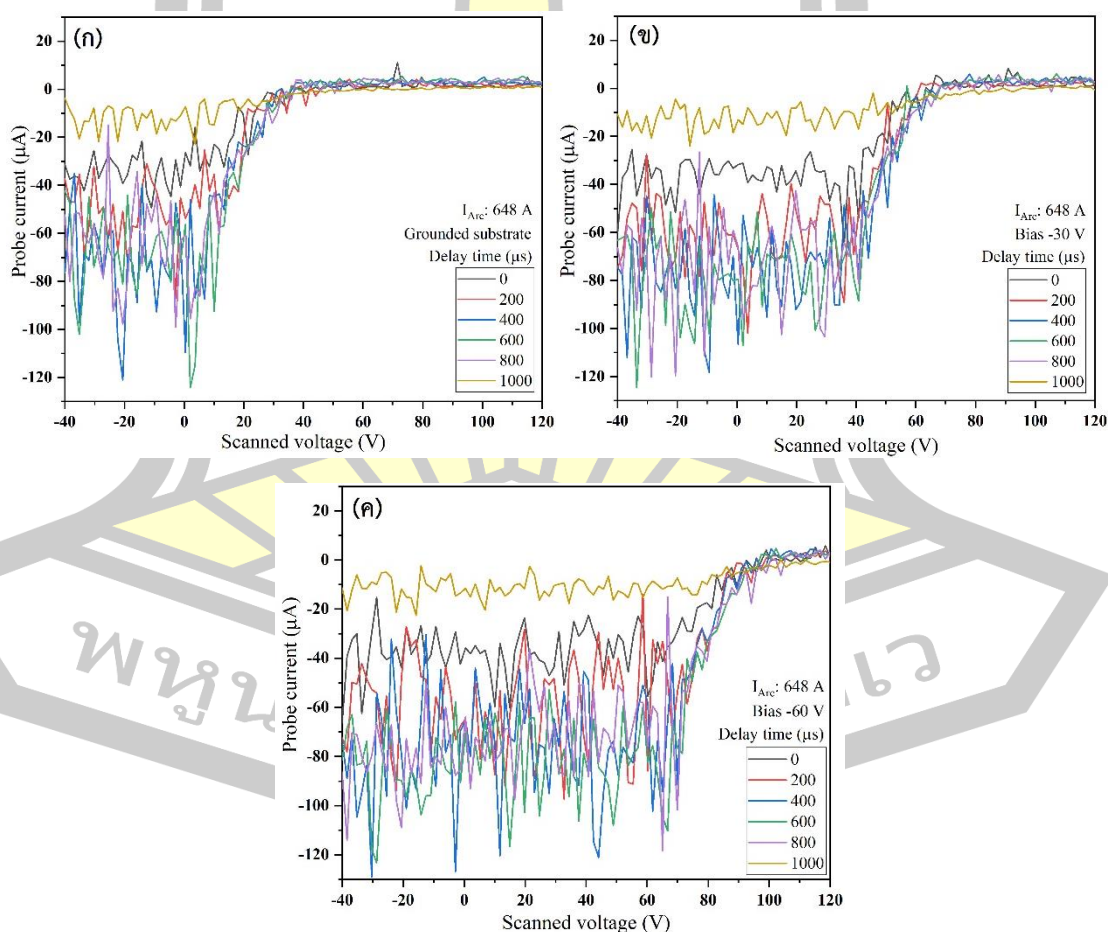
รูปที่ 4.4 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วง (ข) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กจากการปรับค่า NPLC

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่ได้จากขั้วรับไอออนกับค่าศักย์หน่วงที่กราฟจาก -40 ถึง 100 V ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นลักษณะของปริมาณกระแสไอออนที่ได้จากขั้วรับไอออนค่าสูง

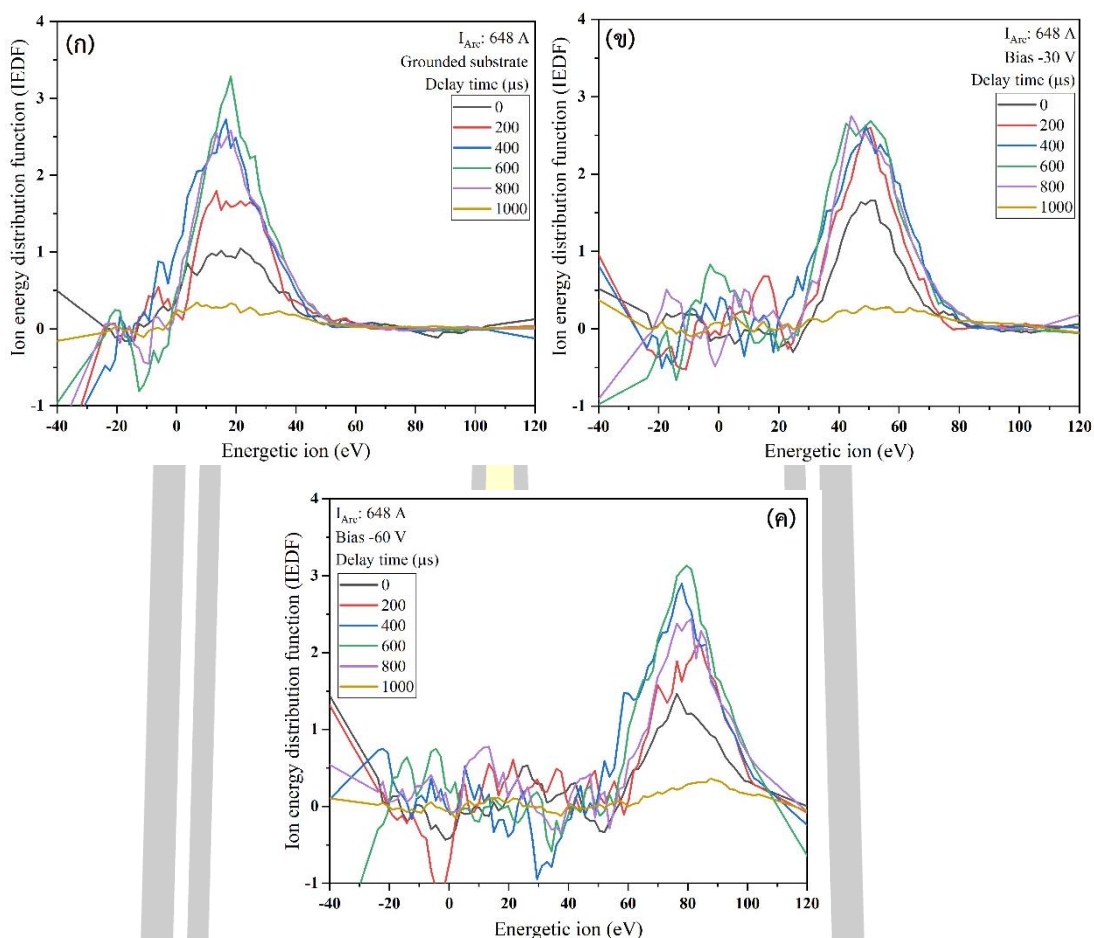
ที่สุดเมื่อค่า NPLC ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.01 ซึ่งช่วงเวลาของการวัดพลังงานมีค่าประมาณ 450 μs แสดงถึงในช่วงเริ่มต้นการอาร์กพลาสมาจะมีความหนาแน่นของไอออนสูงสุดคล้อยกับสัญญาณกระแสอาร์กและช่วงการปรับค่า NPLC ในรูปที่ 3.11 กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนจากการปรับค่า NPLC แสดงดังรูปที่ 4.4(ข) พบว่า ค่าพลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุดหรือค่าพลังงานไอออนที่จุดสูงสุดของพีคจะมีค่าประมาณ 20 eV เท่ากัน

4.1.3.2 ผลการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กด้วยการปรับสัญญาณหน่วงเวลา

ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์กด้วยการปรับค่าสัญญาณหน่วงเวลา โดยทำการทดลองในเงื่อนไขที่ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์และไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -30 V และ -60 V แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับค่าศักย์หน่วงดังรูปที่ 4.5 และกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนดังรูปที่ 4.6

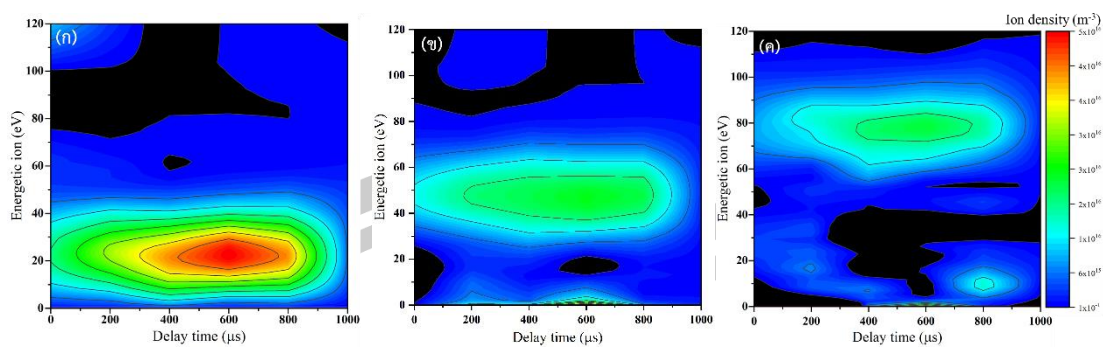


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง

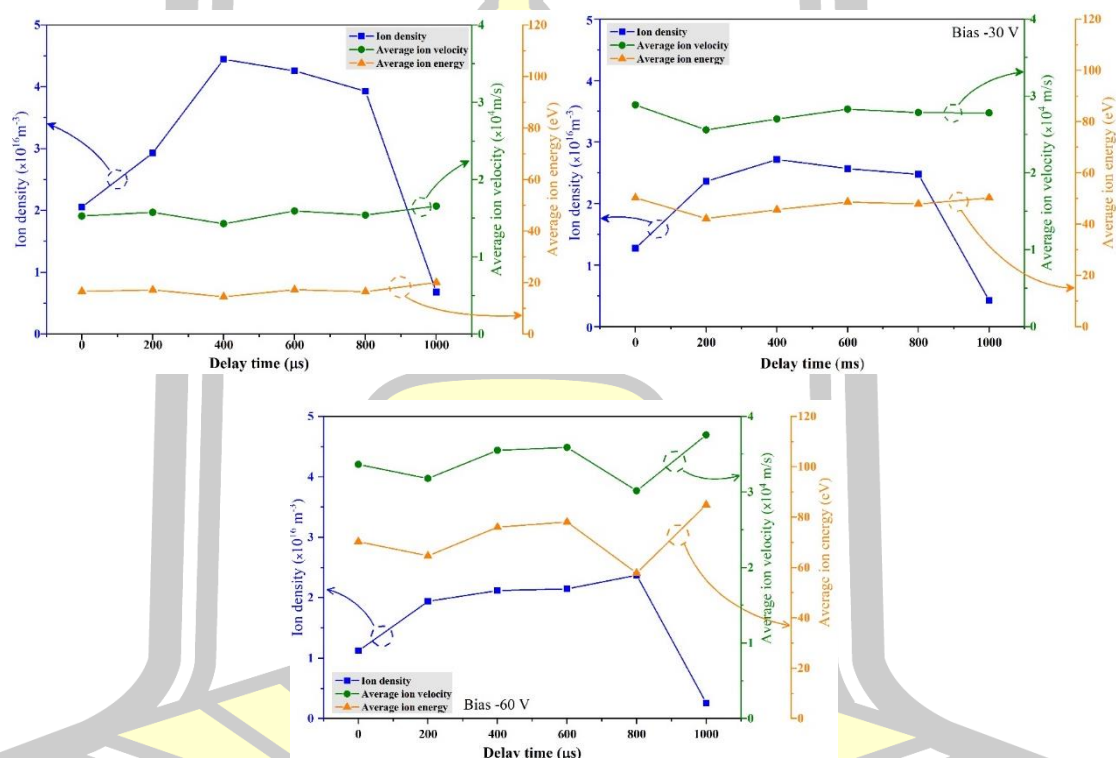


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง เมื่อชั่วกริตไฟฟ้าที่ 1 (ก) ต่อลงกราวด์ (ข) ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -30 V (ค) ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -60 V

จากรูปที่ 4.6(ก) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนที่วัดได้เมื่อชั่วกริตไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดฯ ถูกต่อลงกราวด์ พลังงานไอออนที่ตำแหน่งสูงสุดของพีก เมื่อพิจารณาตามความกว้างพัลส์อาร์กโดยการกำหนดสัญญาณหน่วงเวลาเท่ากับ 0 แสดงถึงการวัดพลังงานไอออนช่วง 0 - 450 μs ของความกว้างพัลส์อาร์ก มีพลังงานเท่ากับ 19.80 eV เมื่อปรับค่าสัญญาณหน่วงเวลาให้เปลี่ยนแปลงไปตามที่กำหนด ค่าพลังงานไอออนที่จุดสูงสุดของพีกมีค่าอยู่ในช่วง 16.57 - 24.64 eV รูปที่ 4.6(ข) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อชั่วกริตไฟฟ้าที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -30 โวลต์ พลังงานไอออนที่จุดสูงสุดของพีกเมื่อกำหนดสัญญาณหน่วงเวลาเท่ากับ 0 คือ 50.50 eV และพลังงานไอออนเมื่อกำหนดค่าสัญญาณหน่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป มีค่าอยู่ในช่วง 44.04 - 50.50 eV รูปที่ 4.6(ค) กราฟการกระจายพลังงานไอออนเมื่อชั่วกริตไฟฟ้าที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -60 V พลังงานไอออนที่จุดสูงสุดของพีกเมื่อกำหนดสัญญาณหน่วงเวลาเท่ากับ 0 คือ 79.60 eV และพลังงานไอออนเมื่อกำหนดค่าสัญญาณหน่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป มีค่าอยู่ในช่วง 77.98 - 81.21 eV



รูปที่ 4.7 กราฟเชิงรูปร่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนกับความหนาแน่นของไอออนที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออน ความเร็วไอออนเฉลี่ย และพลังงานไอออนเฉลี่ยภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก

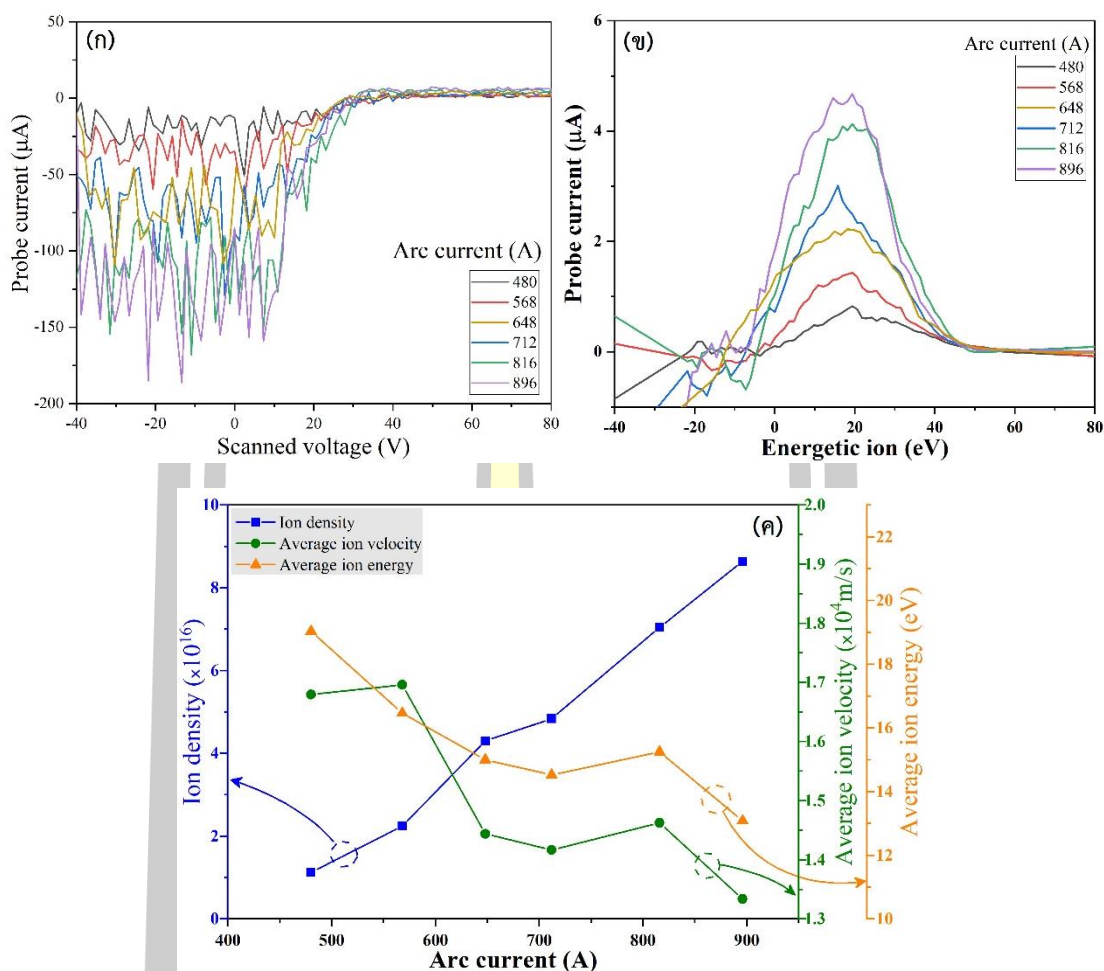
จากรูปที่ 4.7(ก - ค) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไอออน ความหนาแน่นไอออนที่แทนด้วยสีที่แตกต่างกัน กับสัญญาณหน่วงเวลาตามความกว้างพัลส์อาร์ก เมื่อชั่วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ และไบอัสศักย์ไฟฟ้า -30 V และ -60 V ตามลำดับ พบว่า พลังงานไอออนและความหนาแน่นไอออนสอดคล้องกับกราฟการกระจายพลังงานไอออนในรูปที่ 4.6 บริเวณที่ไอออนมีความหนาแน่นแตกต่างกันจะถูกแทนด้วยระดับของแถบสี ความหนาแน่นไอออนแสดงด้วยกราฟ

