

## รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์แกรฟีนโฟมจากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5

Synthesis of graphene foam from plastic waste for PM2.5 capture

จัดทำโดย

ผศ. ดร. อรรถวัชร รวมไมตรี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563

## บทสรุปผู้บริหาร

ขยะพลาสติกเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนชาวไทย ในแต่ละวันจะมีขยะพลาสติกจำนวนมากถูกทิ้งในพื้นที่ปลอดขยะ เช่น ในป่า ในแหล่งน้ำรวมถึงทะเล เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างหนักต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ นอกจากนี้ปัญหาฝุ่น PM2.5 ซึ่งเป็นปัญหาที่ประเทศไทยเกือบทั้งประเทศได้รับผลกระทบกันทุกปี ดังนั้นการแปรรูปขยะพลาสติกให้เป็นวัสดุที่สามารถดักจับฝุ่น PM2.5 ประสิทธิภาพสูง ต้นทุนประหยัด จะเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งเรื่องของขยะและมลพิษทางอากาศ ซึ่งจะส่งผลดีต่อสุขภาพของประชาชน

ด้วยเหตุนี้โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักคือ 1.) เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน และ 2.) เพื่อศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของแกรฟีนโพลีเมอร์ เช่น คุณภาพ ความพรุน ประสิทธิภาพของการดักจับฝุ่น PM2.5 และการระบายอากาศ

สำหรับระเบียบวิธีวิจัย ทีมวิจัยได้ทำการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์โดยเริ่มจากการปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์หนา 2 มิลลิเมตร โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะหลอดพลาสติกและขยะขวดน้ำพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ไปแช่ในสารละลาย  $FeCl_3$  เพื่อทำการละลายโลหะนิกเกิลและเพื่อให้ได้แกรฟีนโพลีเมอร์ที่มีเหล็กผสม โดยแกรฟีนโพลีเมอร์นี้จะถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น PM1, PM2.5, PM10 จากควันธูปและอากาศจริง ส่วนสารละลายของเสีย  $FeCl_3$  ที่ใช้แล้วจะถูกนำไปแปรรูปเป็นแกรฟีนผงและแกรฟีนผงหุ้มโลหะ

จากการศึกษาพบว่าแกรฟีนสามารถปลูกบนนิกเกิลโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะหลอดพลาสติกและขยะขวดน้ำพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอนได้ โดยในกรณีของการใช้ขยะหลอดพลาสติกในการปลูกแกรฟีน ทีมวิจัยพบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการปลูกที่อุณหภูมิ 800 °C นาน 30 นาที โดยใช้ปริมาณขยะหลอดพลาสติก 0.5 กรัม และในกรณีของการใช้ขยะขวดน้ำพลาสติกในการปลูกแกรฟีน ทีมวิจัยพบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการปลูกที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 30 นาที และใช้ปริมาณขวดพลาสติก 0.1 กรัม

ทีมวิจัยได้ทำการเติมเหล็กเพื่อเพิ่มแรงไฟฟ้าสถิต โดยการแช่ตัวอย่างแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ในสารละลาย  $FeCl_3$  นาน 1 วัน โดยตัวอย่างแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะเหลือความหนาประมาณ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งทีมวิจัยได้นำตัวอย่างแกรฟีนโพลีเมอร์ดังกล่าวไปตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ mercury intrusion porosimetry (MIP) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าตัวอย่างแกรฟีนโพลีเมอร์นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 14.8494  $m^2/g$  และมีความพรุนมากถึง 96.61% (รายงานผลการทดสอบแนบอยู่ใน

ภาคผนวก) นอกจากนี้ผลการทดสอบการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 จากควันธูปและอากาศจริง พบว่า ประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฝุ่นและความเร็วที่ฝุ่นเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งพบว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่น PM2.5 จากท่อไอเสียยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันและหน้าากการกรองฝุ่นขนาดเล็ก เนื่องจากแกรฟีนโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 จากอากาศจริงได้สูงถึง 81.74%, 82.69%, และ 81.58% ตามลำดับ ในกรณีที่ผู้สวมใส่หน้ากากหายใจปกติ นอกจากนี้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ยังระบายอากาศได้ดีเยี่ยม เนื่องจากผลการทดสอบความดันที่แตกต่างระหว่างก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ (pressure drop) มีค่าเข้าใกล้ 0 Pa ซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) มีค่าเป็นอนันต์ โดยการระบายอากาศได้ดีมากเช่นนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบความพรุนของแกรฟีนโพลีเมอร์ที่สูงมากถึง 96.61%

นอกจากนี้ทีมวิจัยได้ทดลองแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  โดยการนำไปผสมกับน้ำตาล และอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน แล้วจึงนำมาเผาที่อุณหภูมิ 700 °C ภายใต้อากาศของแก๊สอาร์กอน นาน 6 ชั่วโมง ซึ่งจะได้แกรฟีนผงหุ้มโลหะซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กที่สามารถดูดติดกับแม่เหล็กได้ โดยตัวอย่างแกรฟีนผงหุ้มโลหะนี้ยังสามารถดักจับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ และสามารถแยกออกจากน้ำโดยการใส่แม่เหล็กดูดออกมา ซึ่งวิธีการนี้ง่ายและสะดวกเพราะไม่ต้องใช้วิธีการกรอง นอกจากนี้ทีมวิจัยได้แสดงการสังเคราะห์แกรฟีนผงมูลค่าสูง ต้นทุนประหยัด โดยการนำแกรฟีนผงหุ้มโลหะไปแช่ในกรด HCl

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์แกรไฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5 โดยโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาการปลูกแกรไฟีนบนนิโคเทิลโพลีเมอร์ (3×4×0.2 cm<sup>3</sup>) โดยใช้วิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่ใช้ขยะหลอดพลาสติกและขยะขวดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการปลูกแกรไฟีนที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลานาน 30 นาที โดยใช้ปริมาณขยะหลอดพลาสติก 0.5 กรัม เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกแกรไฟีน

โครงการวิจัยนี้ได้แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพและตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) ของแกรไฟีนโพลีเมอร์ที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าแกรไฟีนโพลีเมอร์สามารถดักจับฝุ่นได้ทั้ง PM1, PM2.5, และ PM10 โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 เป็น 81.74%, 82.69% และ 81.58% ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดสอบความพรุนด้วยเทคนิค mercury intrusion porosimetry (MIP) แสดงให้เห็นว่าแกรไฟีนโพลีเมอร์นี้มีค่าความพรุนสูงมากถึง 96.61% เป็นเหตุให้ค่าตัวประกอบคุณภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟีนโพลีเมอร์นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟีนโพลีเมอร์มีความสามารถในการระบายอากาศดีเยี่ยม

นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้ยังศึกษาการแปรรูปกากของเสีย FeCl<sub>3</sub> ที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แกรไฟีน ให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูง เช่น แกรไฟีนผงและแกรไฟีนผงหุ้มโลหะ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นโครงการวิจัยนี้ได้สาธิตการใช้แกรไฟีนผงหุ้มโลหะในการดักจับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำและแสดงการแยกแกรไฟีนผงหุ้มโลหะจากน้ำโดยใช้แม่เหล็กอีกด้วย

**คำสำคัญ:** แกรไฟีนโพลีเมอร์, PM2.5, แผ่นกรองฝุ่น, แกรไฟีนผง

## Abstract

This research project studies the synthesis of graphene foam from plastic waste for PM2.5 capture. This research project demonstrates the growth of graphene on nickel foam (3×4×0.2 cm<sup>3</sup>) by chemical vapor deposition (CVD) using waste plastic straws and waste plastic water bottles as carbon sources. In the case of using waste plastic straws as a carbon source, the growth temperature, annealing time, and the quantity of waste plastic straws for the best condition of the growth of graphene on nickel form by CVD are 800 °C, 30 minutes and 0.5 gram, respectively.

This research project also investigates the efficiency and quality factor of 1.6 mm thickness graphene foam filters. The results show that the graphene foam can capture PM1, PM2.5, and PM10 and the filtration efficiency of PM1, PM2.5, and PM10 are 81.74%, 82.69%, and 81.58%, respectively. In addition, the mercury intrusion porosimetry (MIP) results show that the porosity of the graphene foam filter is 96.61% resulting in the quality factor of graphene foam filter is almost infinite revealing that the graphene foam filter has a good ventilation.

In addition, this research project also demonstrates the transmutation of waste FeCl<sub>3</sub> into highly valued graphene powder and graphene-wrapped metal powder. Moreover, this research project shows that graphene-wrapped metal powder has magnetic property and can remove organic dye from water. In addition, the graphene-wrapped metal powder is removed from water by magnet

**Key words:** graphene foam, PM2.5, filter, graphene powder

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)	2
บทสรุปผู้บริหาร	3
บทคัดย่อ	5
Abstract	6
สารบัญเรื่อง	7
สารบัญตาราง	9
สารบัญภาพ	11
1. บทนำ	16
2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	18
3. วัตถุประสงค์	22
4. ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	22
4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุ	24
4.2 การทดสอบการดักจับฝุ่น PM2.5	24
4.3 แนวทางการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์และแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ใช้กรองฝุ่น PM2.5 แล้ว	26
4.3.1 ของเสียที่เกิดจากกระบวนการละลายนิกเกิลโพลีเมอร์	26
4.3.2 ของเสียที่เกิดจากแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ใช้ดักจับฝุ่นแล้ว	28
5. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย	32
5.1 การปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะหลอดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน	32
5.2 การปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขวดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน	38
5.3 การทดสอบการดักจับฝุ่น PM2.5 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์	44
5.4 การทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นจากอากาศจริงของแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์	62
5.5 การกำจัดของเสียเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> )	85
5.5.1 การสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะสำหรับบำบัดน้ำเสีย	85
5.5.2 การสังเคราะห์แกรฟีนผงคุณภาพสูง ราคาประหยัด	91
6. อภิปรายและวิจารณ์ผล	93
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	97
7.1 สรุปผลการวิจัย	97

7.2 ข้อเสนอแนะ	98
8. บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก	102

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงราคาต้นทุนโดยประมาณที่ลดลงเมื่อใช้ขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบในการปลูกแกรฟีน (อ้างอิงราคาจากห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการสังเคราะห์แกรฟีน ม.ธรรมศาสตร์)	21
ตาราง 2 แสดงต้นทุนในการปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพล์มด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี 1 ครั้ง (ไม่รวมค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์) โดยอ้างอิงราคาจากห้องปฏิบัติการการสังเคราะห์แกรฟีน ม.ธรรมศาสตร์	21
ตาราง 3 แสดงความเข้มของรามานพีก D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม	36
ตาราง 4 แสดงความเข้มของรามานพีก D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติก 0.5 กรัม	37
ตาราง 5 แสดงความเข้มของรามานพีก D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณขวดพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม	41
ตาราง 6 แสดงความเข้มของรามานพีก D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณขวดน้ำพลาสติก 0.5 กรัม	42
ตาราง 7 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพล์ม	47
ตาราง 8 สรุปประสิทธิภาพการกรองฝุ่นจากควันธูปขนาด PM1, PM2.5 และ PM10 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพล์ม	61
ตาราง 9 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน (ระหว่างความดันอากาศภายนอกกับความดันอากาศในถ้วยแก้วหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพล์ม) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ที่ช่วงเวลาต่างๆ	64
ตาราง 10 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของการดักจับฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ที่อัตราการไหลต่างๆ	70
ตาราง 11 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน (ระหว่างความดันอากาศภายนอกกับความดันอากาศในถ้วยแก้วหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพล์ม) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564	73
ตาราง 12 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน (ระหว่างความดันอากาศภายนอกกับความดันอากาศในถ้วยแก้วหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพล์ม) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	79
ตาราง 13 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของการดักจับฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 sccm	84
ตาราง 14 แสดงปริมาณนิกเกิลในแต่ละตัวอย่าง	86

<p>ตาราง 15 แสดงต้นทุนในการสังเคราะห์แกรไฟีนผงหุ้มโลหะและแกรไฟีนผง 1 ครั้ง (ไม่รวมค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์) โดยอ้างอิงราคาจากห้องปฏิบัติการการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้แกรไฟีน ม.ธรรมศาสตร์</p>	<p>96</p>
--	-----------

## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูป 1 แกร์ฟีนโพลีเมอร์ที่ขายในเวปไซด์ amazon เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน 2562	18
รูป 2. (a) โครงสร้างของแกร์ฟีน และ (b) พันธะบนแกร์ฟีน รูปที่ขยายแสดงการกระจายแบบเส้นตรงของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่จุด K	19
รูป 3 กลไกการสังเคราะห์แกร์ฟีนบนนิกเกิลด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิสูง (900 °C) โดยใช้แก๊สมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอน	20
รูป 4 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์แกร์ฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน	23
รูป 5 ชุดเตาเผาที่ใช้ในการสังเคราะห์แกร์ฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน	23
รูป 6 ขวดโหลจำลองขนาดเล็ก (H-Cell) สำหรับการวัดฝุ่น PM2.5	25
รูป 7 ขวดโหลจำลองขนาดเล็ก (H-Cell) สำหรับการวัดฝุ่น PM2.5 ที่ถูกดักให้ติดกันด้วยปากกาจับชิ้นงานและใช้ฟองน้ำเพื่อลดแรงกดแก่แผ่นแกร์ฟีนโพลีเมอร์	25
รูป 8 แกร์ฟีนผงหุ้มเหล็กที่ใช้น้ำตาลและสารละลาย FeCl <sub>3</sub> เป็นวัสดุติบในการสังเคราะห์	27
รูป 9 ราคาแกร์ฟีนผงของ Merck ที่ขายแกร์ฟีนผง 0.5 กรัม ในราคา 12512 บาท (544 SGD×23 บาท)	28
รูป 10 (ซ้าย) เครื่องซั่งน้ำหนักความแม่นยำสูงชนิด 4 ตำแหน่ง (ขวา) เครื่องกวนสาร	29
รูป 11 เตาอบลมร้อน	30
รูป 12 เครื่องกล่องถุงมือ (glovebox) ที่บรรจุแก๊สอาร์กอน ใช้สำหรับการประกอบแบตเตอรี่แกร์ฟีนซึ่งภายในมีแผ่นลิเทียม (ซีวแอร์โนด) และ สารอิเล็กโทรไลต์	30
รูป 13 ชุดเครื่องมือสำหรับการประกอบแบตเตอรี่แบบเหรียญซึ่งประกอบด้วย เครื่องกดอัดแบตเตอรี่แบบเหรียญ separator spring spacer กรอบแบตเตอรี่แบบเหรียญ CR2032 และมีดสำหรับตัด separator	31
รูป 14 เครื่อง potentiostat สำหรับวัดเคมีไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่	31
รูป 15 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านการปลูกแกร์ฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ขยะพลาสติกปริมาณตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน	33

รูป 16 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านการปลูกแกรฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกปริมาณ 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน	34
รูป 17 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีก D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม	36
รูป 18 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีก D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณพลาสติก 0.5 กรัม	37
รูป 19 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านการปลูกแกรฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกปริมาณตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน	39
รูป 20 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านการปลูกแกรฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกปริมาณ 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน	40
รูป 21 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีก D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณขี้เถ้าพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม	41
รูป 22 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีก D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณขี้เถ้าพลาสติก 0.5 กรัม	42
รูป 23 การทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น PM2.5 ของแผ่นกรองแกรฟีนโพลีเมอร์โดยใช้วิธีเป็นแหล่งฝุ่น PM2.5	45
รูป 24 (บน) กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีแดง) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์	46
รูป 25 การทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ความหนาแน่นของฝุ่น PM2.5 สูงมาก	51
รูป 26 กราฟความหนาแน่นของฝุ่น PM2.5 ที่ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ ที่ทดสอบในสภาวะความหนาแน่นฝุ่นสูงมาก	52
รูป 27 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 1	53
รูป 28 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 1	53
รูป 29 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 1	54





รูป 64 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	80
รูป 65 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	81
รูป 66 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	81
รูป 67 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	82
รูป 68 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	82
รูป 69 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM1 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	83
รูป 70 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM2.5 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	83
รูป 71 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM10 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	84
รูป 72 XRD pattern ที่วัดบนตัวอย่างแกรฟีนผงหุ้มโลหะที่ได้จากกระบวนการแปรรูปสารละลายของเสียเฟอร์ริกคลอไรด์และนิกเกิลคลอไรด์	87
รูป 73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลในสารละลายและอัตราส่วนของแกรฟีนและโลหะ	88
รูป 74 แกรฟีนผงหุ้มโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก	89
รูป 75 สารละลาย Fuchsin มีลักษณะเป็นสีแดง ปริมาณ 10 มิลลิลิตร	90
รูป 76 สารละลายที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำโดยแกรฟีนผงหุ้มโลหะ	91
รูป 77 ราคาแกรฟีนผงที่เสนอขายในเว็บไซต์ของ sigmaaldrich.com	92
รูป 78 XRD pattern ของแกรฟีนผงหุ้มโลหะตัวอย่าง GFeNi 1.6407 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีแดง) การละลายโลหะเพื่อให้ได้แกรฟีนผง	93
รูป 79 ราคาผงแกรฟีนออกไซด์ที่ผสมกับ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กที่ขายผ่านเว็บไซต์ Aliexpress ในราคากรัมละ 28,414 บาท (\$848.19×33.5 บาท)	96

## 1. บทนำ

ขยะพลาสติกเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนชาวไทย ในแต่ละวันจะมีขยะพลาสติกจำนวนมากถูกทิ้งในพื้นที่ปลอดขยะ เช่น ในป่า ในแหล่งน้ำรวมถึงทะเล เป็นต้น ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหาการเสียชีวิตของสัตว์น้ำที่กินขยะพลาสติกเข้าไป นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อมนุษย์ที่รับประทานสัตว์น้ำที่กินขยะพลาสติกด้วย โดยมนุษย์จะรับไมโครพลาสติกที่อยู่ในตัวของสัตว์น้ำที่รับประทานด้วย ยิ่งไปกว่านั้นขยะพลาสติกยังใช้เวลานานมากในการย่อยสลาย ด้วยเหตุนี้การรอเวลาให้ธรรมชาติเป็นผู้ย่อยสลายขยะพลาสติกอาจจะไม่ทันการ วิธีการแก้ปัญหาที่ดีวิธีหนึ่งคือการเปลี่ยนขยะพลาสติกที่เป็นของเสียที่สร้างปัญหาแก่สิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงที่เพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจและช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมของประเทศ

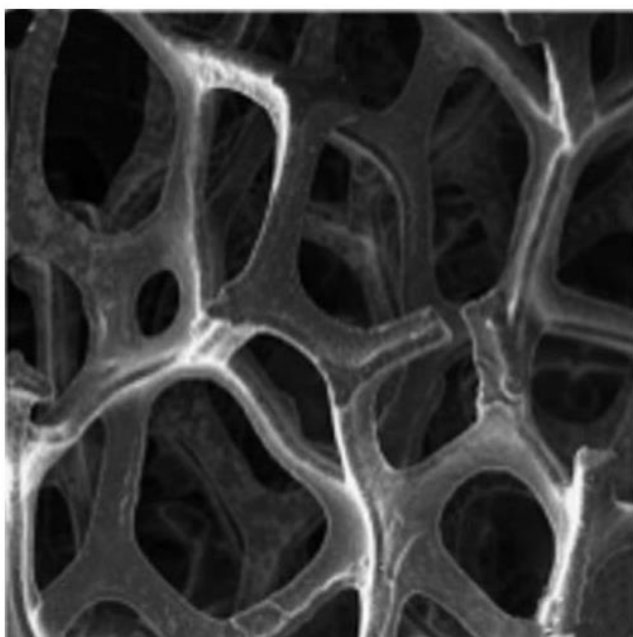
PM2.5 คืออนุภาคของฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยเกือบทั้งประเทศต้องเผชิญกับปัญหา PM2.5 ทุกปี และเนื่องด้วยฝุ่น PM2.5 นั้นไม่จับตัวกับน้ำ ดังนั้นการกำจัดฝุ่น PM2.5 ด้วยวิธีดั้งเดิมคือการใช้น้ำฉีดจึงไม่ได้ผล ยิ่งไปกว่านั้นมลพิษทางอากาศที่เกิดจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ยังสร้างปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อย่างรุนแรง โดยฝุ่น PM2.5 จะเป็นสาเหตุหลักของโรคทางเดินหายใจของมนุษย์ ดังนั้นการแปรรูปขยะพลาสติกให้เป็นวัสดุที่สามารถดักจับฝุ่น PM2.5 จะเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งเรื่องของขยะและมลพิษทางอากาศ ซึ่งจะส่งผลดีต่อสุขภาพของประชาชน

แกรฟีนเป็นวัสดุ 2 มิติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยแกรฟีนจะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูงมาก (แข็งกว่าเพชร) นำไฟฟ้าได้ดีมาก มีความยืดหยุ่นสูงคล้ายยาง ทนการกัดกร่อนได้ดี มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง น้ำหนักเบา เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้จึงทำให้แกรฟีนมีราคาที่สูงมาก ถึงแม้ว่าต้นทุนการสังเคราะห์จะถูกก็ตาม รูป 1 แสดงราคาของแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ขายในเวปไซด์ amazon เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน 2562 โดยจะเห็นได้ว่าแกรฟีนขนาด 3\*3 ตารางเซนติเมตร ราคาประมาณ 8788.5 บาท (283.5\*31 บาท)

แกรฟีนโพลีเมอร์เป็นแกรฟีน 3 มิติชนิดหนึ่งที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก มีความยืดหยุ่นสูง นำไฟฟ้าได้ดีมาก น้ำหนักเบา ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสำหรับการพัฒนาตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ นอกจากนี้แกรฟีนโพลีเมอร์ยังมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM<sub>2.5</sub> และเนื่องด้วยแกรฟีนโพลีเมอร์มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก ดังนั้นแกรฟีนโพลีเมอร์จึงสามารถดักจับฝุ่น PM<sub>2.5</sub> ในปริมาณที่มากได้อีกด้วย

แกรฟีนโพลีเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ต้นทุนประหยัดแต่สามารถสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์คุณภาพสูงในปริมาณที่มากได้ โดยทั่วไปวิธีการนี้จะนิยมใช้แก๊สมีเทนหรือแก๊สอะเซทิลีนที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นแหล่งของคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตามยังมีสารอีกมากมายที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและสามารถใช้แทนแก๊สทั้งสองชนิดนี้ได้เช่นกัน ดังนั้นการนำขยะพลาสติกที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแกรฟีนโพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับดักจับฝุ่น PM2.5 นอกจากจะทำให้ได้แกรฟีนโพลีเมอร์คุณภาพสูงและราคาประหยัดแล้ว ยังช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกและปริมาณ PM2.5 ในอากาศ ที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และยังช่วยเพิ่มการเติบโตของอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์ใหม่ (New S-curves) ได้อีกด้วย เนื่องจากแกรฟีนโพลีเมอร์สามารถนำไปปรับปรุงขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดของหุ่นยนต์และยานยนต์ไฟฟ้า และขั้วไฟฟ้าในเครื่องมือแพทย์ต่างๆ

ด้วยเหตุนี้โครงการวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี เพื่อให้ได้แผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์สำหรับดักจับฝุ่น PM2.5 ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์เป็นหน้ากากกรองฝุ่น PM2.5 ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร โดยโครงการวิจัยนี้จะสอดคล้องกับ โปรแกรมที่ 7 ในส่วนของประเทศไทยไร้ขยะ (FS7) และ PM2.5 (FS8) ซึ่งจะให้ผลสัมฤทธิ์คือ ลดปริมาณขยะ (KR2.7.1) ลดปริมาณ PM2.5 (KR2.7.2) และลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (KR2.7.5) เนื่องจากแกรฟีนโพลีเมอร์สามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงในแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าซึ่งเมื่อยานยนต์มีประสิทธิภาพสูงและราคาประหยัด ประชาชนจะหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้ากันมากขึ้นซึ่งจะช่วยลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกได้ นอกจากนี้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรฟีนโพลีเมอร์ราคาประหยัดยังสามารถพัฒนาหุ่นยนต์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มการเติบโตของอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์ใหม่ (New S-curves) (KR3.4) และช่วยลดการนำเข้าเทคโนโลยี (KR3.3) อีกด้วย



Three-Dimensional Graphene Foam  
Nickel Substrate by CVD Method  
Foam Board Size Optional (3cmx3cm)  
by YJINGRUI

Available from these sellers.

Size: 3cmx3cm

1cmx1cm

from 1 seller

2cmx2cm

from 1 seller

3cmx3cm

from 1 seller

- This is a kind of graphene materials with three-dimensional connected network structure by CVD method.
- This graphene material replicates the structure of the foam metal completely.
- Graphene constitutes a fully connected whole in a seamless manner.
- Excellent charge conduction capability, extremely low density, high porosity and high specific surface area.
- It also has excellent electrical, thermal and mechanical properties of graphene.