ความสัมพันธ์รูปที่ 4.7 แสดงความหนาแน่นไอออนที่พิจารณาจากฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน ความหนาแน่นไอออนทั้ง 3 เงื่อนไข คือ ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ และถูกไบอัสด้วย ศักย์ไฟฟ้า -30 V และ -60 V มีค่าอยู่ในช่วง 10^{16} m^{-3} โดยค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุดอยู่กับการ กำหนดสัญญาณหน่วงเวลาเท่ากับ $400 \mu\text{s}$ มีค่าประมาณ 4.6×10^{16} , 2.55×10^{16} และ $2.05 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความหนาแน่นไอออนตามสัญญาณหน่วงเวลา ค่าความหนาแน่น ไอออนมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.8 กล่าวคือ สามารถแบ่งช่วง ของค่าความหนาแน่นไอออนได้ดังนี้ ช่วงสัญญาณหน่วงเวลาเท่ากับ 0 ค่าความหนาแน่นไอออนจะมี ค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นไอออนสูงสุด ซึ่งแสดงถึงพลาสมากำลังกำเนิดขึ้นในช่วงแรกของความ กว้างพัลส์อาร์ก จากนั้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดเมื่อสัญญาณหน่วงเวลาเท่ากับ 200 ถึง $800 \mu\text{s}$ คือช่วงกลางพัลส์อาร์ก แสดงถึงพลาสมามีความเข้มสูงสุดที่ช่วงนี้ จากนั้นค่าความ หนาแน่นไอออนจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ในช่วงท้ายของความกว้างพัลส์อาร์ก จากกราฟความสัมพันธ์ความ หนาแน่นไอออนนั้น สอดคล้องกับสัญญาณกระแสอาร์กในรูปที่ 3.12 รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ ของพลังงานไอออนเฉลี่ยกับสัญญาณหน่วงเวลาตามความกว้างพัลส์อาร์ก พบว่า ที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัส 0 พลังงานไอออนเฉลี่ยประมาณ 19 eV ที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -30 V พลังงานไอออนเฉลี่ยประมาณ 51 eV และที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -60 V พลังงานไอออนเฉลี่ยประมาณ 82 eV พลังงานไอออนเฉลี่ยของการวัด พลังงานตามความกว้างพัลส์อาร์กมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแคบ สามารถอนุมานได้ว่าพลังงานไอออน ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก

4.1.4 ผลการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนด้วยการปรับเปลี่ยนกระแสอาร์ก

ผลของกระแสอาร์กต่อพลังงานไอออนคาร์บอนที่ทำการตรวจวัด แสดงได้ด้วยกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไอออนที่ได้จากขั้วรับไอออนกับค่าศักย์หน่วง ดังรูปที่ 4.9(ก)

พหุ ประสิทธิภาพ



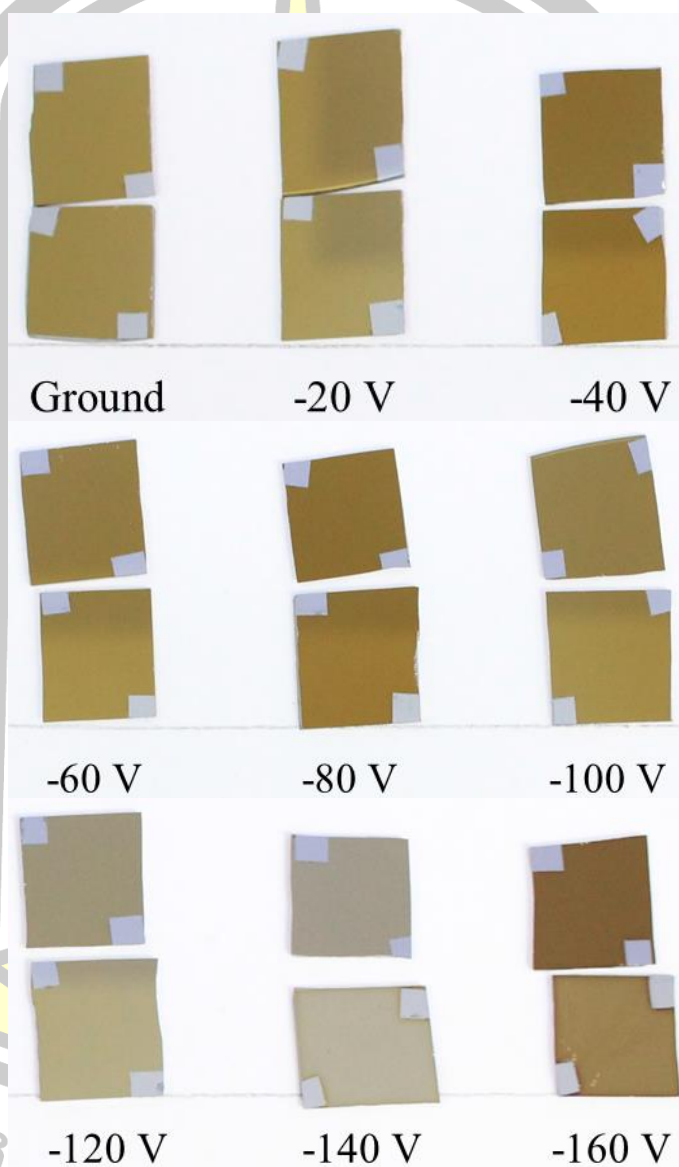
รูปที่ 4.9 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง (ข)กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอาร์ก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่ตรวจวัดได้จากหัววัดฯ กับค่าศักย์หน่วง ในรูปที่ 4.9(ก) เมื่อกระแสอาร์กเปลี่ยนแปลงไป พบว่า เมื่อกระแสอาร์กมีค่าเพิ่มมากขึ้นกระแสไอออนที่ตรวจวัดได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับกราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนคาร์บอนในรูปที่ 4.9(ข) และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นไอออน ความเร็วไอออนเฉลี่ย และพลังงานไอออนเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 4.9(ค) จะเห็นว่าเมื่อกระแสอาร์กเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของไอออนเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ค่าพลังงานไอออนจะมีค่าเท่าเดิม คือ 20 eV ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามกระแสอาร์กที่มีค่าเพิ่มขึ้น

4.2 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน

จากผลของการวัดพลังงานไอออนที่เกิดขึ้นจากเทคนิค FCVA ที่มีคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของพลังงานไอออนที่เปลี่ยนแปลงไปจากการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงาน ได้ทำ

การเคลือบฟิล์มคาร์บอนด้วยเทคนิค pulse-FCVA ด้วยค่ากระแสอาร์ก 720 A จำนวน 3600 พัลส์ เป็นเวลา 60 นาที ณ ตำแหน่งห่างจากปลายขดลวดตัวกรองเป็นระยะ 22 cm โดยใช้เงื่อนไขการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงาน ฟิล์มที่เกิดจากการตกสะสมด้วยเงื่อนไขดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 4.10

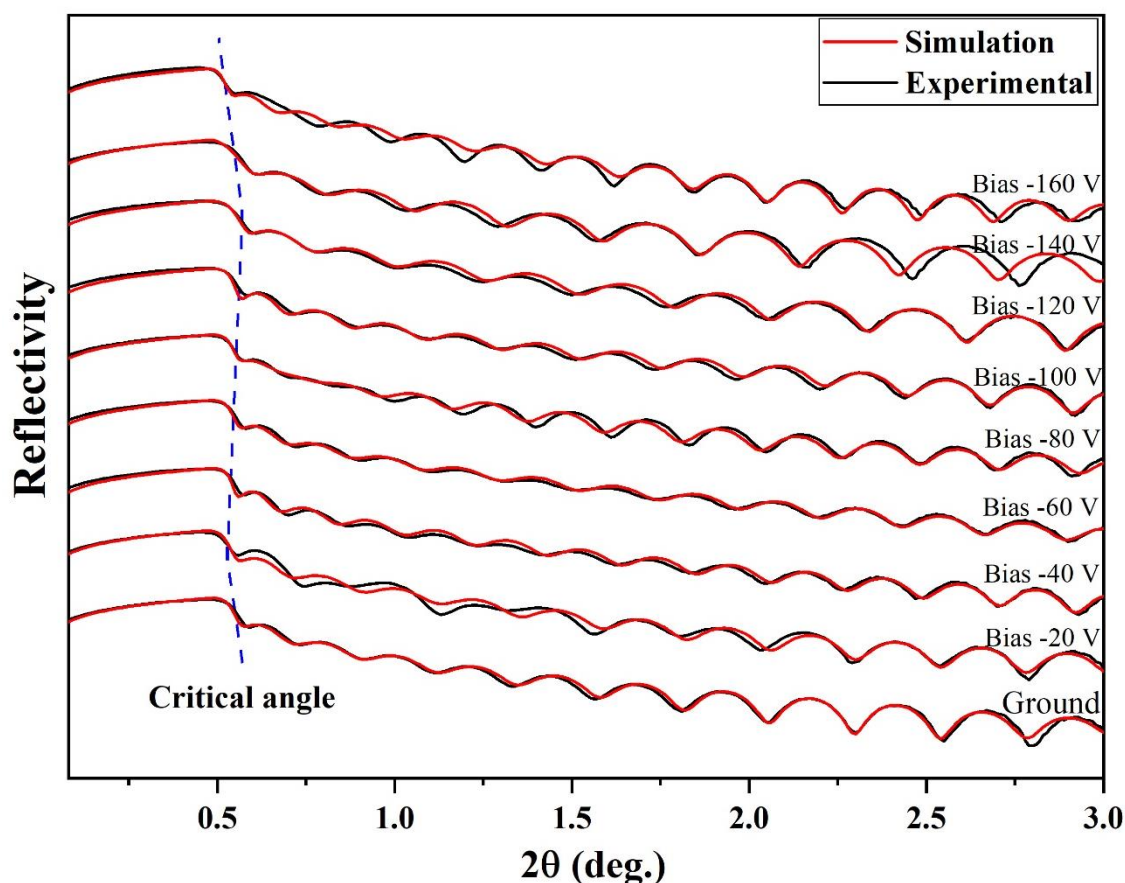


รูปที่ 4.10 ฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงาน

ลักษณะเชิงโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มถูกนำไปศึกษาด้วยเทคนิค X-ray reflectometry, เทคนิค Raman spectroscopy และเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy ผลการทดลอง ดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray reflectometry

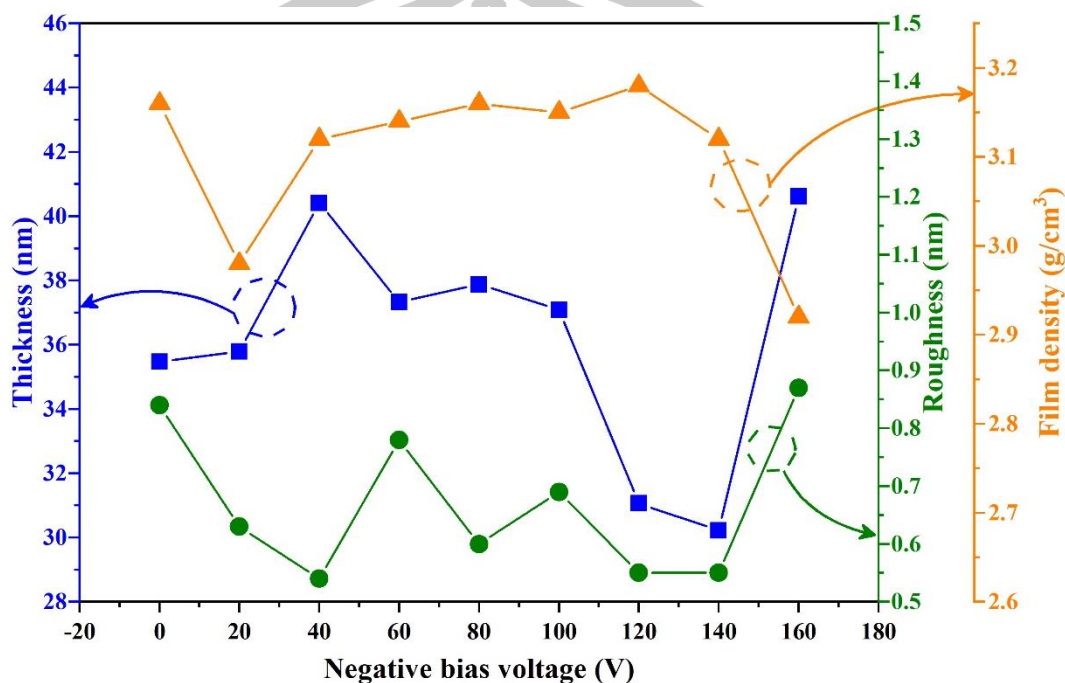
เทคนิค XRR เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของชั้นฟิล์ม สามารถบ่งบอกถึงความหนาของฟิล์ม ความหนาแน่นของเนื้อฟิล์ม และความขรุขระของผิวฟิล์มได้ รูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ta-C ที่เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิค XRR ของฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 พิจารณารูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ พบว่า ค่ามุมวิกฤต (critical angle) ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยและเห็นได้ชัดเจนที่เงื่อนไขขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -140 V คาบเวลาของการสั่นจะสัมพันธ์กับค่าความหนาของฟิล์ม จะเห็นว่าเงื่อนไขที่มีคาบการสั่นน้อยจะแสดงถึงฟิล์มมีความหนามาก เช่น เงื่อนไขที่ขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -40 V และ -160 V ในทางตรงข้ามถ้าหากคาบของการสั่นมากจะแสดงถึงฟิล์มที่มีความหนาต่ำ เช่น เงื่อนไขที่ขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -140 V ความชันของสเปกตรัมจะบ่งบอกถึงความขรุขระของผิวฟิล์ม จากรูปแบบของสเปกตรัมจะเห็นว่า ความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มมีค่าต่ำที่สุด

และมากที่สุดเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -140 V และ -160 V ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของ ความหนาแน่น ความหนา และความขรุขระของผิวฟิล์ม สรุปได้ดังกราฟในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าไบอัสของขึ้นงานกับสมบัติของฟิล์มที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค XRR

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์ม ta-C ที่ศึกษาด้วยเทคนิค XRR

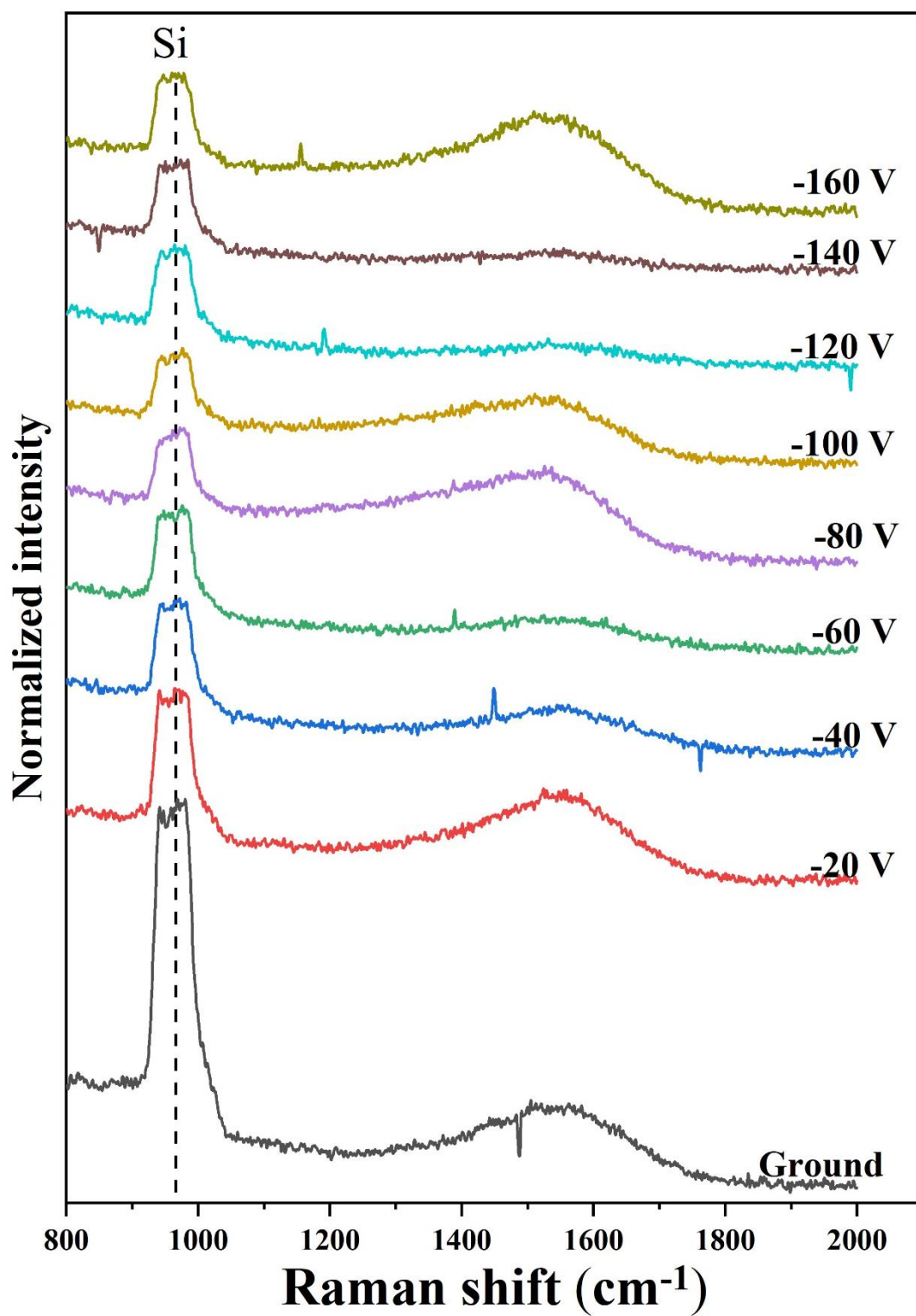
Conditions	Thickness (nm)	Roughness (nm)	Density (g/cm ³)
0	35.47	0.84	3.16
20	35.79	0.63	2.98
40	40.41	0.54	3.12
60	37.33	0.78	3.14
80	37.88	0.6	3.16
100	37.09	0.69	3.15
120	31.06	0.55	3.18
140	30.22	0.55	3.12
160	40.62	0.87	2.92

ฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่แตกต่างกัน ความหนาของฟิล์มจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ซึ่งฟิล์มจะมีความหนาสูงสุดที่เงื่อนไขไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -40 V มีความหนาประมาณ 40.34 nm ความหนาต่ำสุดที่เงื่อนไขไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -140 V พลังงานไอออนที่เปลี่ยนแปลงไปจากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงาน จะส่งผลต่อค่าความหนาของฟิล์มโดยไอออนที่มีพลังงานมากกว่าจะสามารถฝังตัวลงไปในผิวของชิ้นงานทำให้กระบวนการตกสะสมเกิดเป็นชั้นฟิล์มได้บางกว่า สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของฟิล์ม ซึ่งพบว่าไอออนที่มีพลังงานมากกว่าจะเกิดการตกสะสมแล้วเกิดการยึดเกาะกับทั้งชิ้นงานและชั้นฟิล์มได้ดี ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นสูง ในการทดลองนี้พบว่า พลังงานไอออนส่งผลต่อความหนาแน่นของฟิล์มเล็กน้อยและที่พลังงานไอออนที่สูงมากจากการไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -160 V ความหนาแน่นของฟิล์มต่ำ Zhu และคณะ[45] ได้อธิบายว่า ในกระบวนการตกสะสมของฟิล์มบางคาร์บอน พลังงานที่มากเกินไปต่อการฝังตัวลงในชิ้นงานจะไปทำลายพลังงานระหว่างพันธะ sp^3 กลายเป็นพันธะ sp^2 ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นต่ำและในกระบวนการตกสะสมไอออนจะกระจายตัวไปในแนวด้านหน้าของผิวฟิล์ม ลดอัตราการฝังตัวลงไปในชิ้นงาน ทำให้ฟิล์มมีความหนาที่เพิ่มขึ้น

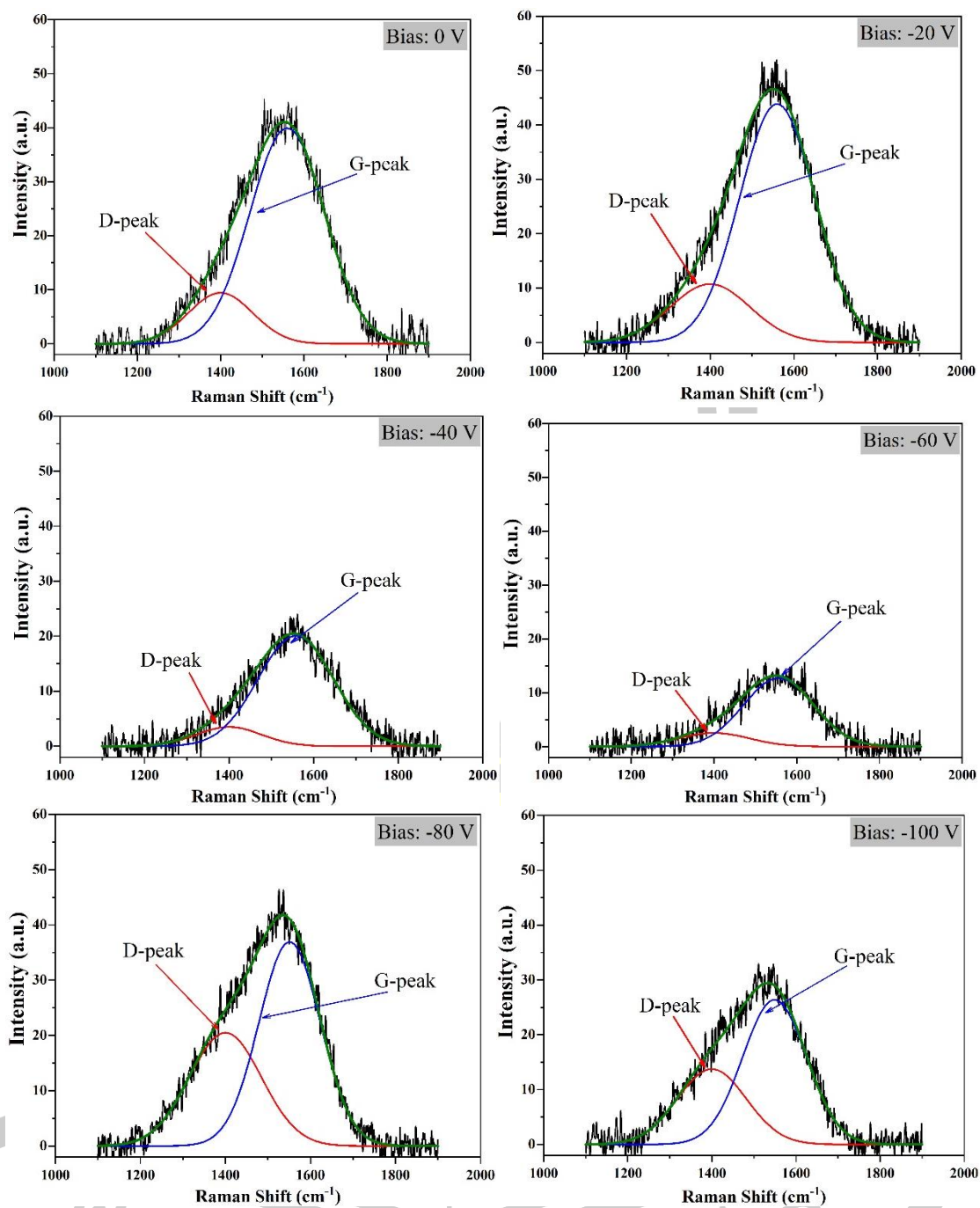
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

ฟิล์ม ta-C ถูกศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ซึ่งใช้ความยาวแสงเลเซอร์ 532 nm กำลังแสง 12.5 mW ความละเอียด 3 cm^{-1} ถึง 5 cm^{-1} การหาสัดส่วนปริมาณคลัสเตอร์ sp^2 กับ sp^3 ของฟิล์มหาได้จากกระบวนการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ของสเปกตรัมรามานด้วยเส้นโค้งเกาส์เซียน ที่มีตำแหน่งศูนย์กลางตรงกับสเปกตรัมรามาน 1350 cm^{-1} สำหรับพีคดี (D-peak) และสเปกตรัมรามาน 1580 cm^{-1} สำหรับพีคจี (G-peak) สัดส่วนพื้นที่ใต้เส้นโค้งระหว่างพีคดีกับพีคจีถูกนำไปหาค่า I_D/I_G ซึ่งจะบ่งบอกถึงปริมาณคลัสเตอร์ sp^2/sp^3 ผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4.14

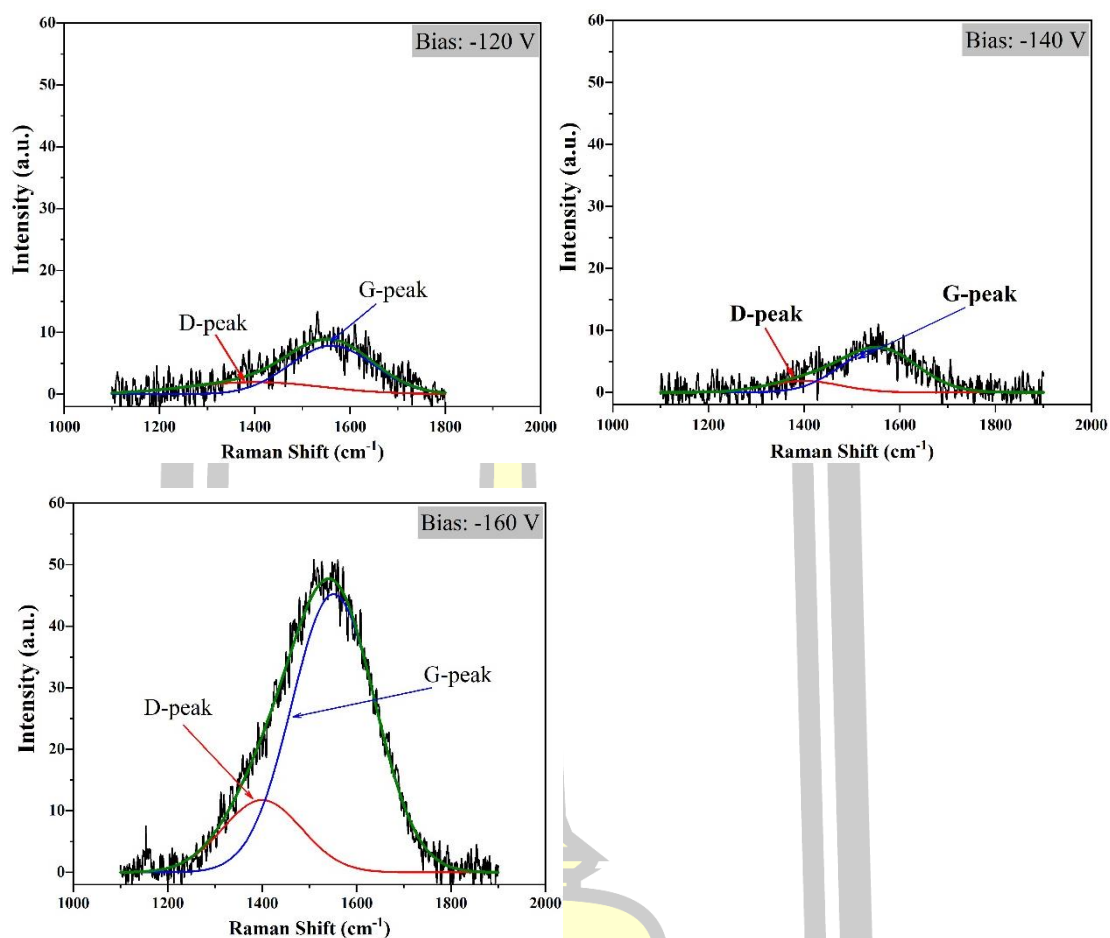
พูน ปณ สิโต ชีเว



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานแตกต่างกัน

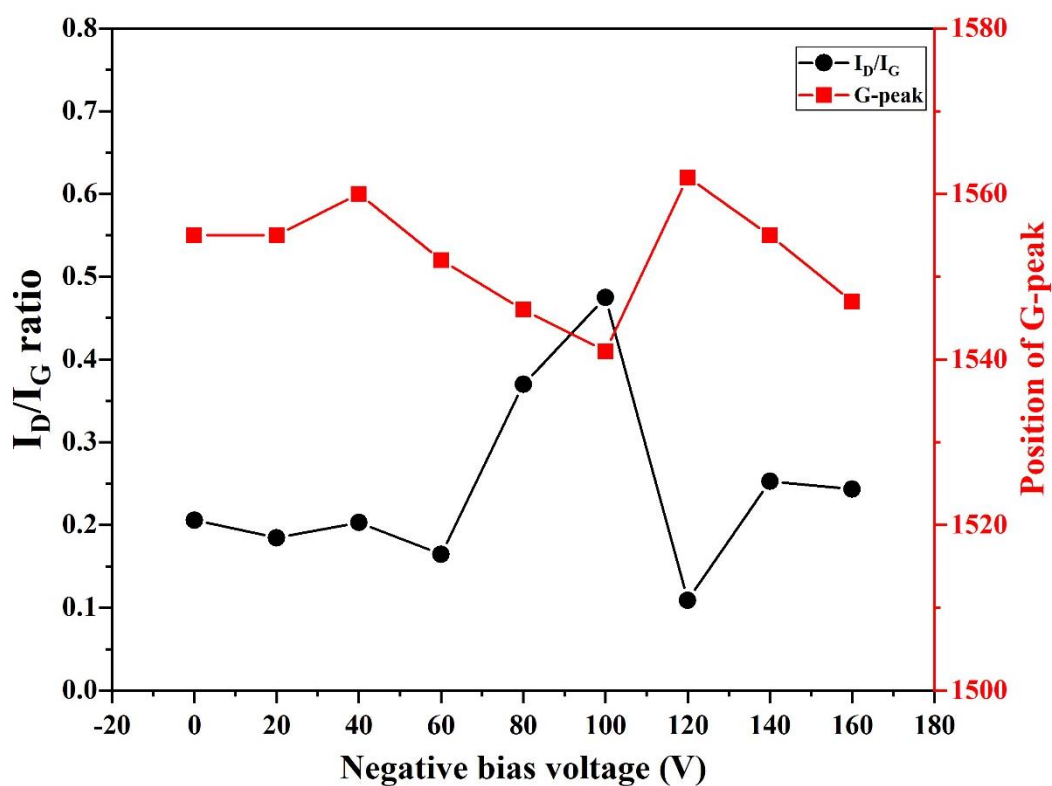


พหุ ประถมศึกษา



รูปที่ 4.14 กราฟสเปกตรัมรามานที่ถูกปรับเส้นโค้งของพีคดีและพีคจีซึ่งเป็นองค์ประกอบของสเปกตรัมรามานฟิล์ม ta-C

จากรูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโครงสร้างพันธะ sp^2 กับ sp^3 ภายในฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมลงบนชิ้นงานซิลิกอน (Si) ด้วยเงื่อนไขพลังงานไอออนคาร์บอนที่แตกต่างจากการปรับศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับชิ้นงาน ตั้งแต่ 0 ถึง -160 V จะเห็นว่าสเปกตรัมจะปรากฏพีคหลักในช่วงคลื่น 1100 cm^{-1} ถึง 1900 cm^{-1} ความเข้มของสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้แตกต่างกันเป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่ใช้ในกระบวนการตรวจวัดมีค่าแตกต่างกัน ตำแหน่งของพีค G ที่เปลี่ยนแปลงไปจะบ่งชี้ถึงปริมาณพันธะ sp^2 ค่าปริมาณสัดส่วน I_D/I_G ที่ได้จากกระบวนการปรับเส้นโค้งสเปกตรัมรามาน ซึ่งบ่งชี้ถึงสัดส่วนปริมาณพันธะ sp^2 กับ sp^3 แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของพีค G กับสัดส่วน I_D/I_G ดังรูปที่ 4.15



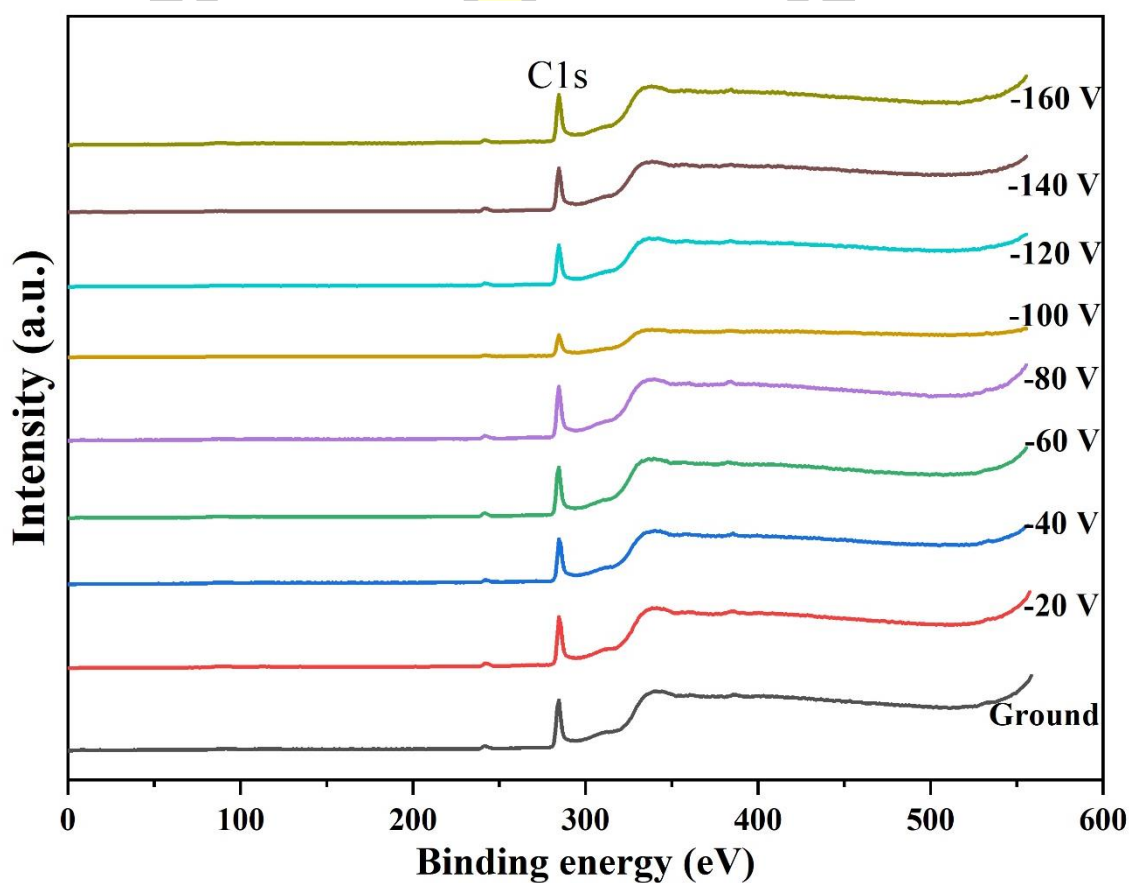
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน I_D/I_G และตำแหน่งของพีค G เมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.15 ตำแหน่งของพีค G จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัสเพิ่มขึ้นถึง -40 โวลต์ จากนั้นตำแหน่งของพีค G จะมีค่าลดน้อยลงถึง 1541 cm^{-1} ซึ่งน้อยที่สุด สอดคล้องกับปริมาณสัดส่วน I_D/I_G ที่จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.47 เมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัส -100 V แสดงถึงการมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^2 สูง และปริมาณคลัสเตอร์ sp^2 จะลดต่ำลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่ผ่านมา[45]–[47] จากผลการทดลองบ่งชี้ว่า พลังงานไอออนคาร์บอนที่แตกต่างกันเมื่อเกิดการตกสะสมจะส่งผลต่อลักษณะเชิงโครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน

4.2.3 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy

เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy หรือ XPS เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่นำมาศึกษา ลักษณะเชิงโครงสร้างของฟิล์ม ta-C โดยใช้รังสีเอกซ์ในการกระตุ้นผิววัสดุ ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกรวบรวมด้วยอุปกรณ์ตรวจจับค่าพลังงานจลน์ และนำไปหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนภายในอะตอม นอกจากนี้ปริมาณโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิววัสดุจะบ่งชี้ถึงปริมาณของธาตุและพันธะอะตอมได้ ในการวิเคราะห์ฟิล์ม ta-C ด้วยเทคนิค XPS ได้ใช้บริการ ณ

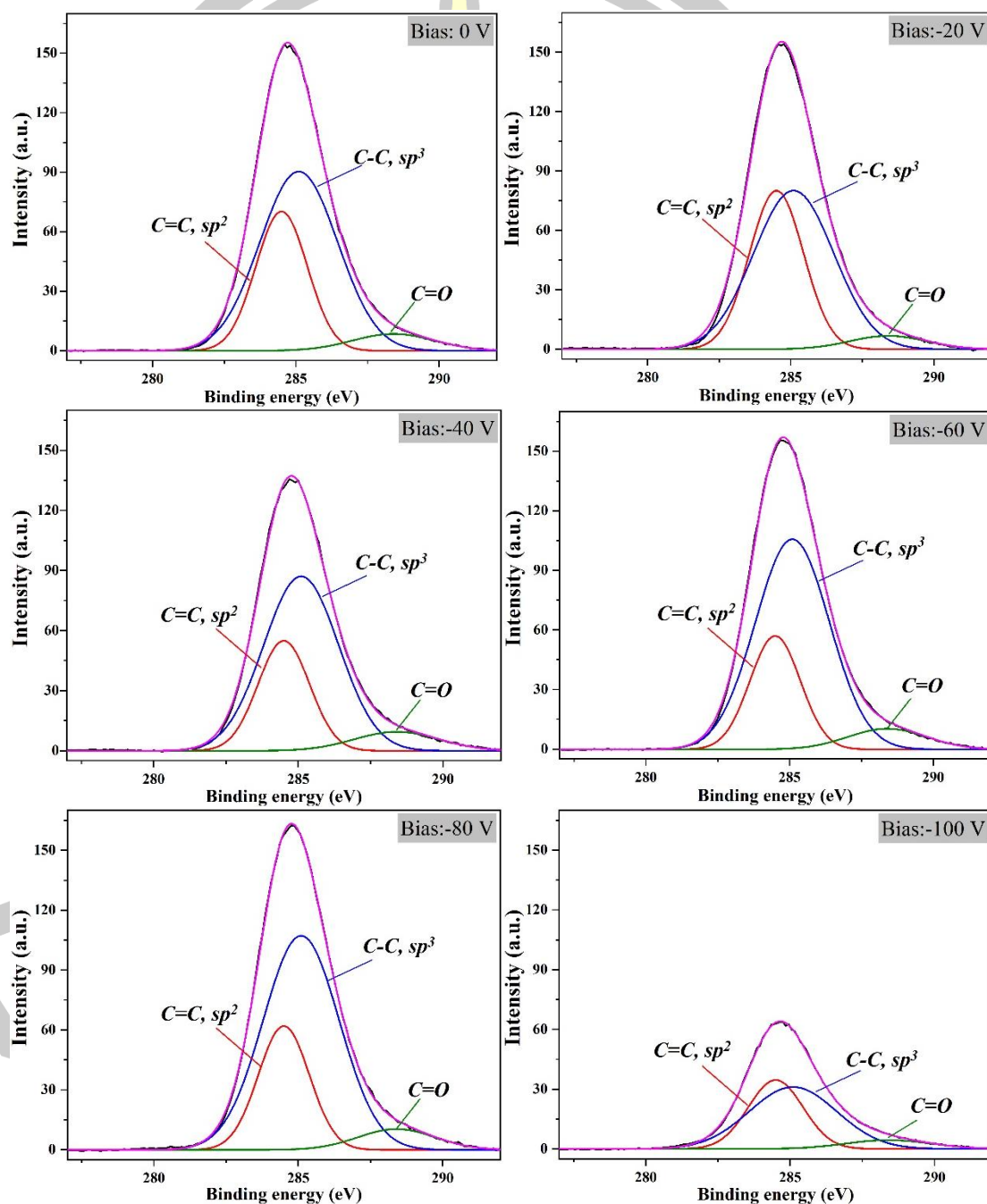
สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จัหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย โดยใช้สถานีลำเลียงแสง BL3.2 Ua:PES ขั้นตอนเริ่มต้น ฟิล์ม ta-C ได้รับการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกระบวนการสปัตเตอร์เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอาร์กอนไอออนที่ถูกเร่งด้วยศักย์ 1000 V เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นชิ้นงานจะถูกส่งเข้าไปยังห้องสุญญากาศหลักเพื่อทำการตรวจวัด สำหรับการตรวจวัด จะกำหนดการวัดเป็น 2 รูปแบบ คือ การวัดแบบหยาบ (Survey scan) และการวัดเฉพาะธาตุคาร์บอน (Carbon scan) โดยใช้อะลูมิเนียมในการกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยว 1638.4 eV (Al K α) การวัดแบบหยาบสัญญาณจะถูกตรวจวัด 1 eV และวัดในช่วงพลังงานยึดเหนี่ยว 40 ถึง 600 eV การตรวจวัดเฉพาะธาตุคาร์บอนจะวัดสัญญาณในทุก ๆ 0.2 eV ซึ่งกำหนดช่วงการวัดประมาณ 274.8 ถึง 295.8 eV สเปกตรัม XPS ของการสแกนแบบหยาบแสดงดังรูปที่ 4.16

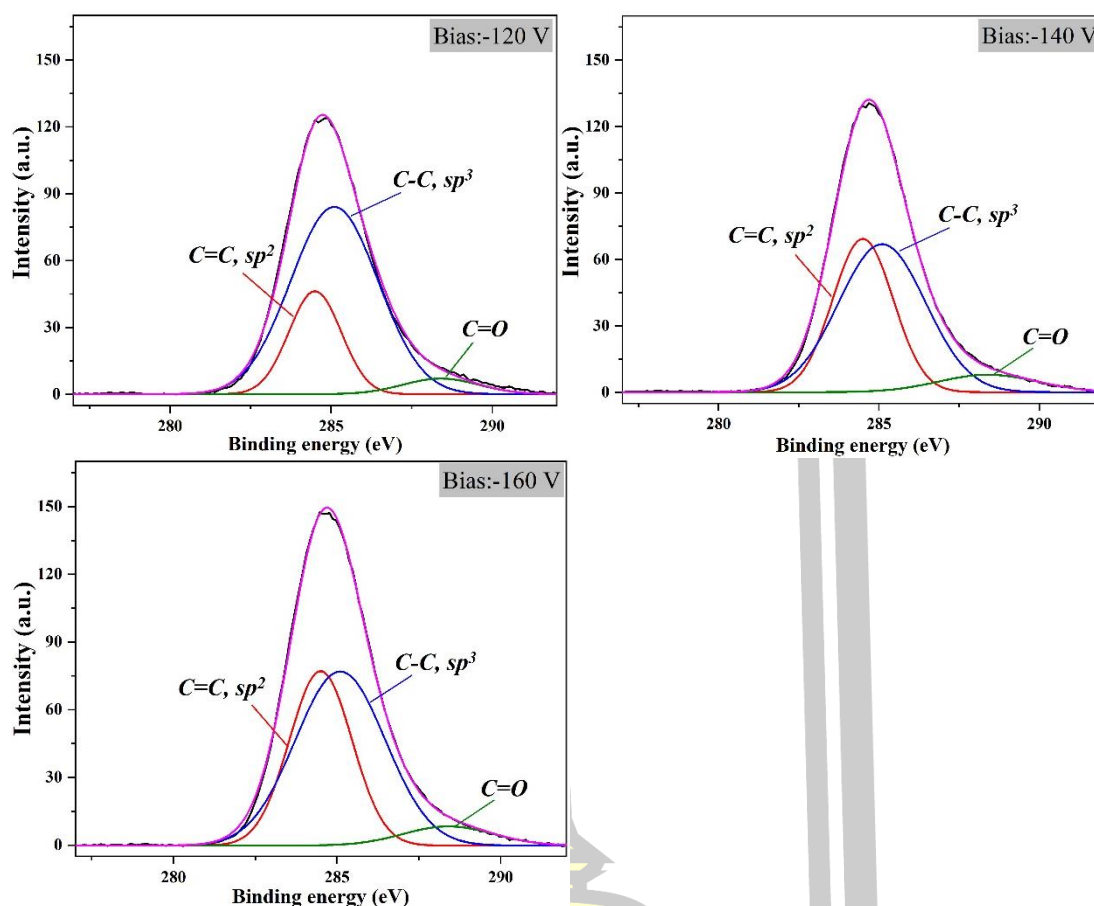


รูปที่ 4.16 สเปกตรัม XPS ช่วงการสแกนแบบหยาบของฟิล์ม ta-C ที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัสแตกต่างกัน

จากการตรวจสอบฟิล์ม ta-C ด้วยเทคนิค XPS ที่มีสเปกตรัมการสแกนแบบหยาบแสดงดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานยึดเหนี่ยว 285 ± 1 eV ซึ่งตรงกับ C1s โดยทั่วไปเทคนิค XPS จะสามารถตรวจวัดพบระดับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของ O1s และ O2s จาก