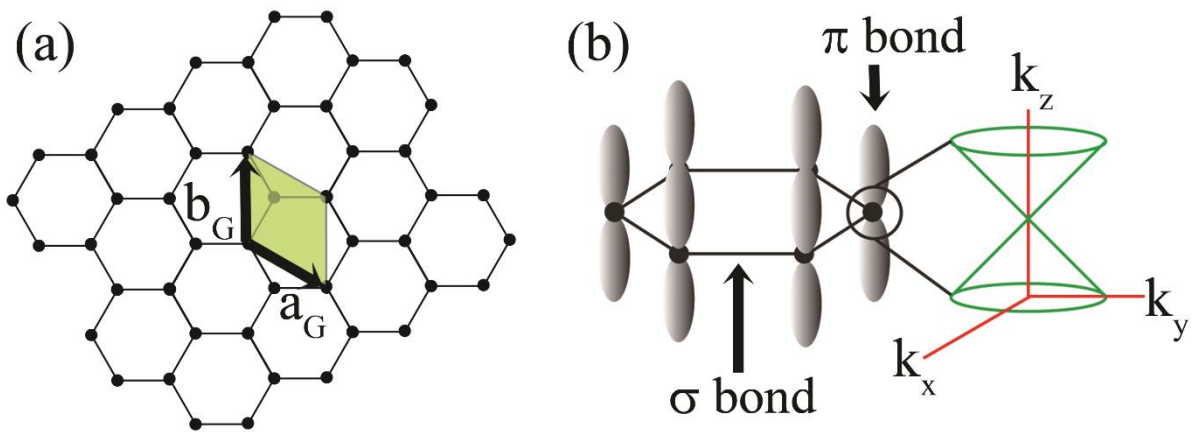
New (1) from \$283.50

รูป 1 แกร์ฟีนโฟมที่ขายในเวปไซด์ amazon เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน 2562

## 2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

แกร์ฟีนเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งคาร์บอนเหล่านี้จะเรียงตัวกันเป็นผลึกโครงร่างตาข่าย 6 เหลี่ยม 2 มิติ คล้ายรังผึ้ง ดังที่แสดงในรูป 2 (a) ซึ่งในเซลล์หนึ่งหน่วยของแกร์ฟีนจะประกอบไปด้วยคาร์บอน 2 อะตอม โดยมีเวกเตอร์หน่วย ( $|a_G|$  กับ  $|b_G|$ ) เท่ากับ 0.24589 นาโนเมตร ในรูป 2 (b) แสดงพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมคาร์บอนในแกร์ฟีน ซึ่งพันธะในแกร์ฟีนจะมี 2 แบบที่สำคัญคือ พันธะแบบ  $\pi$  และ พันธะแบบ  $sp^2$  (หรือแบบ  $\sigma$ ) ซึ่งพันธะแบบ  $\pi$  จะอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบของแกร์ฟีน ส่วนพันธะแบบ  $sp^2$  จะอยู่ในระนาบเดียวกันกับระนาบของแกร์ฟีน นอกจากนี้แกร์ฟีนยังมีคุณสมบัติที่โดดเด่นอีกมากมาย เช่น มีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงมาก และยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วย สำหรับสมบัติความยืดหยุ่นของแกร์ฟีน นักวิทยาศาสตร์พบว่าแกร์ฟีนสามารถยืดและกลับคืนรูปเดิมได้มากที่สุดถึง 20% ซึ่งความยืดหยุ่นนี้สูงเหมือนกับยาง [1] ในทางอิเล็กทรอนิกส์แกร์ฟีนมีค่า electron mobility สูงมาก ( 250000  $cm^2/Vs$  ในกรณีของการคำนวณ และมีค่าประมาณ 5000  $cm^2/Vs$  ในกรณีของการทดลอง [2]) นอกจากนี้แกร์ฟีนยังมีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) เป็นแบบเส้นตรงรูปกรวย (Dirac cone) ที่จุด K ใน Brillouin zone [3] ซึ่งเป็นจุดที่แถบของอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence band) กับแถบนำไฟฟ้า (conduction band)

สัมพันธ์กัน ดังที่แสดงในรูปขยายที่อยู่ในรูป 2 (b) โดยความเร็วของอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้จุดสัมผัสนี้ (Dirac cone) สามารถคำนวณได้จากสมการ  $E = \hbar k v_f$  โดยที่  $E$  คือพลังงานของอิเล็กตรอน  $\hbar$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ที่หารด้วย  $2\pi$  ส่วน  $k$  คือเวกเตอร์คลื่น และสุดท้าย  $v_f$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนที่ระดับเฟอร์มิ โดยการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วของอิเล็กตรอนที่ระดับเฟอร์มิ มีค่ามากถึง  $\sim 10^6$  m/s จากคุณสมบัติพิเศษทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้กล่าวมานี้ ทำให้แกรฟีนกลายเป็นวัสดุที่ถูกคาดว่าจะเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับแสง (photonic device) ในอนาคต ยิ่งไปกว่านั้นแกรฟีนยังเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงมาก โดยในทางทฤษฎีแกรฟีนนั้นมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงถึง  $2630 \text{ m}^2/\text{g}$  [4] แม้ว่าแกรฟีนนั้นจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูงมาก แต่เนื่องด้วยแกรฟีนนั้นมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง 2 มิติ ดังนั้นจึงทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้งานได้จริงของแกรฟีนนั้นน้อย

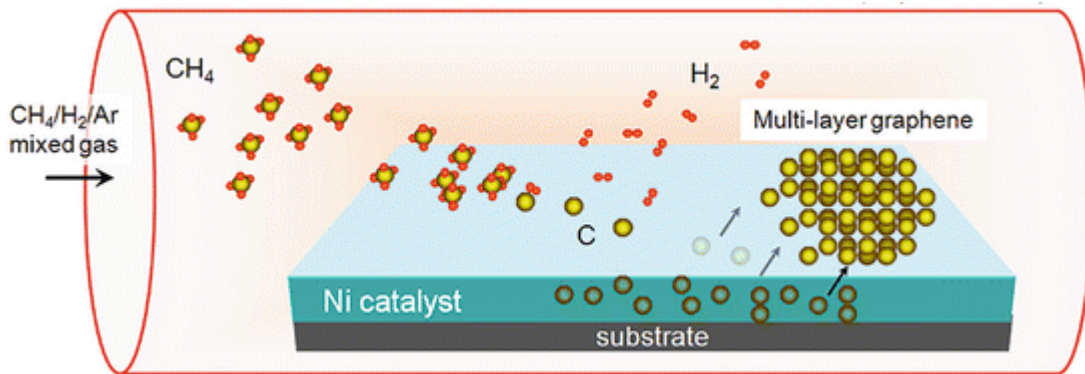


รูป 2. (a) โครงสร้างของแกรฟีน และ (b) พันธะแบนแกรฟีน รูปที่ขยายแสดงการกระจายแบบเส้นตรงของโครงสร้างอิเล็กตรอนที่จุด K

แกรฟีนโฟมคือวัสดุที่เกิดจากการนำแกรฟีนมาเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่าย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแกรฟีนโฟมเป็นแกรฟีน 3 มิติ ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าแกรฟีนธรรมดามาก ด้วยพื้นที่ผิวที่มากของแกรฟีนโฟมจึงทำให้แกรฟีนโฟมถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า หุ่นยนต์ และเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น

ปัจจุบันแกรฟีนโฟมสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี โดยใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน [5] เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งมีกลไกการเกิดแกรฟีนดังแสดงในรูป 3 ซึ่งมีหลักการสำคัญคือให้แก๊สมิเทนสัมผัสแผ่นนิกเกิลที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) โดยเมื่อแก๊สมิเทนสัมผัสแผ่นนิกเกิลอุณหภูมิสูง แผ่นนิกเกิลจะจับอะตอมของคาร์บอนของแก๊สมิเทนไว้ และปล่อยไฮโดรเจนออกไป และเมื่อลดอุณหภูมิของแผ่นนิกเกิลลง

คาร์บอนที่ละลายในนิกเกิลจะจับตัวกับเกิดเป็นแผ่นฟิล์มแกรฟีนบนโลหะนิกเกิล แต่อย่างไรก็ตามการใช้แก๊สมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นมีต้นทุนที่สูง นอกจากนี้แก๊สมิเทนยังเป็นแก๊สไวไฟดังนั้นการจัดเก็บ ระบบท่อส่งแก๊ส และห้องปฏิบัติการ จึงจำเป็นต้องออกแบบเพื่อความปลอดภัย ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนสูงมากขึ้น ตาราง 1 แสดงต้นทุนโดยประมาณของห้องปฏิบัติการ (ห้อง 137/3 อาคาร บรรยายเรียนรวม 3 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์) ที่ใช้ในการสังเคราะห์แกรฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้แก๊สมิเทนเป็นแหล่งคาร์บอน



รูป 3 กลไกการสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิสูง (900 °C) โดยใช้แก๊สมิเทนเป็นแหล่งคาร์บอน

ขยะพลาสติกเป็นขยะที่สร้างปัญหาแกสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากมีสัตว์ไปกินขยะพลาสติกแล้วเสียชีวิต ยิ่งไปกว่านั้นการที่มนุษย์ไปรับประทานสัตว์ที่กินพลาสติก จะทำให้ไมโครพลาสติกนั้นเข้าสู่ร่างกายมนุษย์อีกด้วย แม้ว่าขยะพลาสติกจะสามารถถูกย่อยสลายได้ในธรรมชาติ แต่การย่อยสลายขยะพลาสติกนั้นใช้เวลานานมาก ด้วยเหตุนี้การให้ธรรมชาติเป็นผู้ย่อยสลายขยะพลาสติกจึงเป็นทางเลือกที่ไม่ค่อยดีนัก แม้ว่าปัจจุบันจะมีการรณรงค์การลดและเลิกใช้พลาสติก แต่ขยะพลาสติกที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นก็ยังมีมากและยังคงสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมอยู่ ด้วยเหตุนี้การแปรรูปขยะพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงจึงเป็นการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกที่ดีที่สุด

หลอดดูดน้ำและขวดพลาสติกเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งทำให้มีปริมาณขยะหลอดพลาสติกและขวดพลาสติกต่อวันเป็นจำนวนมาก โดยหลอดและขวดพลาสติกทำมาจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และ โพลีเอทิลีน เทเรพทาเลต (PET), ตามลำดับ [6] โดยทั้งขยะหลอดและขวดพลาสติกต่างก็มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีแทนแก๊สมิเทนได้ นอกจากนี้การใช้ขยะหลอดและขวดพลาสติกเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์แกรฟีนโพลี ไม่เพียงแต่จะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติก แต่ยังช่วยลดต้นทุนของการใช้แก๊สไวไฟ (ด้วยแสดงใน ตาราง 1) นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงต่อการระเบิดของแก๊สไวไฟได้อีกด้วย ตาราง 2 แสดงราคา

ต้นทุนการปลูกแกรฟีนโพลีเมอร์โดยใช้ขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบ โดยจะเห็นได้ว่าต้นทุนการปลูกแกรฟีนนั้นอยู่ที่ประมาณ 82 สตางค์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งถูกกว่าราคาซื้อขายในท้องตลาดอย่างมาก (รูป 1) ดังนั้นการใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จึงสามารถกระทำได้โดยผู้ประกอบการรายเล็กเนื่องจากใช้ต้นทุนต่ำแต่กลับได้ผลผลิตที่มีมูลค่าสูง ดังนั้นการที่มีผู้ประกอบการรายย่อยจำนวนมากสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์ด้วยวิธีนี้จะช่วยให้ขยะพลาสติกในประเทศลดลงอย่างรวดเร็ว

ตาราง 1 แสดงราคาต้นทุนโดยประมาณที่ลดลงเมื่อใช้ขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบในการปลูกแกรฟีน (อ้างอิงราคาจากห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการสังเคราะห์แกรฟีน ม.ธรรมศาสตร์)

หมวดรายการ	รายการย่อย	ราคา
แก๊ส	แก๊สมีเทน	36,000
	ถังแก๊ส	10,000
	ที่วางแก๊ส	10,000
	regulator	10,000
	อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	100,000
ระบบความปลอดภัย	ระบบท่อต่อแก๊ส	100,000
	ห้องนิรภัย (กำแพงคอนกรีต+กระจกนิรภัย)	150,000
	สัญญาเตือนแก๊สรั่วและระบบระบายอากาศ	50,000
รวม		466,000

ตาราง 2 แสดงต้นทุนในการปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี 1 ครั้ง (ไม่รวมค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์) โดยอ้างอิงราคาจากห้องปฏิบัติการการสังเคราะห์แกรฟีน ม.ธรรมศาสตร์

รายการ	วัตต์	พลังงานที่ใช้ตลอดการปลูกแกรฟีน (3 ชั่วโมง)	ราคา (ค่าไฟฟ้า หน่วยละ 5.5 บาท)
เตาเผา	1800	5400	29.7

แก๊ส			10
ราคาแผ่นนิกเกิลโพลี ขนาด 4*30 ซม <sup>2</sup>			59
รวมต้นทุนในการปลูก 1 ครั้งบนพื้นที่สูงสุด 4*30 ซม <sup>2</sup>			98.7
ค่าใช้จ่ายในการปลูกแกรฟีนต่อซม <sup>2</sup>			0.82

### 3. วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน
- เพื่อศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของแกรฟีนโพลี เช่น สัณฐาน คุณภาพ และการดักจับฝุ่น PM2.5 เป็นต้น

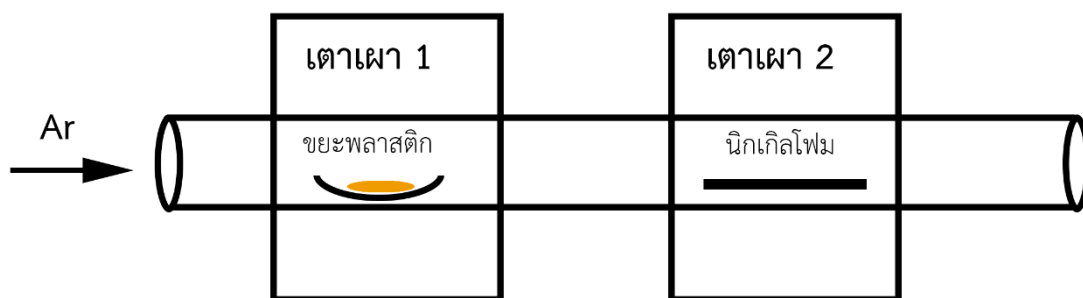
### 4. ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

การสังเคราะห์แกรฟีนโพลีแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1. การสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลโพลี และ 2. การละลายนิกเกิลโพลีเพื่อให้เหลือเฉพาะแกรฟีนโพลี สำหรับขั้นตอนที่ 1. การสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลโพลีด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน จะมีขั้นตอนดังนี้