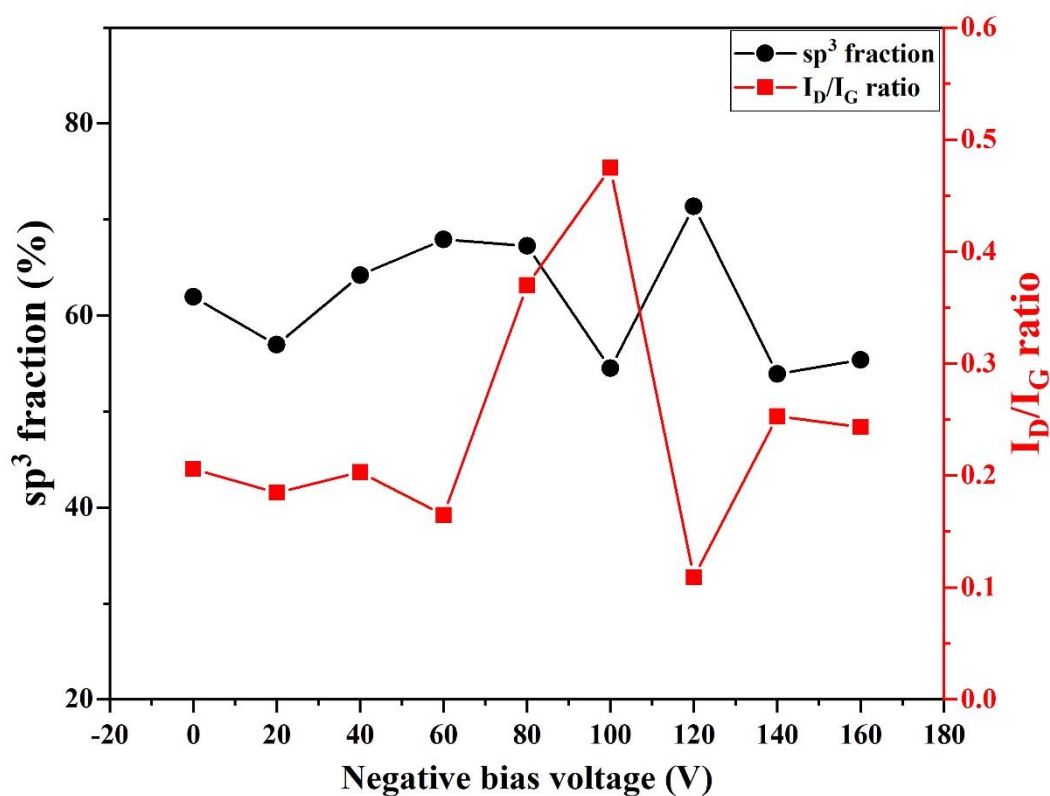
สเปกตรัม XPS จึงแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างฟิล์ม ta-C มีสัดส่วนของออกซิเจนที่ต่ำทำให้ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ถือเป็นสมบัติของฟิล์มที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง เพื่อศึกษาพันธะทางเคมีระหว่างคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบภายในฟิล์ม ta-C จึงได้ตรวจวัดอย่างละเอียดที่ระดับพลังงานยึดเหนี่ยวช่วง 274.8 ถึง 295.8 eV และได้ทำการวิเคราะห์ด้วยการปรับเส้นโค้งเกาส์เซียน แสดงดังรูปที่ 4.17





รูปที่ 4.17 สเปกตรัม XPS C1s ของฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงานเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.17 แสดงการตรวจวัดแบบละเอียด ซึ่งจะพบสเปกตรัม XPS ของคาร์บอน C1s ที่ทำการลบพื้นหลังด้วยเทคนิค Savitzky – Golay smoothing เป็นเส้นฐาน พบว่า รูปร่างของพีคจะแตกต่างกันไปตามการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไอออนคาร์บอนด้วยการปรับศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขึ้นงาน ในการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS จะพิจารณาตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 284.5 eV (เส้นสีแดง) ซึ่งแสดงการมีอยู่ของพันธะ C=C หรือ sp^2 ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 285.1 eV (เส้นสีน้ำเงิน) แสดงการมีอยู่ของพันธะ C-C หรือ sp^3 และนอกจากนี้ยังพบเส้นโค้งที่มีความเข้มต่ำและมีจุดศูนย์กลางพีคอยู่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 288.4 eV (เส้นสีเขียว) แสดงการมีอยู่ของพันธะคาร์บอนที่จับกับออกซิเจน (C=O) ซึ่งเกิดมาจากการปนเปื้อนของออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ในระบบสุญญากาศและเจือปนเข้าไปในฟิล์ม เมื่อทำการปรับเส้นโค้งสเปกตรัมจะแสดงด้วยเส้นสีม่วงเป็นแบบระฆังคว่ำ พื้นที่ใต้เส้นโค้งจะแสดงถึงปริมาณสัดส่วนระหว่างพันธะ sp^2 และ sp^3 สามารถนำข้อมูลจากกระบวนการวิเคราะห์แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน sp^3 กับ I_D/I_G ของฟิล์ม ta-C ที่ตกสะสมด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของคาร์บอนและออกซิเจนบนฟิล์ม ta-C

Bias voltage (V)	% C=C	% C-C	% C=O
0	31.91	61.94	6.15
-20	38.45	56.95	4.60
-40	27.88	64.19	7.93
-60	24.97	67.93	7.10
-80	26.11	67.26	6.63
-100	37.90	54.51	7.59
-120	23.46	71.36	5.18
-140	38.84	53.93	7.23
-160	38.54	55.36	6.10

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วน I_D/I_G ที่ได้จากการกระบวนการวิเคราะห์สเปกตรัมของรามาน กับปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS จากผลการวิเคราะห์ด้วยทั้งสองเทคนิคได้ผลที่สอดคล้องกัน คือ ปริมาณสัดส่วน I_D/I_G ที่ลดลงบ่งชี้ถึงการมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่เพิ่มขึ้น และที่เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัส -100 V ปริมาณสัดส่วน I_D/I_G จะมีค่าสูงที่สุด บ่งชี้ถึงการมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่น้อยที่สุด และจากการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าเงื่อนไขการให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -120 V จะส่งผลให้ฟิล์มมีสัดส่วน I_D/I_G ที่ต่ำที่สุด และมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่สูงที่สุด



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการวินิจฉัยคุณสมบัติของพลาสมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศด้วยการวัดพลังงานไอออนโดยใช้หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วง กระบวนการวัดพลังงานถูกแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข ได้แก่ การวัดพลังงานจลน์ที่ติดตัวมาของไอออน วัดพลังงานไอออนเมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ วัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก และวัดพลังงานไอออนจากการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอาร์ก ผลการทดลอง พบว่า พลังงานจลน์ที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอนจากพลาสมาที่กำเนิดจากเทคนิค FCVA มีค่า 20 eV ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาหลายงานวิจัย อีกทั้งความหนาแน่นของไอออนที่ตรวจวัดได้มีค่าประมาณ $4.61 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ เพื่อศึกษาผลของการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงานต่อค่าพลังงานไอออน ผลของการวัดพลังงาน พบว่า ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงค่าพลังงานไอออนที่เพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับขึ้นงาน สอดคล้องกับการศึกษาของ บาโลนิค และคณะ[48] ซึ่งให้เห็นว่าฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนขณะตกกระทบขึ้นงานสามารถควบคุมได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัสกับขึ้นงาน และพลังงานไอออนที่ตกกระทบผิวขึ้นงานจะขึ้นอยู่กับค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับขึ้นงาน ซึ่งอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ส่งผลให้พลังงานไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ว่า พลังงานไอออนที่เคลื่อนที่มาตกกระทบที่ผิวขึ้นงานขึ้นตรงกับสนามไฟฟ้าที่ก่อดัชนีบริเวณเหนือผิวขึ้นงานจากอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าไบอัส[49] ดังนั้น ค่าพลังงานไอออนคาร์บอนในพลาสมาที่เกิดจากเทคนิค FCVA เป็นผลรวมระหว่างพลังงานไอออนคาร์บอนเริ่มต้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับขึ้นงาน[44] ตามสมการ (5.1)

$$\epsilon_i \approx \epsilon_{\text{initial}} + q\Delta V \quad (5.1)$$

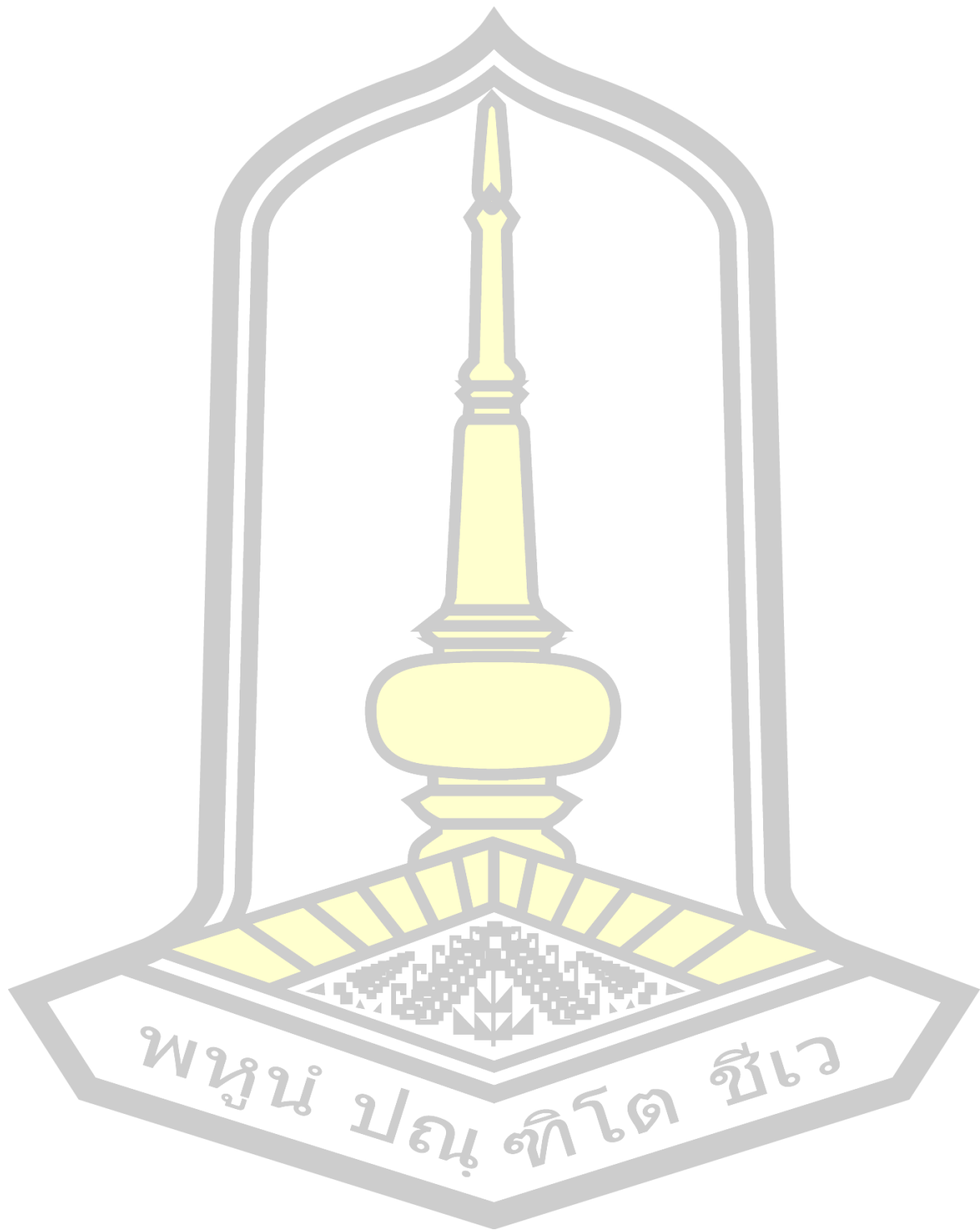
เมื่อ ΔV คือ ผลต่างระหว่างศักย์พลาสมา (V_p) ซึ่งมีค่าคงที่ประมาณ 0 V กับศักย์ไฟฟ้าไบอัส จากสมการความสัมพันธ์ชี้ให้เห็นว่า เมื่อชั่วครู่ไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดฯ ซึ่งเปรียบเสมือนขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ พลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -30 V พลังงานไอออนคาร์บอนจะมีค่าเท่ากับค่าของพลังงานไอออนคาร์บอนเริ่มต้นประมาณ 20 eV รวมกับผลต่างของค่าศักย์พลาสมาและศักย์ไฟฟ้าไบอัสเท่ากับ 30 V พลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าประมาณ 50 eV ทำให้สามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงานสามารถ

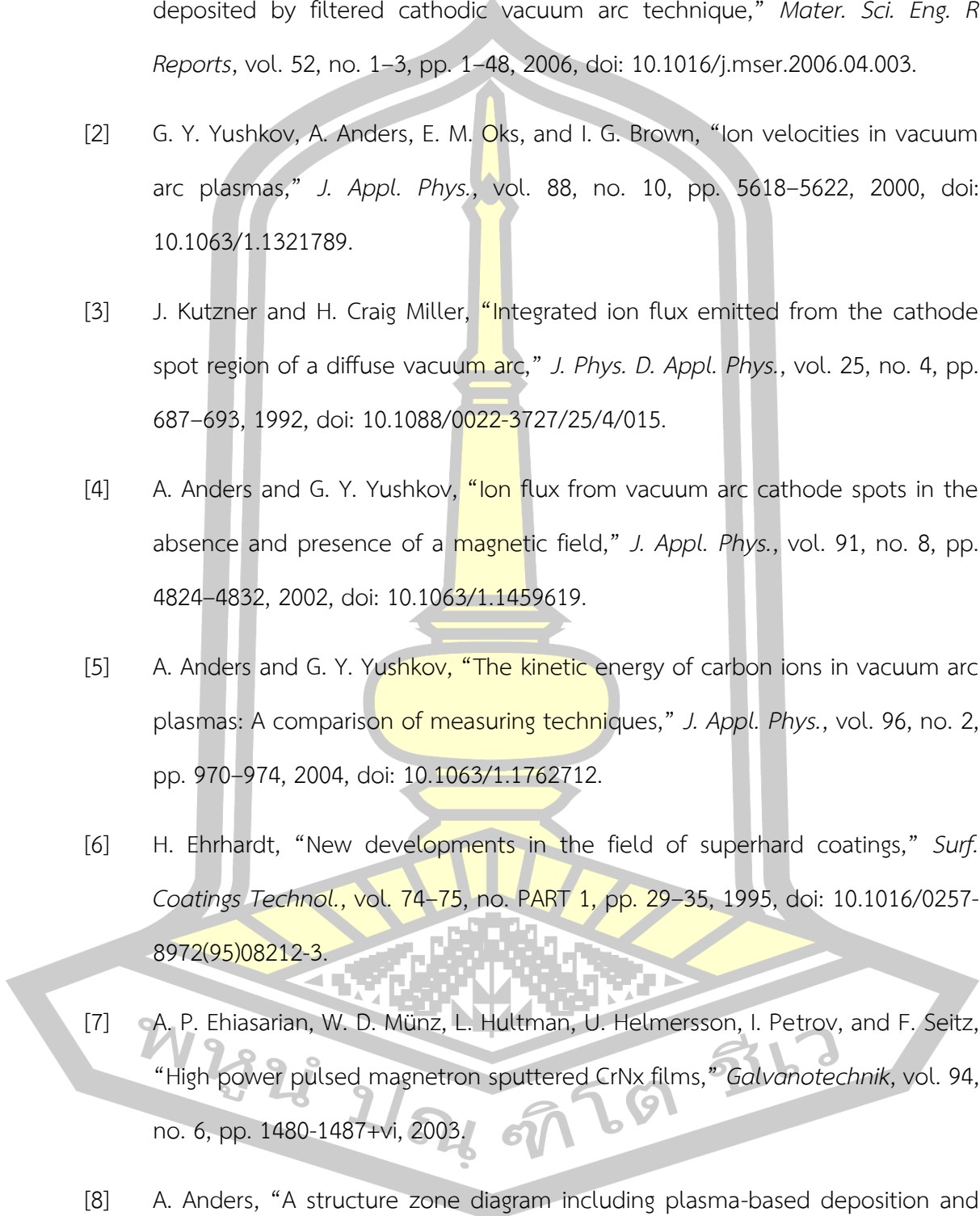
ควบคุมพลังงานไอออนได้ เพื่อทำการวินิจฉัยพลาสมาที่ตกสะสมลงบนพื้นผิวของฟิล์มฉนวน ซึ่งเป็นข้อกังวลถึงอิทธิพลของสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากไอออนบวกที่ตกสะสมเป็นชั้นฟิล์มต่อค่าพลังงานไอออนที่ตกสะสมในลำดับถัดไป จึงได้ทำการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนภายในสัญญาณพัลส์อาร์กด้วยการกำหนดสัญญาณช่วงเวลาของการวัดพลังงาน พบว่า ค่าพลังงานไอออนคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $16 - 25 \text{ eV}$ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าพลังงานอยู่ในย่านของพลังงานจลน์ที่ติดตัวมาของไอออนคาร์บอน บ่งชี้ว่า พลังงานไอออนไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ก และค่าความหนาแน่นไอออนอยู่ในย่าน 10^{16} m^{-3} ความหนาแน่นสูงสุดจะอยู่ในช่วงกลางพัลส์ เวลา $200 - 800 \mu\text{s}$ สอดคล้องกับสัญญาณกระแสอาร์ก เมื่อพิจารณาค่ากระแสอาร์กที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าพลังงานไอออน พบว่า พลังงานไอออนคาร์บอนที่ตรวจวัดได้ไม่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่ความหนาแน่นของไอออนซึ่งบ่งชี้ถึงความหนาแน่นของพลาสมาและอัตราการตกสะสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสอาร์กที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานไอออนต่อสมบัติของฟิล์ม ได้ทำการเคลือบฟิล์ม ta-C ด้วยเงื่อนไขพลังงานที่แตกต่างกันด้วยการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงาน พบว่า เมื่อพลังงานไอออนที่ตกสะสมลงบนผิวฟิล์มมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มมีความหนาแน่นสูงขึ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.20 g/cm^3 เมื่อขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -140 V จากผลการศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค Raman spectroscopy และ XPS ผลการวิเคราะห์ด้วยทั้งสองเทคนิคได้ผลที่สอดคล้องกัน คือ ปริมาณสัดส่วน I_D/I_G ที่ลดลงบ่งชี้ถึงการมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่เพิ่มขึ้น และที่เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าไบอัส -100 V ปริมาณสัดส่วน I_D/I_G จะมีค่าสูงที่สุด บ่งชี้ถึงการมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่น้อยที่สุด และจากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าเงื่อนไขการให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -120 V จะส่งผลให้ฟิล์มมีสัดส่วน I_D/I_G ที่ต่ำที่สุด และมีปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 ที่สูงที่สุด[47] จากผลการทดลองบ่งชี้ว่าพลังงานไอออนคาร์บอนที่แตกต่างกัน เมื่อเกิดการตกสะสมเป็นชั้นฟิล์มจะส่งผลต่อลักษณะเชิงโครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในกระบวนการเคลือบฟิล์ม ta-C ด้วยเทคนิค FCVA เพื่อศึกษาผลของพลังงานไอออนต่อสมบัติของฟิล์ม ควรมีการควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ที่จะส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม เช่น เซรามิกที่เป็นฉนวนคั่นระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนด ควรควบคุมให้มีค่าเท่ากัน ด้วยการใช้เซรามิกชิ้นเดียวกันผิวถูกเคลือบด้วยแกรไฟต์มีความต้านทานเท่ากัน ซึ่งสิ่งนี้จะบ่งชี้ให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงพลาสมาที่มีความเข้มข้นและอัตราการตกสะสมแตกต่างกัน

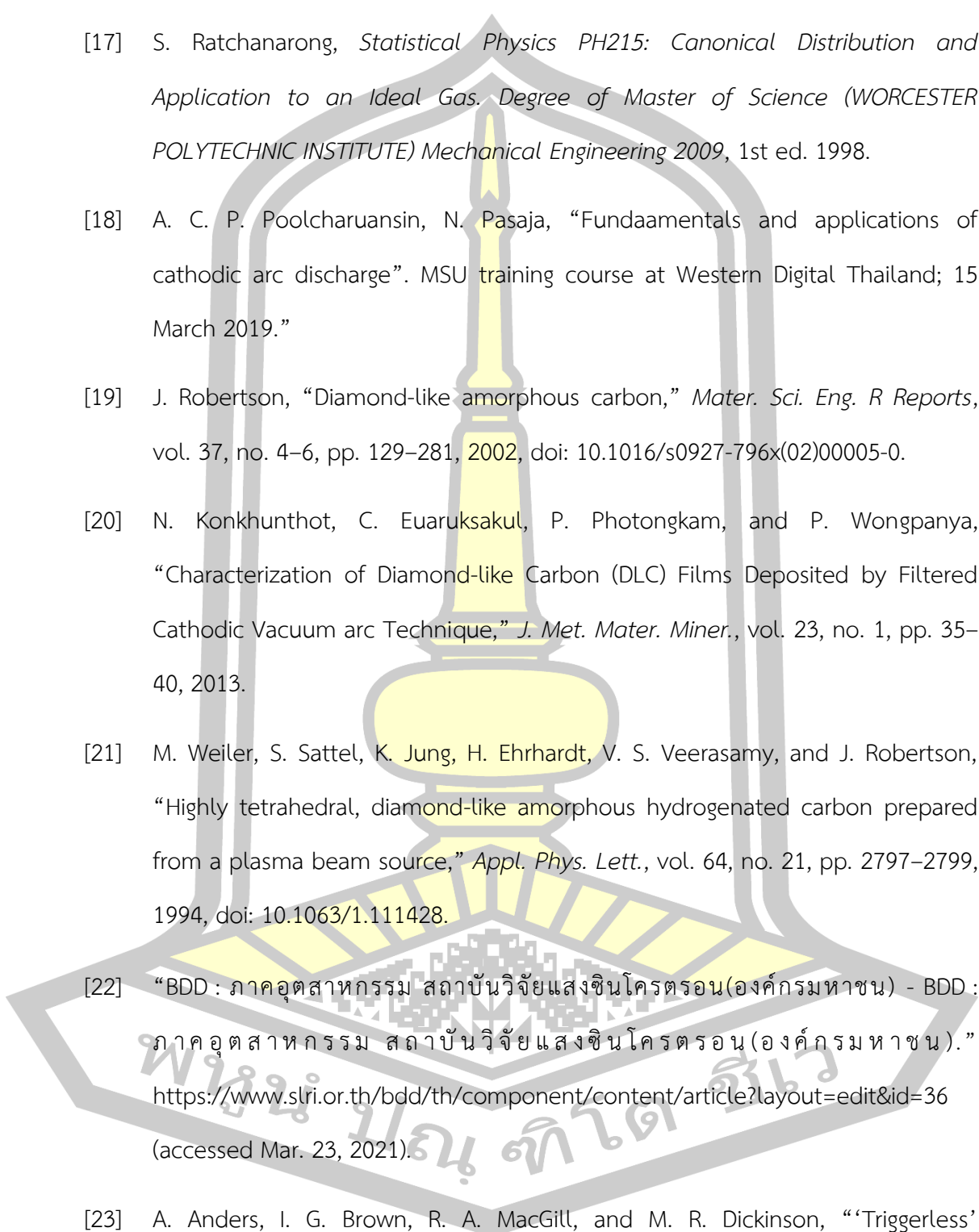
บรรณานุกรม



- 
- [1] B. K. Tay, Z. W. Zhao, and D. H. C. Chua, "Review of metal oxide films deposited by filtered cathodic vacuum arc technique," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 52, no. 1–3, pp. 1–48, 2006, doi: 10.1016/j.mser.2006.04.003.
- [2] G. Y. Yushkov, A. Anders, E. M. Oks, and I. G. Brown, "Ion velocities in vacuum arc plasmas," *J. Appl. Phys.*, vol. 88, no. 10, pp. 5618–5622, 2000, doi: 10.1063/1.1321789.
- [3] J. Kutzner and H. Craig Miller, "Integrated ion flux emitted from the cathode spot region of a diffuse vacuum arc," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 4, pp. 687–693, 1992, doi: 10.1088/0022-3727/25/4/015.
- [4] A. Anders and G. Y. Yushkov, "Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 8, pp. 4824–4832, 2002, doi: 10.1063/1.1459619.
- [5] A. Anders and G. Y. Yushkov, "The kinetic energy of carbon ions in vacuum arc plasmas: A comparison of measuring techniques," *J. Appl. Phys.*, vol. 96, no. 2, pp. 970–974, 2004, doi: 10.1063/1.1762712.
- [6] H. Ehrhardt, "New developments in the field of superhard coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 74–75, no. PART 1, pp. 29–35, 1995, doi: 10.1016/0257-8972(95)08212-3.
- [7] A. P. Ehasarian, W. D. Münz, L. Hultman, U. Helmersson, I. Petrov, and F. Seitz, "High power pulsed magnetron sputtered CrN_x films," *Galvanotechnik*, vol. 94, no. 6, pp. 1480–1487+vi, 2003.
- [8] A. Anders, "A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching," *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 15, pp. 4087–4090, 2010, doi: 10.1016/j.tsf.2009.10.145.

- [9] H.-P. Hsueh, R. T. McGrath, B. Ji, B. S. Felker, J. G. Langan, and E. J. Karwacki, "Ion energy distributions and optical emission spectra in NF₃-based process chamber cleaning plasmas," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 19, no. 4, p. 1346, 2001, doi: 10.1116/1.1379794.
- [10] V. Kaeppelin, M. Carrère, and J.-M. Layet, "Ion energy distribution functions and Langmuir probe measurements in low pressure argon discharges," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 20, no. 2, pp. 526–529, 2002, doi: 10.1116/1.1451274.
- [11] A. Anders and E. Oks, "Charge-state-resolved ion energy distribution functions of cathodic vacuum arcs: A study involving the plasma potential and biased plasmas," *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 4, 2007, doi: 10.1063/1.2561226.
- [12] M. Badulescu, I. Gruia, C. Surdu-Bob, and C. Iacob, "Retarding field ion energy analysis of an anodic arc carbon plasma," *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.*, vol. 3, no. 12, pp. 1269–1272, 2009.
- [13] Thierry-corp., "Plasma Knowledge: What is Plasma Density?". Plasma Technology." <https://www.thierry-corp.com/plasma/plasma-resources/plasma-knowledgebase/what-is-plasma-density/>.
- [14] A. A. Fridman, *Plasma physics and engineering*. 1953-Boca Raton, 2nd ed. 2011.
- [15] A. Anders, "The evolution of ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas: A review," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, 2012, doi: 10.1088/0963-0252/21/3/035014.
- [16] N. Behlman, "Electron Energy Distribution Measurements in the Plume Region of a Low Current Hollow Cathode," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp.

1689–1699, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

- 
- [17] S. Ratchanarong, *Statistical Physics PH215: Canonical Distribution and Application to an Ideal Gas. Degree of Master of Science (WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE) Mechanical Engineering 2009*, 1st ed. 1998.
- [18] A. C. P. Poolcharuansin, N. Pasaja, “Fundamentals and applications of cathodic arc discharge”. MSU training course at Western Digital Thailand; 15 March 2019.”
- [19] J. Robertson, “Diamond-like amorphous carbon,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281, 2002, doi: 10.1016/s0927-796x(02)00005-0.
- [20] N. Konkunthot, C. Euaruksakul, P. Photongkam, and P. Wongpanya, “Characterization of Diamond-like Carbon (DLC) Films Deposited by Filtered Cathodic Vacuum arc Technique,” *J. Met. Mater. Miner.*, vol. 23, no. 1, pp. 35–40, 2013.
- [21] M. Weiler, S. Sattel, K. Jung, H. Ehrhardt, V. S. Veerasamy, and J. Robertson, “Highly tetrahedral, diamond-like amorphous hydrogenated carbon prepared from a plasma beam source,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 21, pp. 2797–2799, 1994, doi: 10.1063/1.111428.
- [22] “BDD : ภาคอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) - BDD : ภาคอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน).” <https://www.slri.or.th/bdd/th/component/content/article?layout=edit&id=36> (accessed Mar. 23, 2021).
- [23] A. Anders, I. G. Brown, R. A. MacGill, and M. R. Dickinson, “‘Triggerless’ triggering of vacuum arcs,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 31, no. 5, pp. 584–587, 1998, doi: 10.1088/0022-3727/31/5/015.

- [24] M. C. Polo, J. L. Andújar, A. Hart, J. Robertson, and W. I. Milne, "Preparation of tetrahedral amorphous carbon films by filtered cathodic vacuum arc deposition," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 9, no. 3, pp. 663–667, 2000, doi: 10.1016/S0925-9635(99)00339-8.
- [25] S. Sainio *et al.*, "In-situ functionalization of tetrahedral amorphous carbon by filtered cathodic arc deposition," *AIP Adv.*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.1063/1.5113484.
- [26] P. Souček *et al.*, "Superhard nanocomposite nc-TiC/a-C:H coatings: The effect of HiPIMS on coating microstructure and mechanical properties," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 311, pp. 257–267, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.021.
- [27] Y. Wang, X. Zhang, X. Wu, H. Zhang, and X. Zhang, "Superhard nanocomposite nc-TiC/a-C:H film fabricated by filtered cathodic vacuum arc technique," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 254, no. 16, pp. 5085–5088, 2008, doi: 10.1016/j.apsusc.2008.02.011.
- [28] M. Bonelli, A. P. Fioravanti, A. Miotello, and P. M. Ossi, "Structural and mechanical properties of ta-C films grown by pulsed laser deposition," *Europhys. Lett.*, vol. 50, no. 4, pp. 501–506, 2000, doi: 10.1209/epl/i2000-00297-5.
- [29] W. Dai, H. Zheng, G. Wu, and A. Wang, "Effect of bias voltage on growth property of Cr-DLC film prepared by linear ion beam deposition technique," *Vacuum*, vol. 85, no. 2, pp. 231–235, 2010, doi: 10.1016/j.vacuum.2010.06.001.
- [30] P. Guo, P. Ke, and A. Wang, "Incorporated W roles on microstructure and properties of W-C:H Films by a hybrid linear ion beam systems," *J. Nanomater.*, vol. 2013, pp. 23–29, 2013, doi: 10.1155/2013/530959.

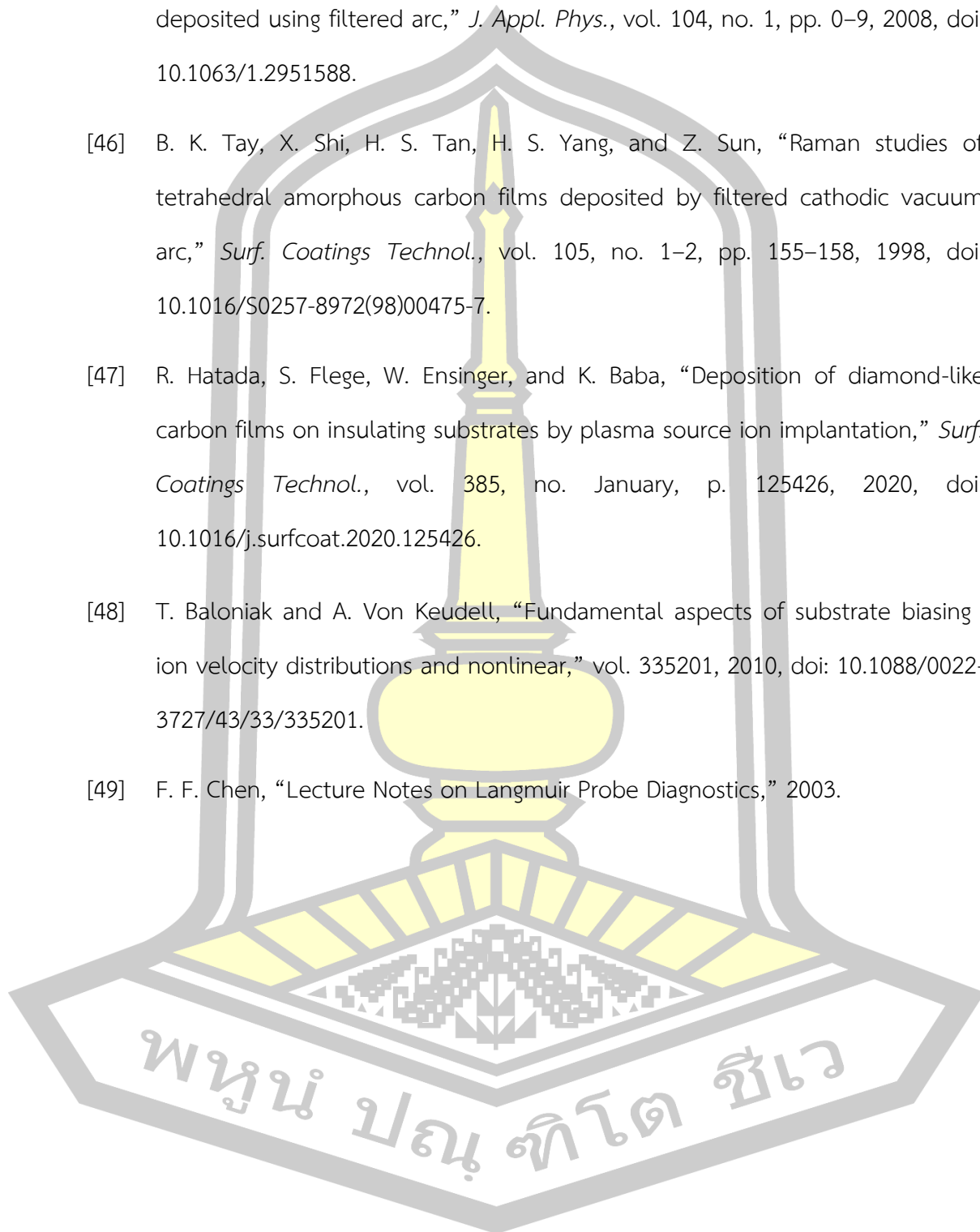
- [31] E. Byon, T. W. H. Oates, and A. Anders, "Coalescence of nanometer silver islands on oxides grown by filtered cathodic arc deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 10, pp. 1634–1636, 2003, doi: 10.1063/1.1558955.
- [32] J. A. R. J. K. Olthoff, R. J. Van Brunt, S. B. Radovanov, "IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology (Volume: 151, Issue: 1, 5 Jan. 2004)."
- [33] P. Sciences, "Diamond Coatings on Graphite for Plasma Facing Materials Isaela Villalpando de la Torre , MSc," no. May, 2010.
- [34] I. Ivanov, H. Ljungcrantz, G. Håkansson, I. Petrov, and J. E. Sundgren, "Ion energy distributions in reactive arc evaporation discharges used for deposition of TiN films," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 92, no. 1–2, pp. 150–156, 1997, doi: 10.1016/S0257-8972(96)03152-0.
- [35] J. K. Lee, O. V. Manuilenko, N. Y. Babaeva, H. C. Kim, and J. W. Shon, "Ion energy distribution control in single and dual frequency capacitive plasma sources," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 89–97, 2005, doi: 10.1088/0963-0252/14/1/012.
- [36] C. P. C. and N. S. J. Braithwaite, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing_ISBN0471005770.pdf*. 2011.
- [37] G. Greczynski and L. Hultman, "Time and energy resolved ion mass spectroscopy studies of the ion flux during high power pulsed magnetron sputtering of Cr in Ar and Ar/N₂ atmospheres," *Vacuum*, vol. 84, no. 9, pp. 1159–1170, 2010, doi: 10.1016/j.vacuum.2010.01.055.
- [38] C. Hayden, D. Gahan, and M. B. Hopkins, "Ion energy distributions at a capacitively and directly coupled electrode immersed in a plasma generated by a remote source," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 18, no. 2, 2009, doi:

10.1088/0963-0252/18/2/025018.