เริ่มจากทำความสะอาดแผ่นนิกเกิลโพลีหนา 2 มม. ขนาด 3x4 ซม<sup>2</sup> โดยการนำไปแช่ใน acetone แล้วนำเข้าเครื่องทำความสะอาดแบบสั่นด้วย ultrasonic นานครั้งละ 5 นาที จำนวน 2 ครั้ง หลังจากนั้นนำแผ่นนิกเกิลโพลีที่ทำความสะอาดแล้วไปปลูกแกรฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition) โดยระบบการเคลือบผิวด้วยไอเคมีจะประกอบด้วยท่อควอทซ์ เต้าสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง 2 ชุด อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยขยะพลาสติกและนิกเกิลโพลีจะถูกใส่ในท่อควอทซ์ในพื้นที่ของเต้าเผาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4 และ รูป 5 หลังจากนั้นแก๊สอาร์กอนจะถูกปล่อยด้วยอัตราการไหล 200 sccm นาน 30 นาที เพื่อทำการไล่ออกซิเจนออกจากท่อควอทซ์ หลังจากนั้นจึงเริ่มต้นการเผาแผ่นนิกเกิลโพลีโดยเต้าเผาที่ 2 และเมื่ออุณหภูมิของแผ่นนิกเกิลโพลีสูงถึงค่าที่ต้องการจะปลูกแกรฟีนแล้ว เต้าเผาที่ 1 จะเริ่มทำการเผาขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 500-700 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดไอของพลาสติกลอยไปสัมผัสกับแผ่นนิกเกิลโพลี โดยในการทดลองนี้จะใช้อุณหภูมิและปริมาณของขยะพลาสติก อยู่ในช่วง 500 °C ถึง 1000 °C และ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดเวลาปลูกแกรฟีน แผ่นนิกเกิลโพลีจะถูกลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึง

อนุภาคนิวเคลียสภายใต้การไหลเวียนของแก๊สอาร์กอน สำหรับการลดอนุภาคนิวเคลียสของตัวอย่างลงอย่างรวดเร็ว นั้น จะทำโดยการเปิดเตาเผาที่มีอนุภาคนิวเคลียสสูงนี้ออก เพื่อให้บริเวณที่มีแผ่นตัวอย่างอยู่มีการถ่ายเทอนุภาคนิวเคลียสได้มากขึ้น เมื่ออนุภาคนิวเคลียสของแผ่นตัวอย่างลดลงถึงอนุภาคนิวเคลียสห้องแล้ว เราจะได้แกรฟีนโพลีเมอร์ที่เคลือบบนผิวของนิกเกิลโพลีเมอร์

เพื่อเพิ่มไฟฟ้าสถิตให้แก่แกรฟีนโพลีเมอร์และละลายโลหะนิกเกิลออกจากแกรฟีนโพลีเมอร์ ตัวอย่างแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์จะถูกแช่ในสารละลาย  $FeCl_3$  เพื่อละลายนิกเกิลให้เหลือแต่แกรฟีนโพลีเมอร์ และเพื่อให้เหล็กไปเกาะบนแกรฟีนโพลีเมอร์ เพื่อสร้างแรงไฟฟ้าสถิตสำหรับดึงดูดฝุ่น  $PM_{2.5}$



รูป 4 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน



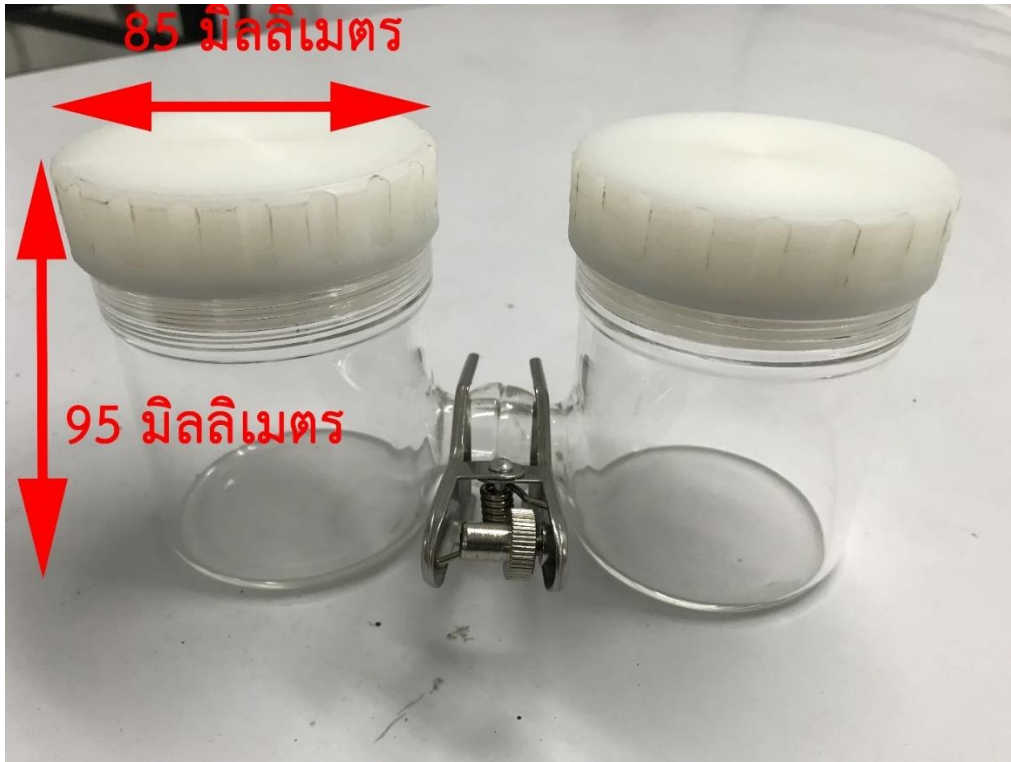
รูป 5 ชุดเตาเผาที่ใช้ในการสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน

#### 4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุ

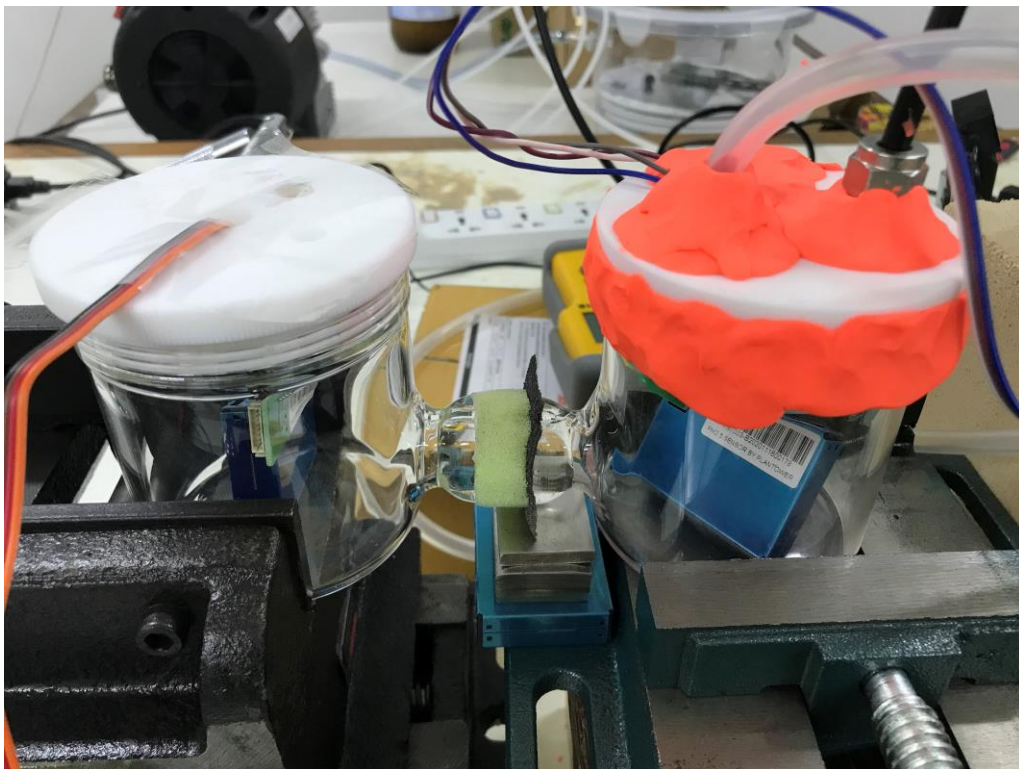
โครงการวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างโดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) โดยจะใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ที่ใช้ธาตุของทองแดงเป็นแหล่งกำเนิดของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น 1.54 Å โดยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์นี้จะวัดที่อุณหภูมิห้อง สำหรับลักษณะของพื้นผิวตัวอย่าง จะถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (field emission scanning electron microscope) โดยพลังงานของอิเล็กตรอนที่ใช้ในการวัดอยู่ในช่วง 1 keV ถึง 15 keV สำหรับการตรวจสอบการมีอยู่ของแกรไฟต์และคุณภาพของแกรไฟต์นั้น ในการทดลองนี้จะใช้ เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) ในการยืนยันข้อมูล โดยจะเลือกใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแสงเลเซอร์น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ในการวัดพื้นที่ผิวและความพรุนของตัวอย่างแกรไฟต์โพลีที่ปลูกได้ จะทดสอบด้วยเทคนิคของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), ตามลำดับ

#### 4.2 การทดสอบการดักจับฝุ่น PM2.5

แผ่นตัวอย่างแกรไฟต์โพลีที่ได้จากการเตรียมจะถูกทดสอบการดักจับฝุ่นในห้องจำลองขนาดเล็ก (H-Cell) ดังแสดงใน รูป 6 และ รูป 7 ซึ่งประกอบด้วยขวดโหลแก้ว 2 ใบ ที่เชื่อมต่อกับ โดยมีแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟต์โพลีมคั่นกลางระหว่างขวดโหลทั้งสอง ในการวัดปริมาณฝุ่น PM2.5 จะใช้เซ็นเซอร์วัดฝุ่น PM2.5 ยี่ห้อ Plantower รุ่น PMS7003 ในการวัดปริมาณฝุ่น โดยแหล่งกำเนิดฝุ่นที่ใช้ในการทดลองจะมาจากควันธูปและอากาศจริงในประเทศไทย



รูป 6 ขวดโหลจำลองขนาดเล็ก (H-Cell) สำหรับการวัดฝุ่น PM2.5



รูป 7 ขวดโหลจำลองขนาดเล็ก (H-Cell) สำหรับการวัดฝุ่น PM2.5 ที่ถูกดันให้ติดกันด้วยปากกาจับชิ้นงานและใช้ฟองน้ำเพื่อลดแรงกดแก่แผ่นแกรฟีนโพร

#### 4.3 แนวทางการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์และแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ใช้กรองฝุ่น PM2.5 แล้ว

ของเสียที่เกิดจากโครงการวิจัยนี้มี 2 อย่างคือ ของเสียที่เกิดจากกระบวนการละลายนิเกิลโพลีเมอร์ และของเสียที่เกิดจากแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ใช้ดักจับฝุ่นแล้ว ซึ่งของเสียทั้ง 2 อย่าง นั้นมีแนวทางการนำกลับไปใช้ประโยชน์ ดังนี้

##### 4.3.1 ของเสียที่เกิดจากกระบวนการละลายนิเกิลโพลีเมอร์

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์แกรฟีนบนนิเกิลโพลีเมอร์แล้ว เพื่อให้ได้แผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ เราจำเป็นต้องละลายนิเกิลโพลีเมอร์ออกเพื่อให้เหลือแต่แกรฟีนโพลีเมอร์ โดยกระบวนการนี้จะทำโดยการจุ่มตัวอย่างแกรฟีนบนนิเกิลโพลีเมอร์ลงในสารละลาย  $FeCl_3$  โดยหลังจากทำการละลายแล้วจะได้ของเสียที่เป็นสารละลายที่มีส่วนผสมระหว่าง  $NiCl_2$  และ  $FeCl_3$

สำหรับการนำของเสียที่เป็นสารละลายที่มีส่วนผสมระหว่าง  $NiCl_2$  และ  $FeCl_3$  กลับมาใช้ใหม่ จะมีขั้นตอนดังนี้

1. ผสมเพอร์ริคคโลไรด์ปริมาณ 80 กรัม ในน้ำ 200 มิลลิลิตร
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแผ่นแกรฟีนบนนิเกิลโพลีเมอร์ แล้วจึงนำตัวอย่างแกรฟีนบนนิเกิลโพลีเมอร์มาแช่ในสารละลายเพอร์ริคคโลไรด์เพื่อละลายโลหะนิเกิลออกนาน 1 วัน
3. ล้างแกรฟีนโพลีเมอร์ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water: DI) และตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ได้ไปชั่งเพื่อหาค่ามวลนิเกิลที่ละลายอยู่ในสารละลายเพอร์ริคคโลไรด์
4. นำของเสียสารละลายเพอร์ริคคโลไรด์ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำตาลทราย 2 กรัม คนให้เข้ากันและนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน
5. นำตัวอย่างที่ผ่านการอบไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของอาร์กอน นาน 6 ชั่วโมง

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการจะได้ผลผลิตเป็นแกรฟีนผงหุ้มโลหะที่สามารถดูดติดกับแม่เหล็กได้ดังแสดงในรูป 8 ในกรณีที่ต้องการแกรฟีนผงก็สามารถนำตัวอย่างแกรฟีนผงหุ้มโลหะไปละลายโลหะที่อยู่ข้างในออกได้โดย

การแช่ในกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งวิธีการสังเคราะห์แกรไฟีนผงด้วยวิธีนี้จะสามารถทำได้ในปริมาณที่มากและใช้ต้นทุน  
ประหยัดมากเมื่อเทียบกับราคาแกรไฟีนผงในตลาดที่ขายอยู่ที่ 25024 บาทต่อกรัม ดังแสดงในรูป 9



รูป 8 แกรไฟีนผงหุ้มเหล็กที่ใช้น้ำตาลและสารละลาย  $\text{FeCl}_3$  เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์

The screenshot shows the Sigma-Aldrich website for Graphene (SKU: 900561). The product is described as 'powder, electrical conductivity >10<sup>3</sup> S/m'. A table below the product image provides the following information:

SKU-Pack Size	Availability	Pack Size	Price (SGD)	Quantity
900561-500MG	Available to ship on 06.01.2021 - FROM	500 mg	544.00	0

Additional details include a 'Bulk orders?' button and an 'ADD TO CART' button. The page also features links for SDS, Certificate of Analysis (COA), and Specification Sheet.

รูป 9 ราคาแกรฟีนผงของ Merck ที่ขายแกรฟีนผง 0.5 กรัม ในราคา 12512 บาท (544 SGD×23 บาท)

#### 4.3.2 ของเสียที่เกิดจากแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ใช้ดักจับฝุ่นแล้ว

ทีมวิจัยจะทำการศึกษาการนำแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ผ่านการดักจับฝุ่น PM2.5 แล้วมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่แบบเหรียญ โดยแกรฟีนโพลีเมอร์เป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีมาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก ดังนั้นแกรฟีนโพลีเมอร์จึงถูกคาดหวังให้นำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงในแบตเตอรี่ สำหรับแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ผ่านการดักจับฝุ่น PM2.5 แล้ว มีข้อดีคือมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงขึ้นแต่ก็มีข้อเสียคือมีความหลากหลายของอนุภาคที่มาเกาะบนแผ่นขั้วไฟฟ้าแกรฟีนโพลีเมอร์ ดังนั้นประสิทธิภาพของแกรฟีนโพลีเมอร์จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจึงจำเป็นต้องมีการทดลอง

สำหรับวิธีการประกอบแบตเตอรี่แบบเหรียญที่ทีมวิจัยจะใช้แผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ใหม่และแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ผ่านการดักจับฝุ่นแล้วเป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ โดยการประกอบแบตเตอรี่แบบเหรียญจะใช้ขั้วไฟฟ้าจากแกรฟีนโพลีเมอร์และแผ่นลิเทียมบริสุทธิ์ และใช้ สารผสมของ diethylene carbonate, ethylene carbonate and dimethyl carbonate (1:1:1 by weight) กับ 1 M LiPF<sub>6</sub> เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งการประกอบแบตเตอรี่นี้จะต้องทำในตู้กล่องถุงมือที่บรรจุแก๊สอาร์กอน สำหรับการประกอบและทดสอบแบตเตอรี่แบบเหรียญจะทำในห้องปฏิบัติการของทีมนักวิจัยมีอุปกรณ์สำหรับศึกษาการประกอบและทดสอบประสิทธิภาพแบตเตอรี่แบบเหรียญ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความแม่นยำสูงชนิด 4 ตำแหน่งและเครื่องกวนสาร (รูป 10), เตาอบลมร้อน (รูป 11) และเครื่องกล่องถุงมือ (glovebox) ที่บรรจุแก๊สอาร์กอน ใช้สำหรับการประกอบ

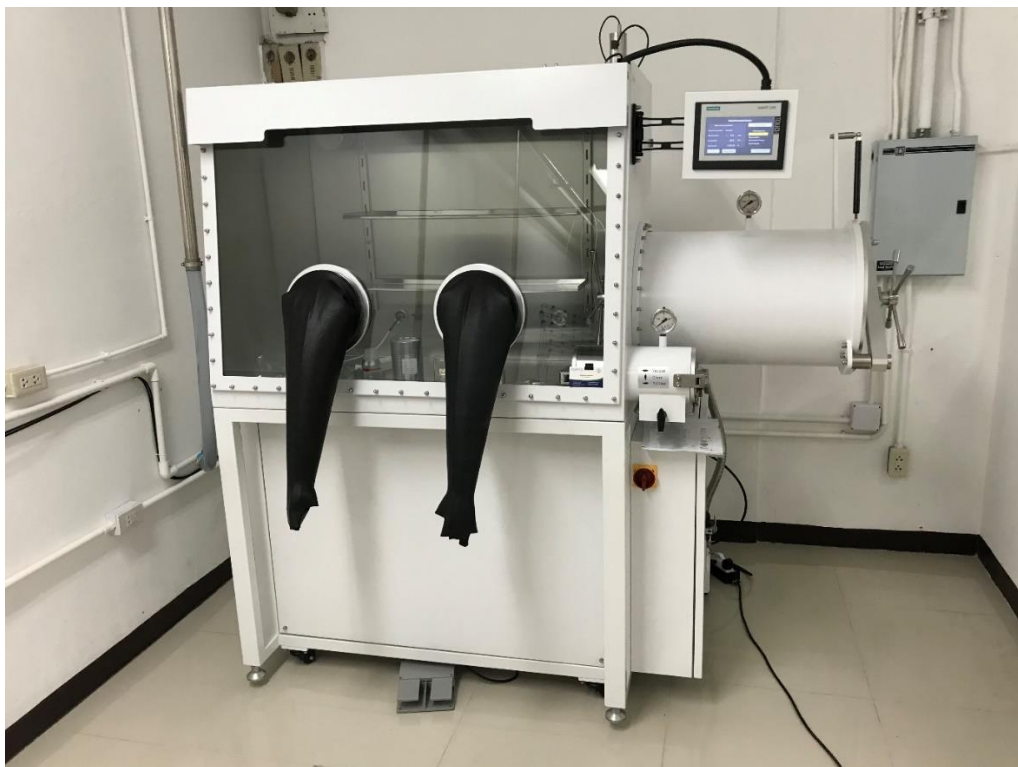
แบตเตอรี่แกรฟีน ซึ่งภายในมีแผ่นลิเทียม (ซัวแอร์โนด) และ สารอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงใน รูป 12 นอกจากนี้ในห้องปฏิบัติการยังมีอุปกรณ์อื่นๆ สำหรับการประแบตเตอรี่แบบเหรียญอีกเช่น เครื่องกดอัดแบตเตอรี่แบบเหรียญ separator spring spacer กรอบแบตเตอรี่แบบเหรียญ CR2032 และมีดสำหรับตัด separator ดังแสดงใน รูป 13 หลังจากประกอบแบตเตอรี่แล้วทีมวิจัยมีเครื่อง potentiostat รูป 14 สำหรับวัดค่าเคมีไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นอยู่ในสถานะพร้อมใช้งาน



รูป 10 (ซ้าย) เครื่องชั่งน้ำหนักความแม่นยำสูงชนิด 4 ตำแหน่ง (ขวา) เครื่องกวนสาร



รูป 11 เตาอบลมร้อน



รูป 12 เครื่องกล่องถุงมือ (glovebox) ที่บรรจุแก๊สอาร์กอน ใช้สำหรับการประกอบแบตเตอรี่แกรไฟน์ ซึ่งภายในมี แผ่นลิเทียม (ขั้วแอโนด) และ สารอิเล็กโทรไลต์



รูป 13 ชุดเครื่องมือสำหรับการประกอบแบตเตอรี่แบบเหรียญซึ่งประกอบด้วย เครื่องกดอัดแบตเตอรี่แบบเหรียญ separator spring spacer กรอบแบตเตอรี่แบบเหรียญ CR2032 และมีดสำหรับตัด separator และขั้วไฟฟ้า



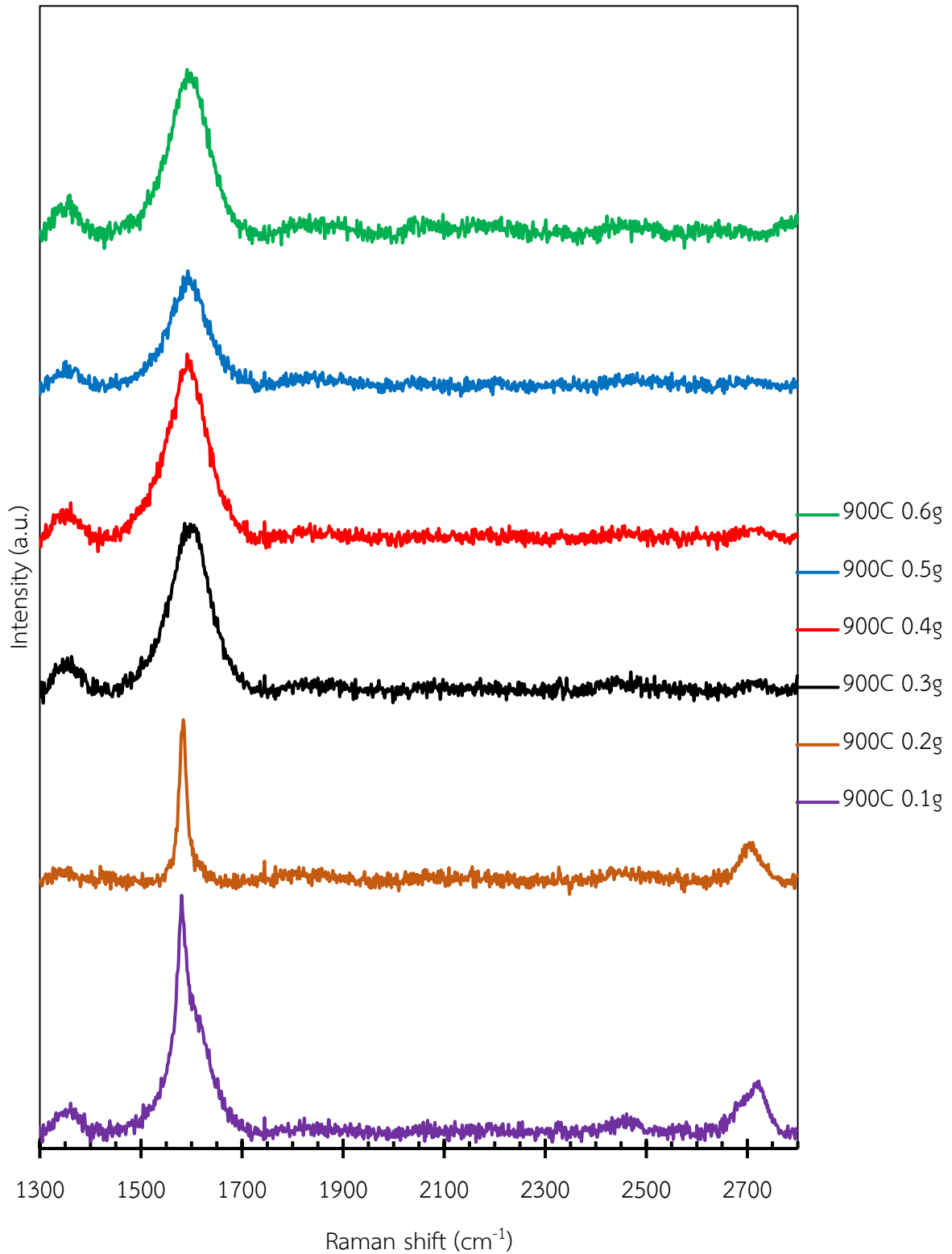
รูป 14 เครื่อง potentiostat สำหรับวัดเคมีไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่

## 5. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

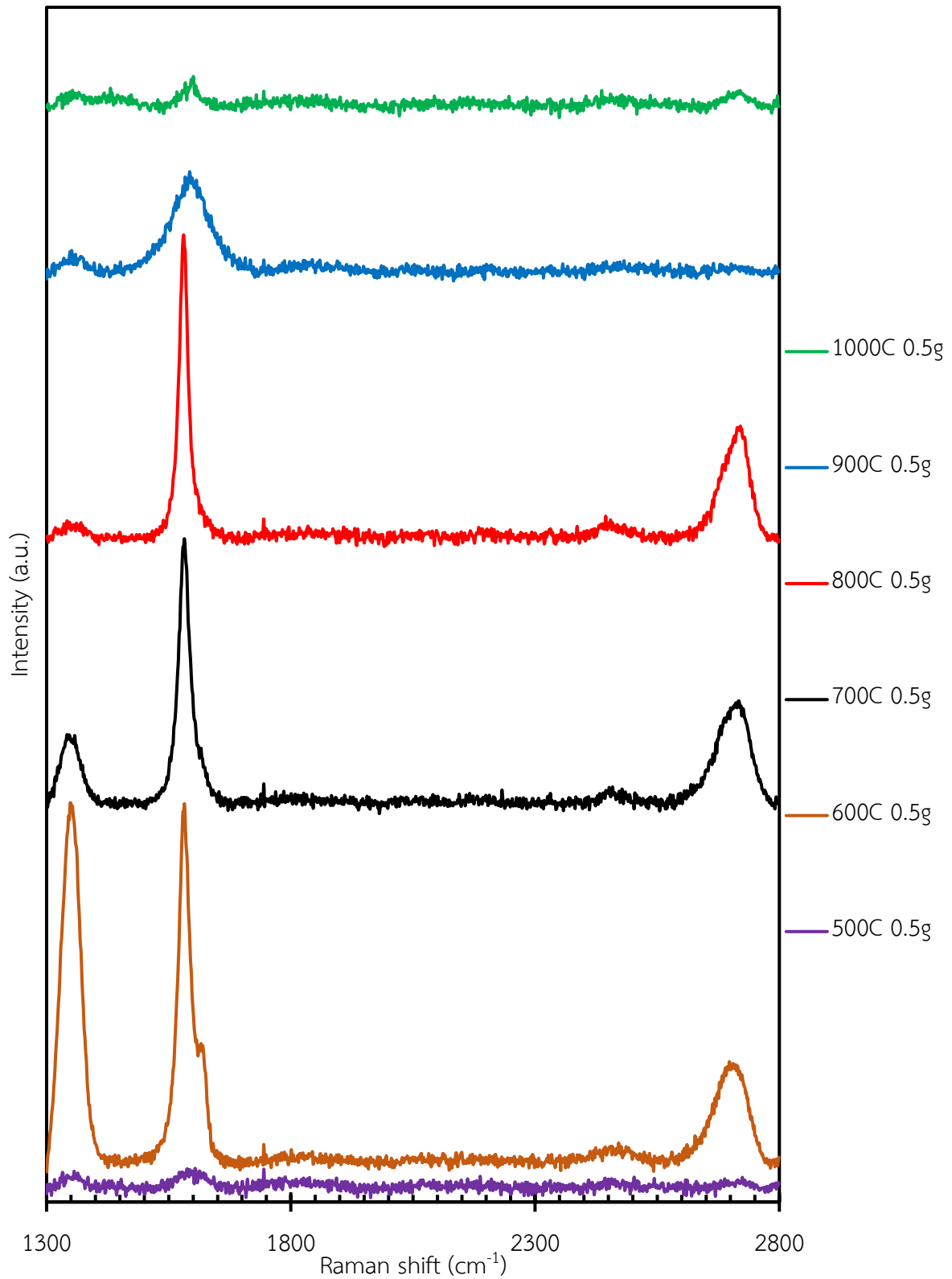
### 5.1 การปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะหลอดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน

ทีมวิจัยได้ทดลองสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 30 นาที โดยใช้ขยะหลอดพลาสติกปริมาณ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน ในการตรวจสอบการปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์จะใช้เทคนิคการวัดสเปกตรัมของรามาน ซึ่งโดยปกติแกรฟีนจะแสดงแถบเฉพาะของสเปกตรัมของรามานที่บริเวณ 1580  $\text{cm}^{-1}$  (G band) และ 2700  $\text{cm}^{-1}$  (2D band) ดังนั้นการมีอยู่ของแถบเฉพาะดังกล่าวจะสามารถยืนยันการมีอยู่ของแกรฟีนได้ รูป 15 แสดงสเปกตรัมของรามานที่วัดบนพื้นผิวของตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการปลูกแกรฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยจากกราฟสเปกตรัมของรามานจะเห็นได้ว่ามีเพียงตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่ 900 °C นาน 30 นาที โดยใช้หลอดพลาสติกปริมาณ 0.1 กรัม และ 0.2 กรัม เท่านั้นที่มีพีคที่ตำแหน่ง 1580  $\text{cm}^{-1}$  (G band) และ 2700  $\text{cm}^{-1}$  (2D band) ซึ่งยืนยันได้ว่ามีแกรฟีนบนพื้นผิวของ 2 ตัวอย่างนี้

นอกจากนี้ทีมวิจัยยังศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะหลอดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน รูป 16 แสดงสเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C นาน 30 นาที โดยใช้หลอดพลาสติกปริมาณ 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน จากกราฟสเปกตรัมของรามานจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ 600 °C ถึง 800 °C จะปรากฏพีค G และ 2D ซึ่งเป็นพีคเฉพาะของแกรฟีนที่ตำแหน่ง 1580  $\text{cm}^{-1}$  และ 2700  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่ามีแกรฟีนบนตัวอย่างดังกล่าว



รูป 15 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเจลโพลีเอทิลีนที่ผ่านการปลูกแกรฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกปริมาณตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน

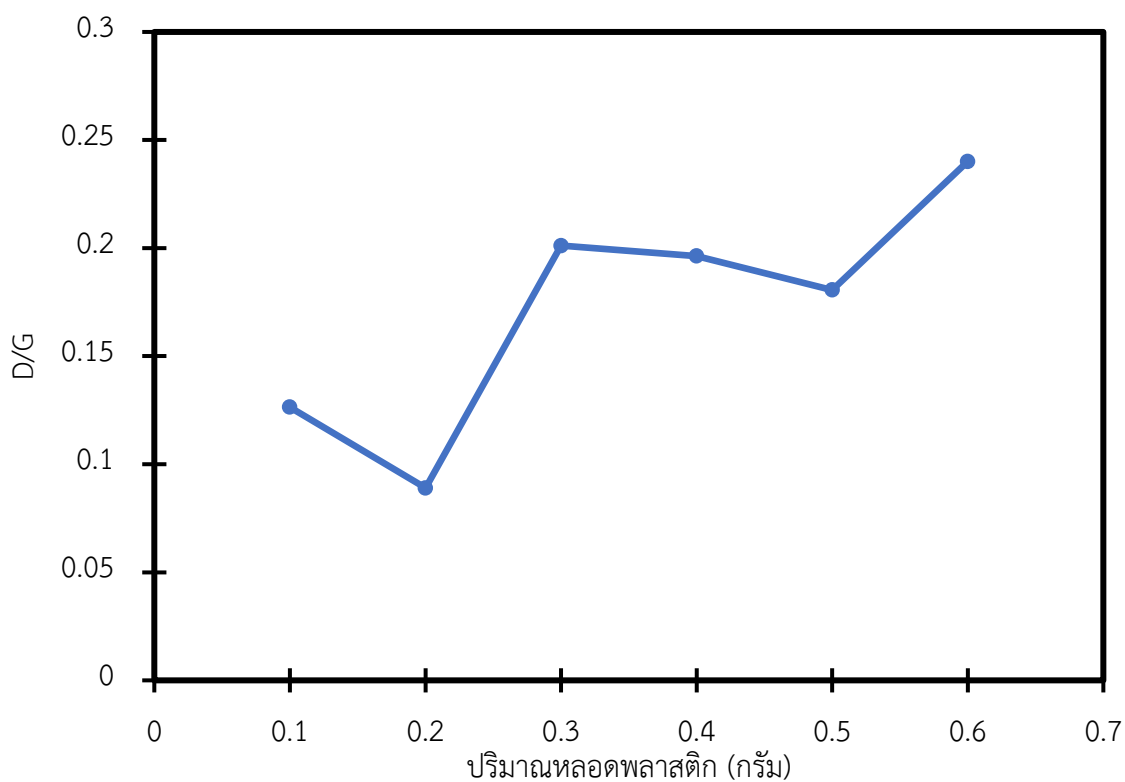


รูป 16 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเจลโฟมที่ผ่านการปลูกแกรฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ขี้เถ้าหลอดพลาสติกปริมาณ 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน

โดยทั่วไปแกรฟีนจะมีพีคเฉพาะของรามานที่ตำแหน่งประมาณ  $1580\text{ cm}^{-1}$  (พีค G) และ  $2700\text{ cm}^{-1}$  (พีค 2D) แต่ในบางกรณีจะพบพีคที่ตำแหน่งประมาณ  $1350\text{ cm}^{-1}$  (พีค D) โดยพีค D นั้นเกิดมาจากความบกพร่องของโครงสร้างแกรฟีน (defect) ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า ตัวอย่างที่มีความเข้มของพีค D น้อยจะแสดงถึงแกรฟีนที่มีคุณภาพดี โดยทั่วไปความเข้มของรามานพีค D จะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงเลเซอร์และระยะเวลาที่ใช้วัด ดังนั้นการเปรียบเทียบความเข้มของพีค D ของแต่ละตัวอย่างจะนิยมใช้อัตราส่วนความเข้มของพีค D/G เปรียบเทียบกัน ตาราง 3 และ รูป 17 แสดงข้อมูลและกราฟความเข้มของรามานพีค D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม นอกจากนี้ ตาราง 4 และ รูป 18 แสดงข้อมูลและกราฟความเข้มของรามานพีค D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติก 0.5 กรัม จากข้อมูลทำให้ทราบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  และใช้ปริมาณหลอดพลาสติก 0.5 กรัม จะให้ค่าอัตราส่วนความเข้ม D/G น้อยที่สุด ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าแกรฟีนจากตัวอย่างนี้มีคุณภาพดีที่สุด

ตาราง 3 แสดงความเข้มของรามานพีค D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม

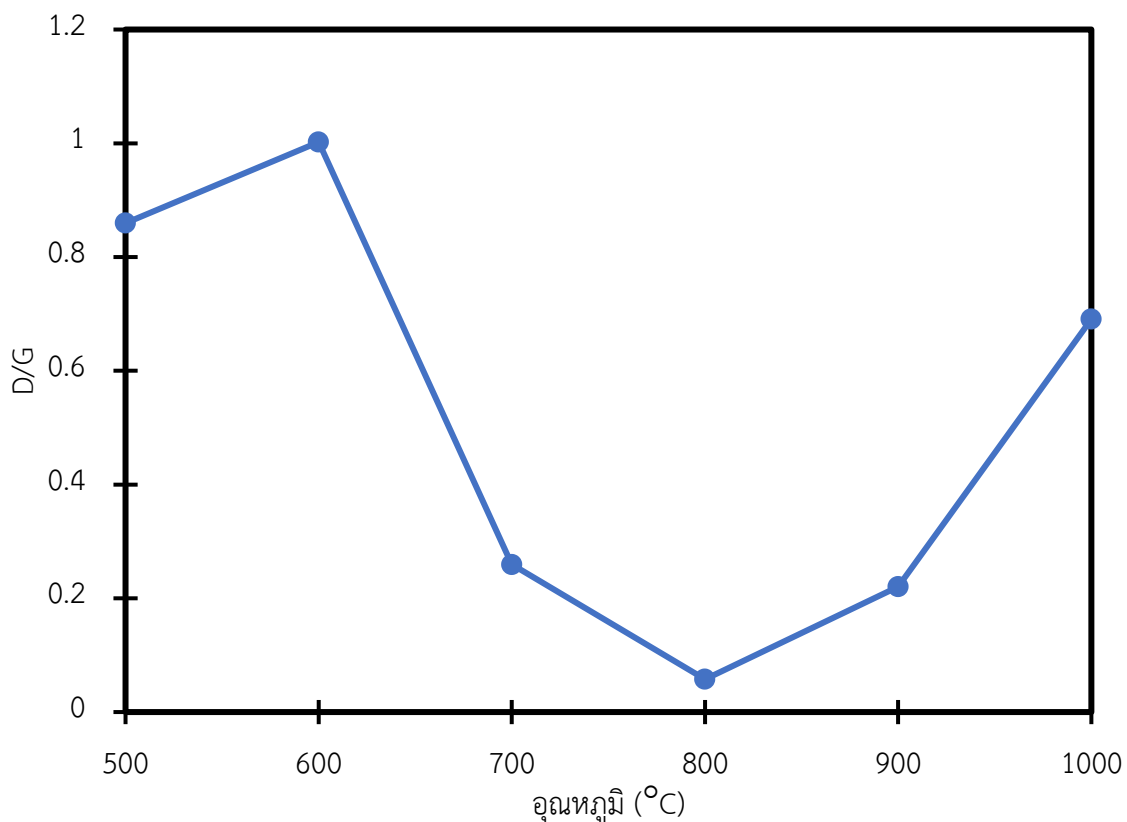
Temperature 900 °C	Peak D		Peak G		D/G
	Position	Intensity	Position	Intensity	
0.1	1360.96	39.4831	1580.64	312.404	0.126385
0.2	1356.19	18.9482	1583.74	212.864	0.089016
0.3	1354.6	44.1792	1597.66	219.683	0.201104
0.4	1360.96	47.6973	1591.48	242.99	0.196293
0.5	1359.37	27.5081	1593.02	152.318	0.180597
0.6	1359.37	52.0211	1591.48	216.666	0.240098



รูป 17 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีค D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม

ตาราง 4 แสดงความเข้มของรามานพีค D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติก 0.5 กรัม

Quantity 0.5 g	Peak D		Peak G		D/G
Temperature 900 (°C)	Position	Intensity	Position	Intensity	
500	1356.19	26.1028	1603.84	30.3567	0.859869
600	1348.23	541.273	1582.19	540.118	1.002138
700	1346.64	103.615	1582.19	399.283	0.259503
800	1341.86	26.3477	1580.64	456.89	0.057667
900	1351.41	33.5792	1593.02	152.318	0.220455
1000	1353.01	24.9727	1583.74	36.1491	0.690825