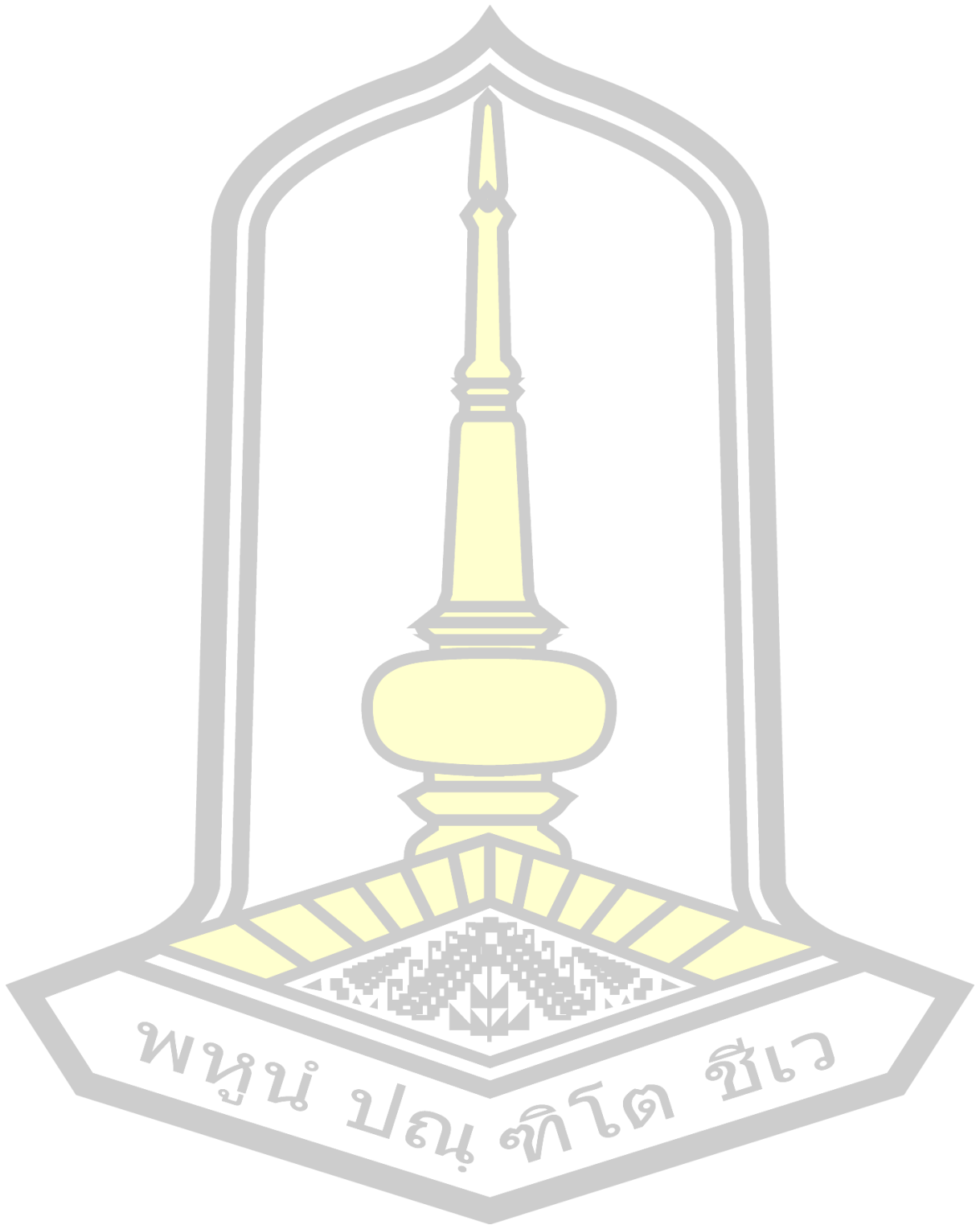
- [39] D. Brunner, B. LaBombard, R. Ochoukov, and D. Whyte, "Scanning retarding field analyzer for plasma profile measurements in the boundary of the Alcator C-Mod tokamak," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 3, 2013, doi: 10.1063/1.4793785.
- [40] P. Poolcharuansil, "The 2nd Training Workshop on Plasma and Fusion: RFA probe. Technological Plasma Research Unit, Faculty of Science, Mahasarakham University. 26-28 Jun 2019."
- [41] "[online] Available from: http://www.chem.umd.edu/wp-content/uploads/2014/01/Raman_Spectroscopy.jpg."
- [42] D. A. Lima-Oliveira *et al.*, "Adhesion Studies of Diamond-Like Carbon Films Deposited on Ti6Al4V Alloy after Carbonitriding," *Open J. Met.*, vol. 02, no. 01, pp. 1–7, 2012, doi: 10.4236/ojmetal.2012.21001.
- [43] I. Retzko, J. F. Friedrich, A. Lippitz, and W. E. S. Unger, "Chemical analysis of plasma-polymerized films: The application of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS) and fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)," *J. Electron Spectros. Relat. Phenomena*, vol. 121, no. 1–3, pp. 111–129, 2001, doi: 10.1016/S0368-2048(01)00330-9.
- [44] T. H. M. Van De Ven, C. A. De Meijere, R. M. Van Der Horst, M. Van Kampen, V. Y. Banine, and J. Beckers, "Analysis of retarding field energy analyzer transmission by simulation of ion trajectories," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 89, no. 4, 2018, doi: 10.1063/1.5018269.
- [45] J. Zhu, J. Han, X. Han, H. I. Schlager, and J. Wang, "Sp³-rich deposition

conditions and growth mechanism of tetrahedral amorphous carbon films deposited using filtered arc,” *J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 1, pp. 0–9, 2008, doi: 10.1063/1.2951588.

- [46] B. K. Tay, X. Shi, H. S. Tan, H. S. Yang, and Z. Sun, “Raman studies of tetrahedral amorphous carbon films deposited by filtered cathodic vacuum arc,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 105, no. 1–2, pp. 155–158, 1998, doi: 10.1016/S0257-8972(98)00475-7.
- [47] R. Hatada, S. Flege, W. Ensinger, and K. Baba, “Deposition of diamond-like carbon films on insulating substrates by plasma source ion implantation,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 385, no. January, p. 125426, 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125426.
- [48] T. Baloniak and A. Von Keudell, “Fundamental aspects of substrate biasing : ion velocity distributions and nonlinear,” vol. 335201, 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/33/335201.
- [49] F. F. Chen, “Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics,” 2003.



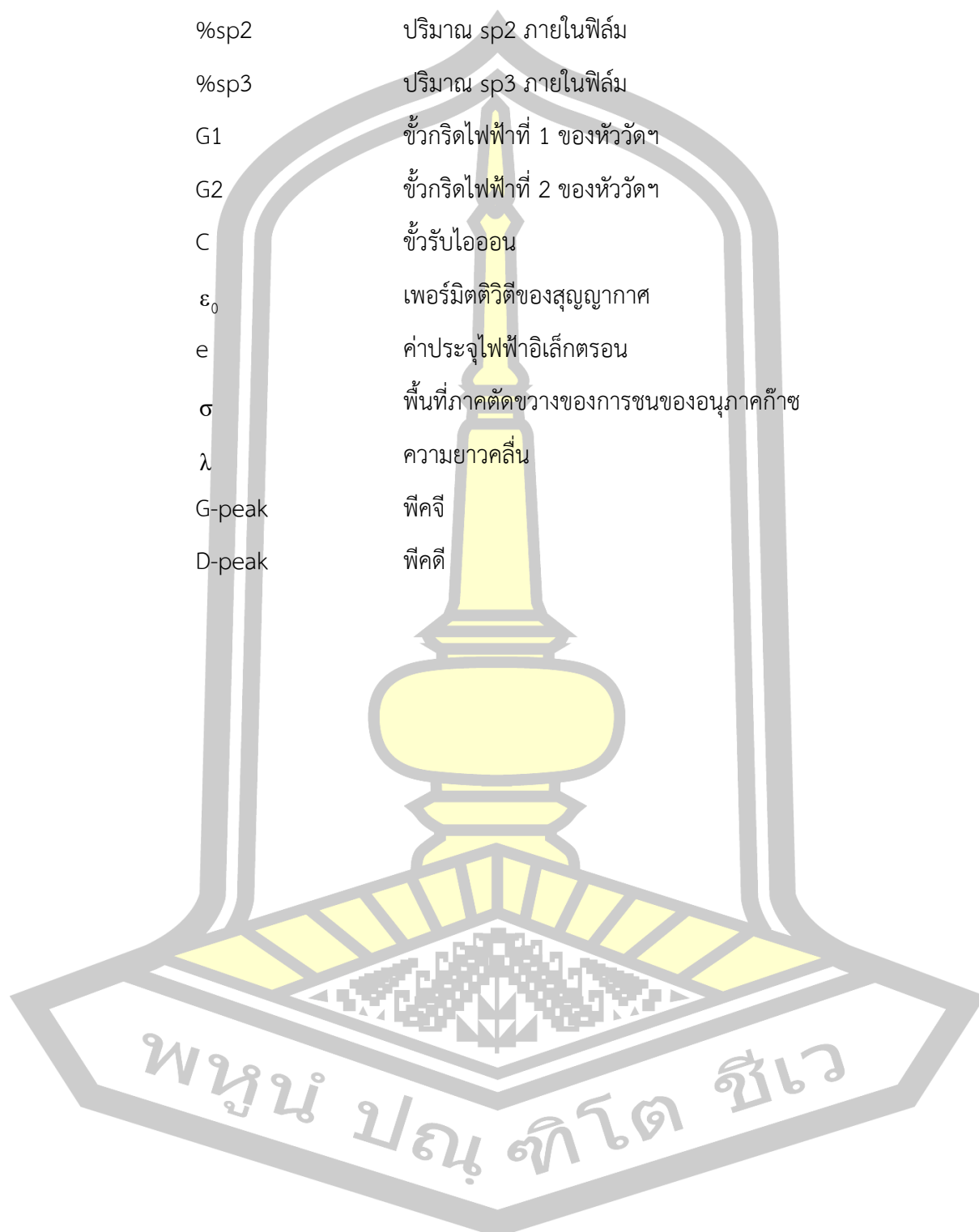
ภาคผนวก



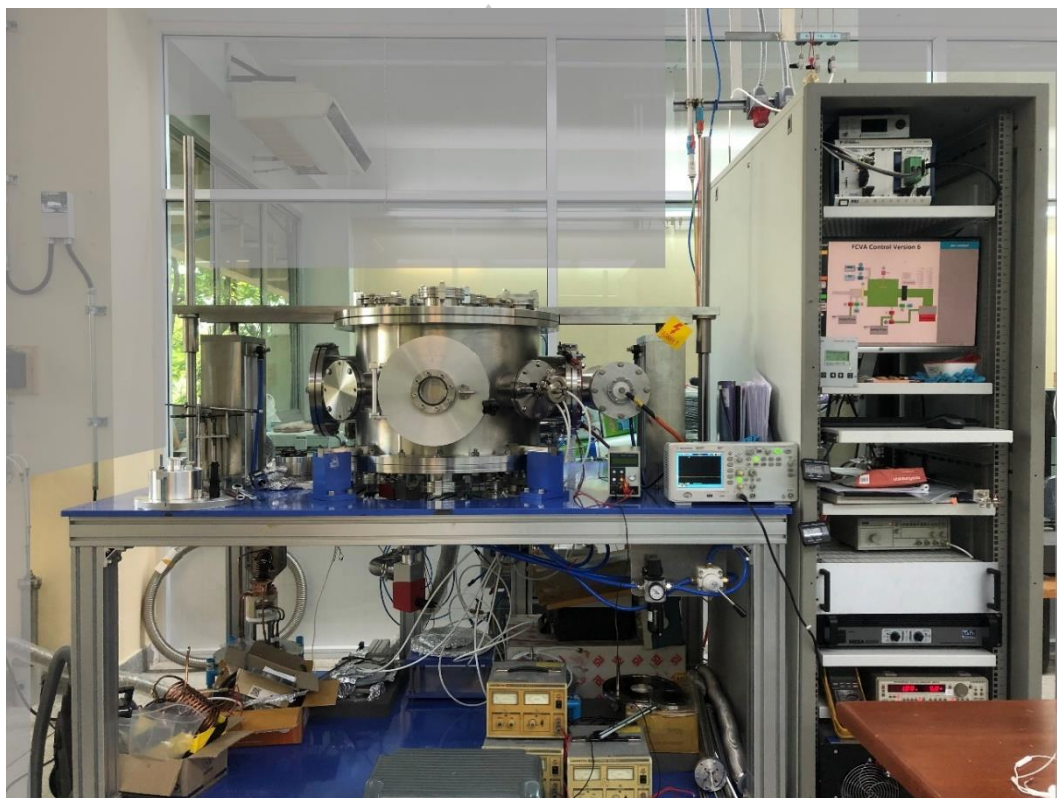
ภาคผนวก ก. อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
FCVA	filtered cathodic vacuum arc
PVD	physical vapor deposition
eV	electron volt
DLC	diamond like carbon
ta-C	tetrahedral amorphous carbon
IEDF	ion energy distribution function
TOF	time of flight spectrometer
RFA	retarding field ion energy analysis
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
XRR	X-ray reflectometry
P	ความดัน
n_g	ความหนาแน่นอนุภาค
k	ค่าคงที่ของโบลต์มันน์
T	อุณหภูมิก๊าซ
n_e	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
n_i	ความหนาแน่นของไอออน
n_n	ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง
Γ_i	ฟลักซ์ไอออน
A	พื้นที่หน้าตัด
v	อัตราเร็ว
L	ความยาว
N	จำนวนอนุภาค
u_i	อัตราเร็วไอออน
u_B	ความเร็วโบห์ม