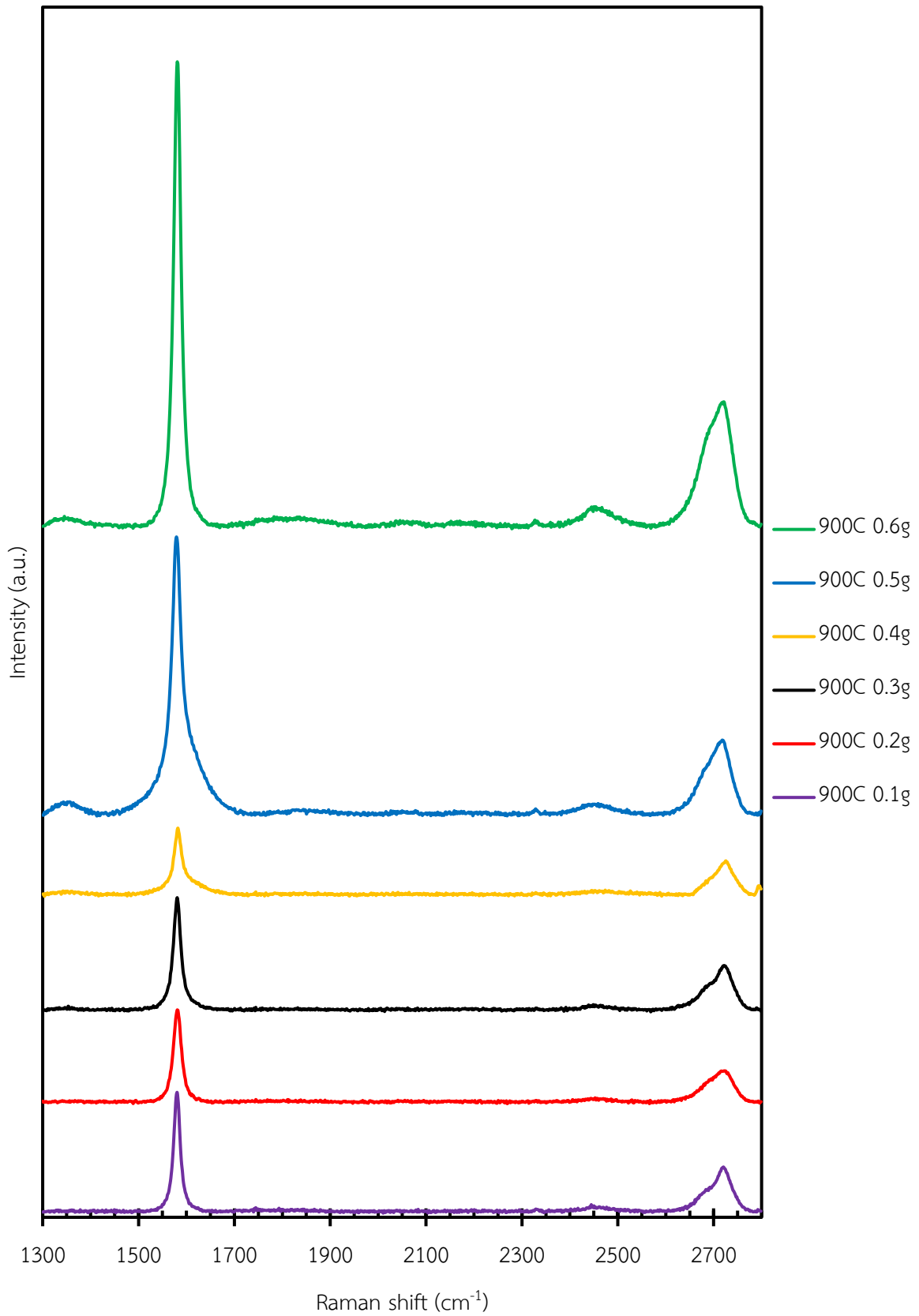


รูป 18 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีค D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณหลอดพลาสติก 0.5 กรัม

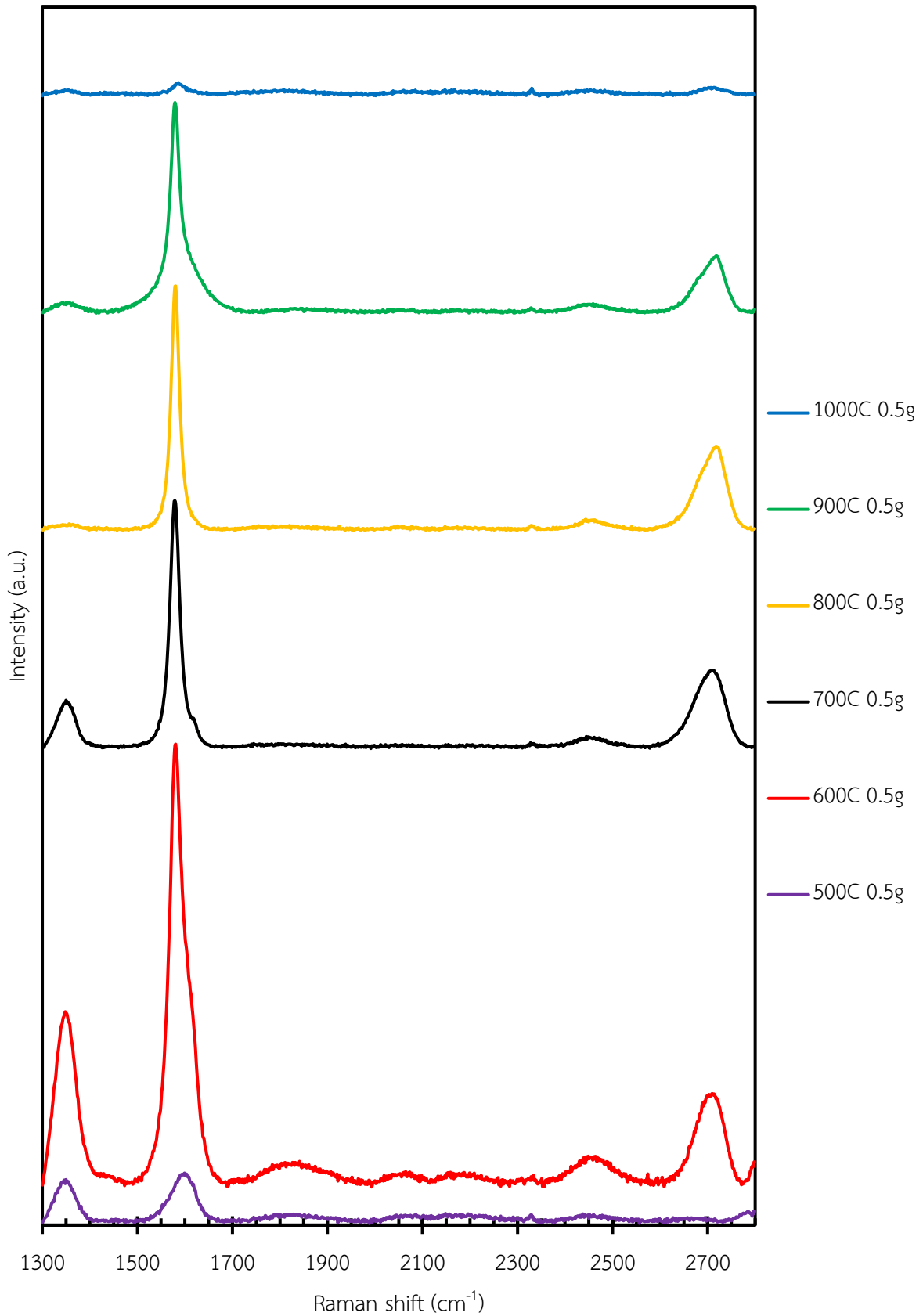
## 5.2 การปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขวดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน

นอกจากนี้ที่วิจัยได้ทดลองสังเคราะห์แกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 30 นาที โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกปริมาณ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน โดยผลการตรวจวัดด้วยเทคนิครามาน (รูป 19) แสดงให้เห็นว่าทุกตัวอย่างสามารถปลูกแกรฟีนได้เนื่องจากปรากฏพีคเฉพาะของแกรฟีนที่ตำแหน่ง 1580  $\text{cm}^{-1}$  (G band) และ 2700  $\text{cm}^{-1}$  (2D band)

สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการปลูกแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน รูป 20 แสดงสเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโพลีเมอร์ที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C นาน 30 นาที โดยใช้ขี้เถ้าพลาสติกปริมาณ 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน จากกราฟสเปกตรัมของรามานจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรฟีนที่อุณหภูมิ 600 °C ถึง 900 °C จะปรากฏพีค G และ 2D ซึ่งเป็นพีคเฉพาะของแกรฟีนที่ตำแหน่ง 1580  $\text{cm}^{-1}$  และ 2700  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่ามีแกรฟีนบนตัวอย่างดังกล่าว



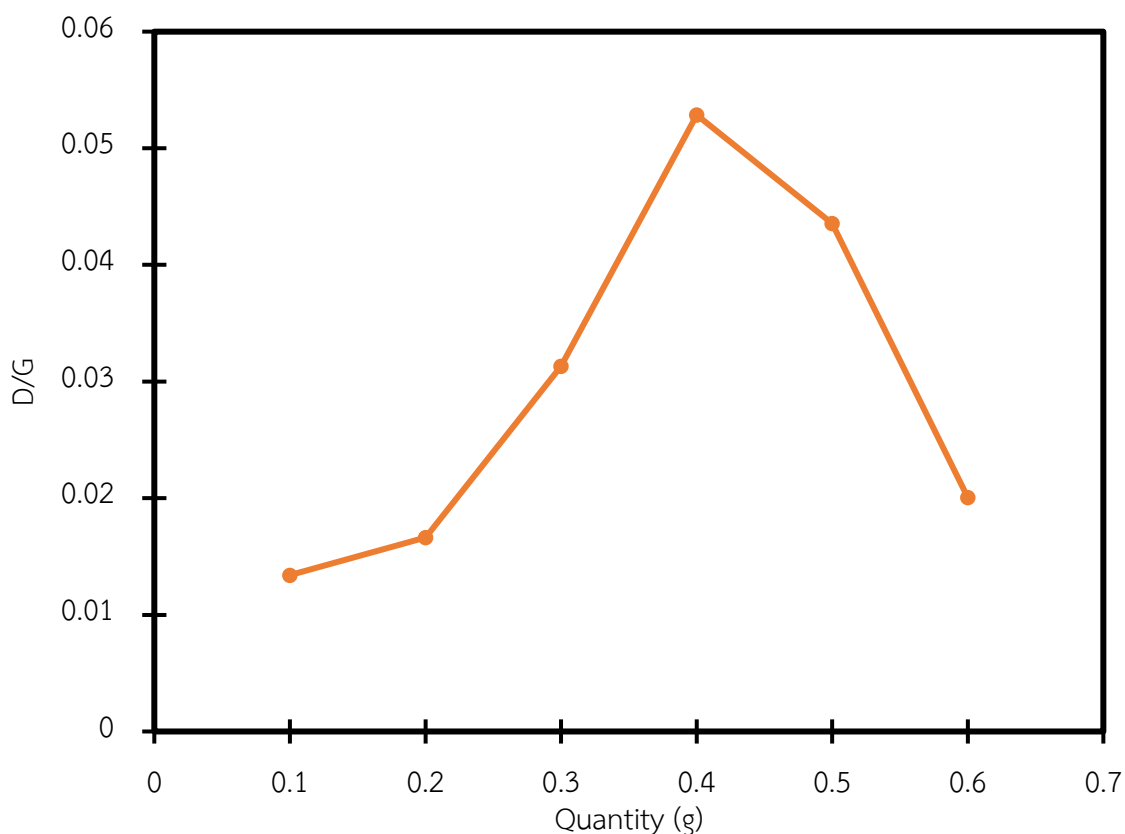
รูป 19 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเจลโพลีเอทิลีนผ่านการปลูกแกรฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ขั้วขดพลาสติกปริมาณตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน



รูป 20 สเปกตรัมของรามานที่วัดบนตัวอย่างนิกเกิลโฟมที่ผ่านการปลูกแกรไฟินด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ขี้ชะงวดน้ำพลาสติกปริมาณ 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน

ตาราง 5 แสดงความเข้มของรามานพีค D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณขวดพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม

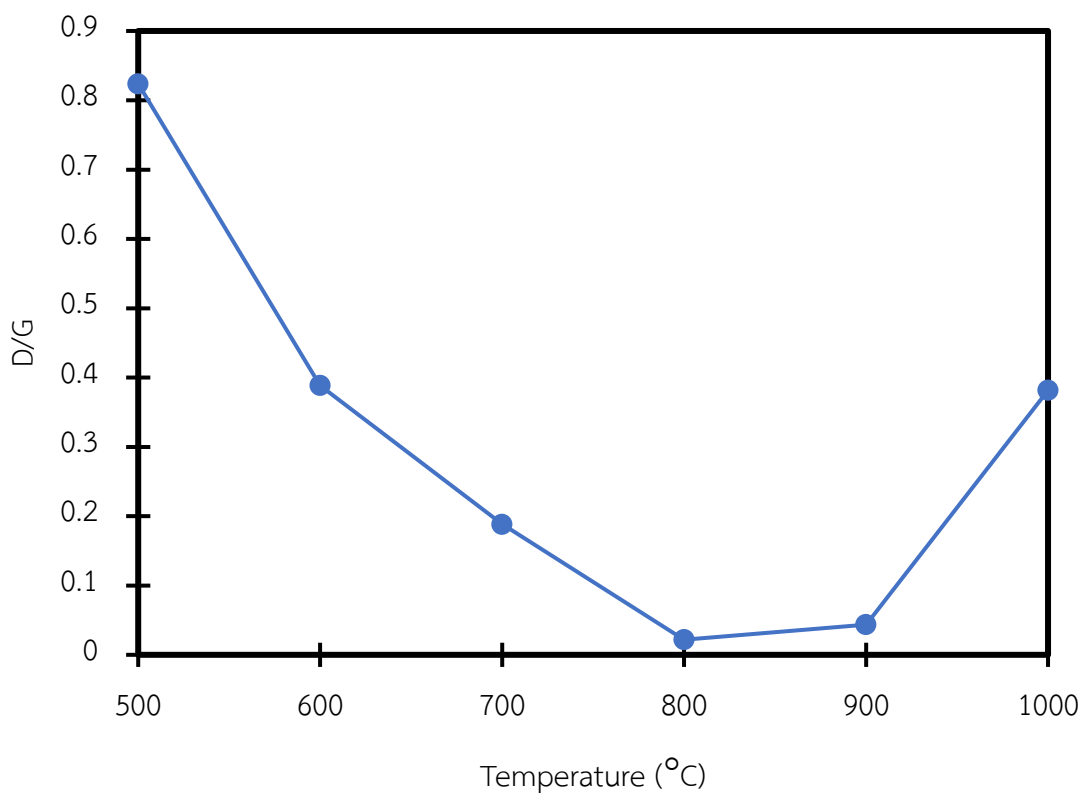
Temperature 900 °C	Peak D		Peak G		D/G
	Position	Intensity	Position	Intensity	
0.1	1360.96	13.851	1580.64	1033.34	0.013404
0.2	1367.32	13.2869	1580.64	798.761	0.016634
0.3	1353.01	30.4828	1580.64	973.278	0.03132
0.4	1341.86	30.4843	1582.19	576.735	0.052857
0.5	1356.19	104.675	1579.09	2403.03	0.04356
0.6	1345.05	80.7242	1580.64	4023.96	0.020061