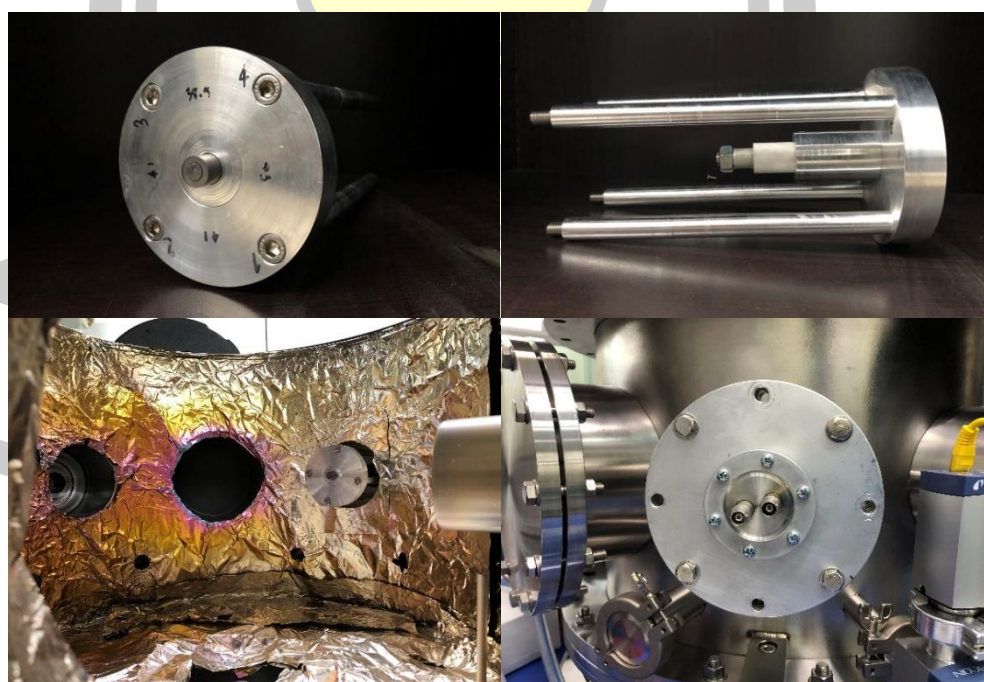
A_p	พื้นที่บริเวณรับไอออน
%sp ²	ปริมาณ sp ² ภายในฟิล์ม
%sp ³	ปริมาณ sp ³ ภายในฟิล์ม
G1	ชั่วคราวไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดฯ
G2	ชั่วคราวไฟฟ้าที่ 2 ของหัววัดฯ
C	ชั่วคราวไอออน
ϵ_0	เพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ
e	ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน
σ	พื้นที่ภาคตัดขวางของการชนของอนุภาคก๊าซ
λ	ความยาวคลื่น
G-peak	พีคจี
D-peak	พีคดี



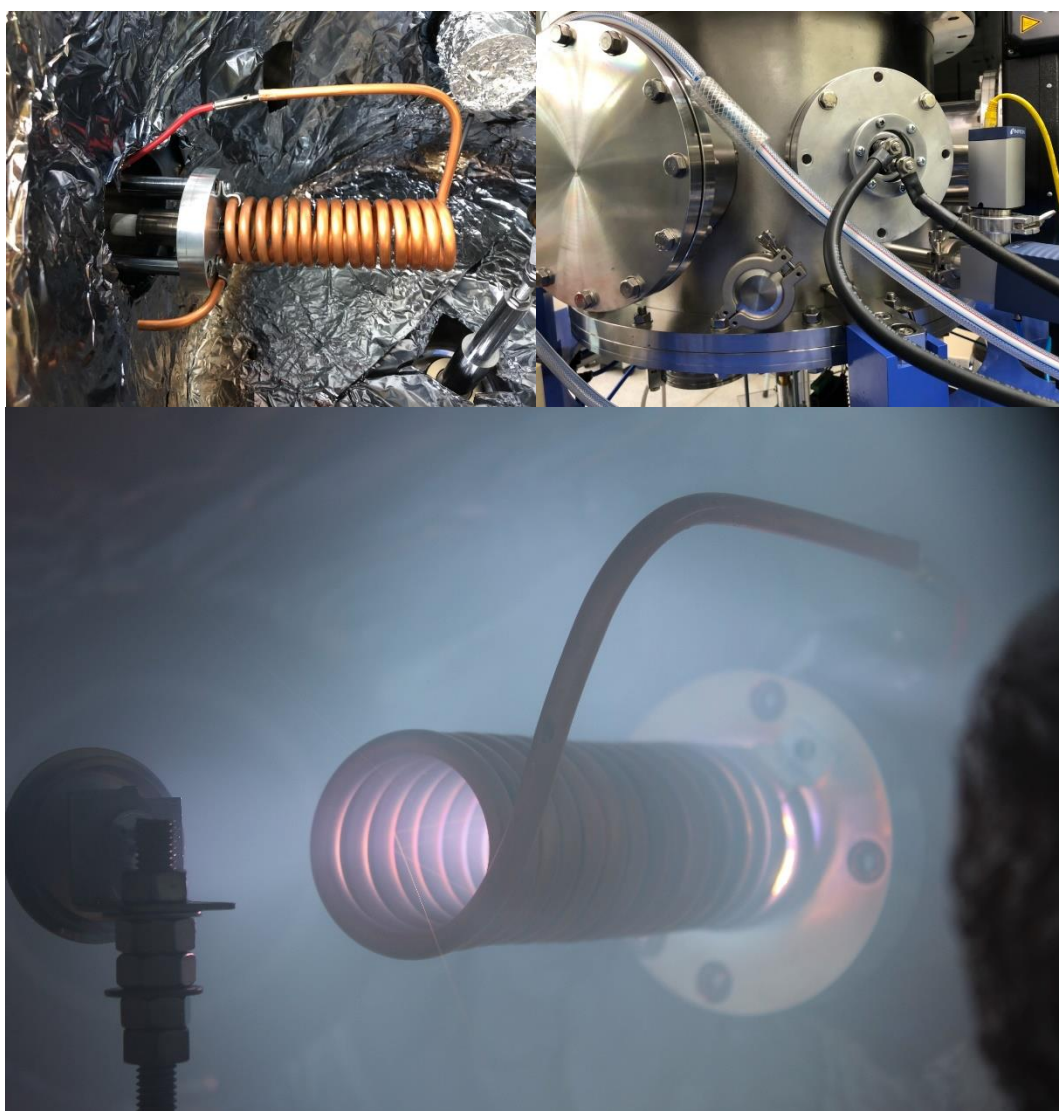
ภาคผนวก ข. ภาพระบบและอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ ข.1 ระบบ FCVA ที่ใช้ในการทดลอง



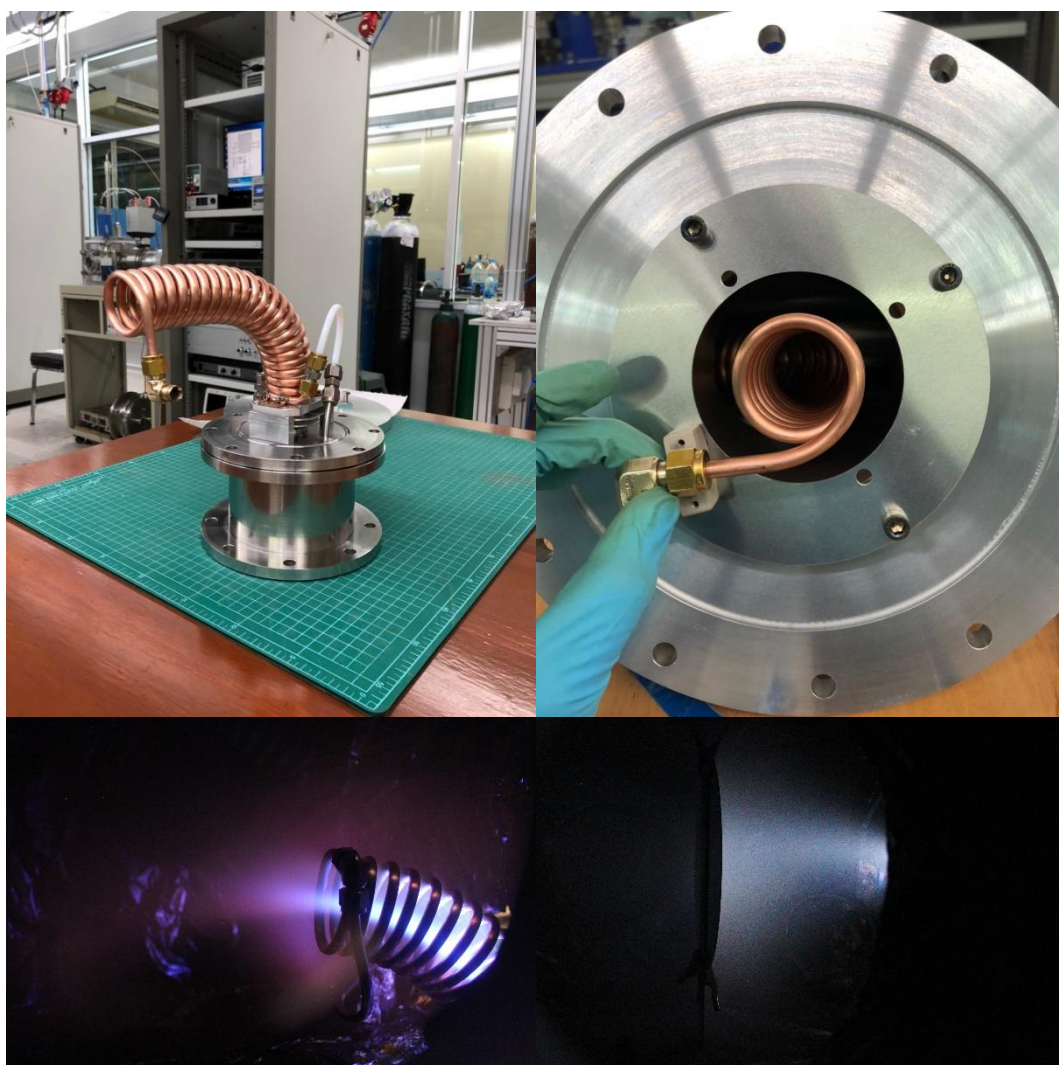
รูปที่ ข.2 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก รูปแบบที่ 1



รูปที่ ข.3 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก รูปแบบที่ 2



รูปที่ ข.4 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก รูปแบบที่ 3



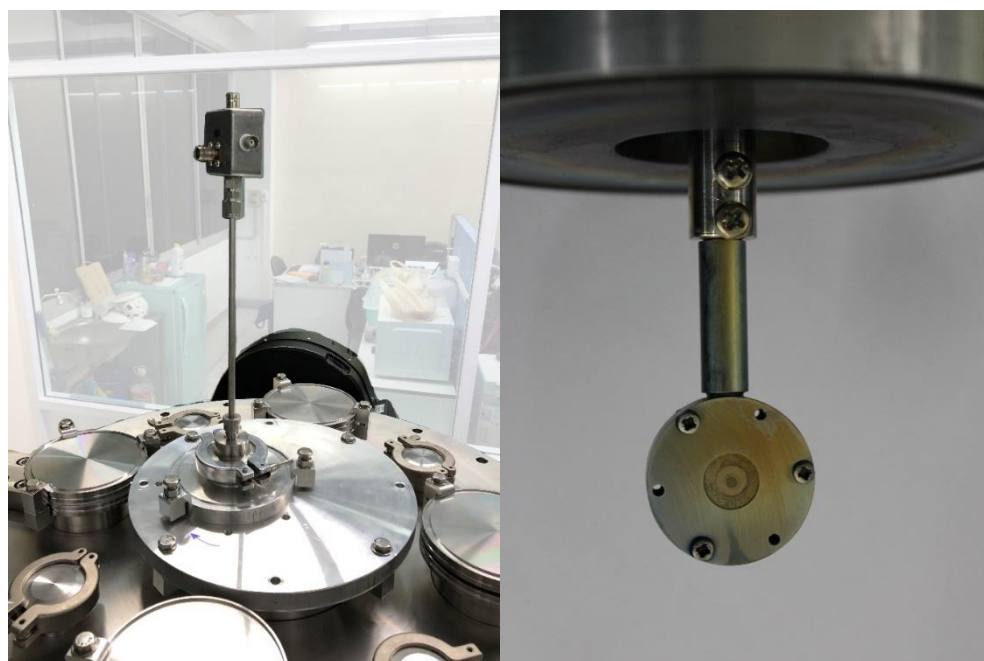
รูปที่ ข.5 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนการอาร์ก รูปแบบที่ 4



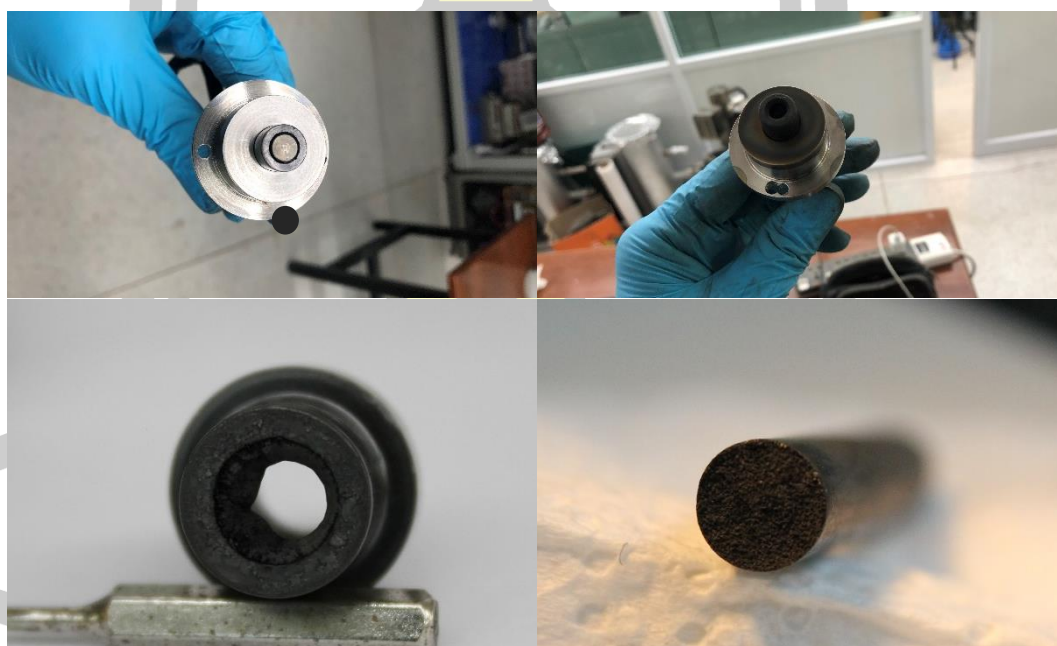


รูปที่ ข.6 แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยกระบวนอาร์ก รูปแบบที่ 5

พหุณ ปณ จักโต ชีเว



รูปที่ ข.7 หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามวงที่ถูกติดตั้งเข้าไปภายในห้องสุญญากาศของระบบ FCVA



รูปที่ ข.8 (ก) ขั้วแคโทด-แอโนด-ฉนวนที่ผิวเคลือบด้วยแกรไฟต์ ก่อนผ่านการอาร์ก (ข)หลังผ่านการอาร์ก (ค)ฉนวนที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคระดับไมโครจากเป้าแกรไฟต์ (ง)ผิวหน้าแท่งแกรไฟต์ ที่ผ่านการอาร์ก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	รายละเอียดอุปกรณ์	ภาพประกอบ
1	ภาชนะสุญญากาศ ขึ้นรูปจากท่อสแตนเลส 304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร	
2	เทอร์โบโมเลกุลปั๊ม อัตราการหมุน 660 Hz อัตราการหมุนในโหมดเตรียมพร้อม 440 Hz	
3	DCU controller display and operating unit	
4	ปั๊มกลโรตารี	
5	เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (mass flow controller) ควบคุมอัตราการไหล 0 – 200 sccm	
6	เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (mass flow controller)	
7	วาล์วเพนดูลัม (pendulum valve) วาล์วลูกตุ้มปรับเปลี่ยนความดันของระบบสุญญากาศ	
8	เกจวัดความดัน (wide range gauge)	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ภัทรเวท บัวระบัดทอง
วันเกิด	16 มิถุนายน 2539
สถานที่เกิด	อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 80 หมู่ที่ 8 ตำบลคงใหญ่ อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ 44120
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2564 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2558 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนลำปลายมาศ อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ พ.ศ. 2552 ระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านคงใหญ่ อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์

พณฺณํ ปณฺ ฅกโถ ฅเว