รูป 21 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีค D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณขวดน้ำพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม

ตาราง 6 แสดงความเข้มของรามานพีค D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลุกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณขดน้ำพลาสติก 0.5 กรัม

Quantity 0.5 g	Peak D		Peak G		D/G
Temperature 900 (°C)	Position	Intensity	Position	Intensity	
500	1354.6	451.418	1599.2	547.962	0.823813
600	1348.23	1953.06	1580.64	5027.22	0.388497
700	1349.82	532.697	1579.09	2826.53	0.188463
800	1356.19	60.9201	1580.64	2793.56	0.021807
900	1356.19	104.675	1579.09	2403.03	0.04356
1000	1356.19	47.0208	1586.83	123.181	0.381721



รูป 22 อัตราส่วนความเข้มของรามานพีค D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลุกแกรฟีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณขดน้ำพลาสติก 0.5 กรัม

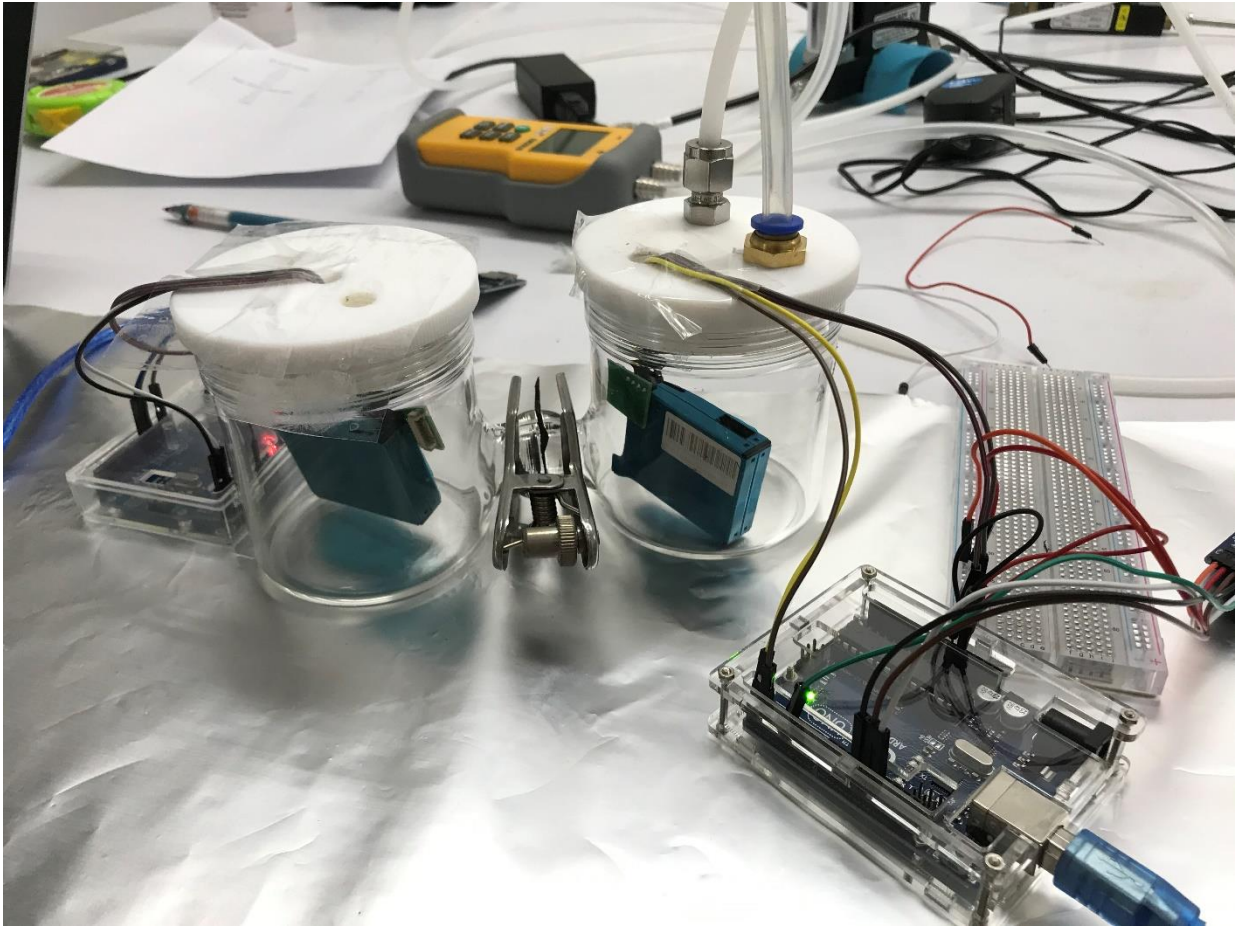
ตาราง 5 และ รูป 21 แสดงข้อมูลและกราฟความเข้มของรามานพีก D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ที่อุณหภูมิ 900 °C โดยใช้ปริมาณขูดน้ำพลาสติกตั้งแต่ 0.1 กรัม ถึง 0.6 กรัม นอกจากนี้ตาราง 6 และ รูป 22 แสดงข้อมูลและกราฟความเข้มของรามานพีก D, G และ D/G ของตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1000 °C โดยใช้ปริมาณขูดน้ำพลาสติก 0.5 กรัม จากข้อมูลทำให้ทราบว่าตัวอย่างที่ผ่านการปลูกแกรไฟน์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 900 °C และใช้ปริมาณขูดน้ำพลาสติก 0.1 กรัม จะให้ค่าอัตราส่วนความเข้ม D/G น้อยที่สุด และเนื่องด้วยพีก D นั้นเกิดมาจากความบกพร่องของโครงสร้างแกรไฟน์ (defect) ดังนั้นการที่ตัวอย่างนี้มีค่า D/G ที่น้อยที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่าการปลูกแกรไฟน์ด้วยเงื่อนไขจะให้แกรไฟน์ที่มีคุณภาพดีที่สุด

### 5.3 การทดสอบการดักจับฝุ่น PM2.5 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิม

ทีมวิจัยได้นำแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิมที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีที่อุณหภูมิ 800 °C นาน 30 นาที โดยใช้ปริมาณของหลอดพลาสติก 0.5 กรัม เป็นแหล่งคาร์บอน ไปตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ mercury intrusion porosimetry (MIP) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าตัวอย่างแกรฟีนโพลิมนั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 14.8494 m<sup>2</sup>/g และมีความพรุนมากถึง 96.61% (รายงานผลการทดสอบแนบอยู่ในภาคผนวก) หลังจากนั้นได้นำตัวอย่างแกรฟีนโพลิมไปทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นโดยใช้ควันจากธูปเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่น PM2.5 ซึ่งชุดการทดลองจะประกอบด้วยโหลแก้ว 2 โหลประกบกัน เครื่องวัดปริมาณฝุ่น 2 อัน (อยู่ในโหลแก้วทั้งสอง) และแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิม (คั่นกลางระหว่างโหลแก้วทั้งสอง) ดังแสดงในรูป 23 โดยจะใส่ควันธูปในโหลแก้วด้านซ้าย รูป 24 และ ตาราง 7 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิม โดยค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิม (E) สามารถคำนวณได้จาก

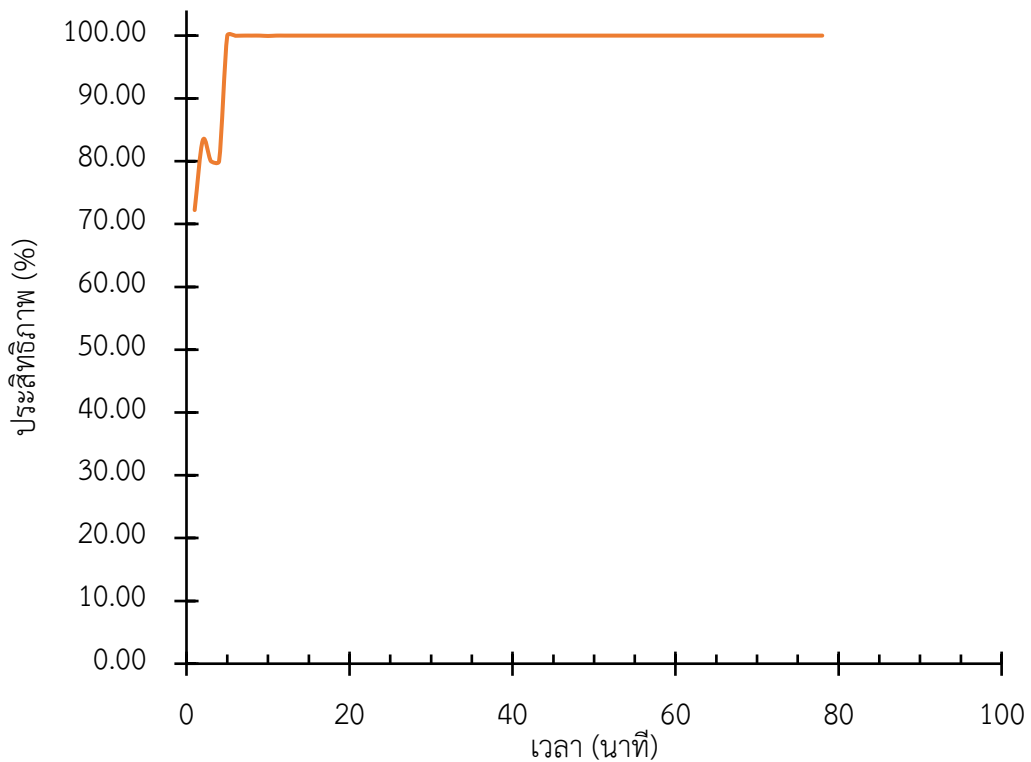
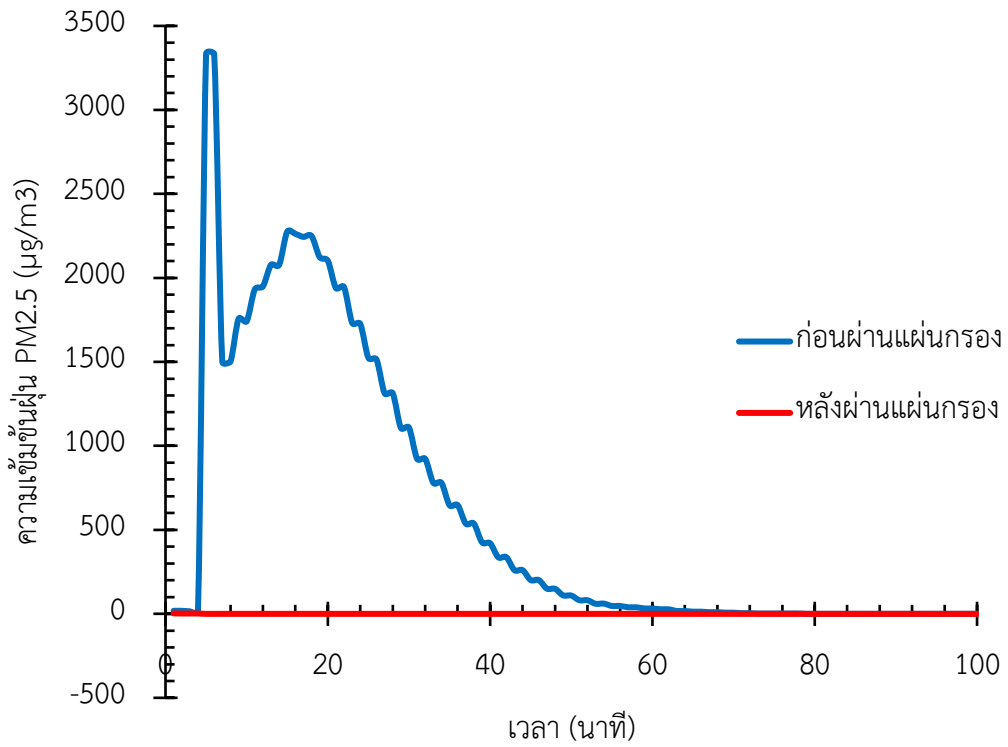
$$E = \frac{\text{ความเข้มข้นของฝุ่นก่อนผ่านแผ่นกรอง} - \text{ความเข้มข้นของฝุ่นหลังผ่านแผ่นกรอง}}{\text{ความเข้มข้นของฝุ่นก่อนผ่านแผ่นกรอง}} \times 100\%$$

โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแม้ว่าจะมีฝุ่น PM2.5 ที่มากถึง 3333 µg/m<sup>3</sup> แผ่นกรองแกรฟีนโพลิมก็สามารถกรองฝุ่นดังกล่าวไปหมด ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการกรองฝุ่นที่สูงถึง 100%



รูป 23 การทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น PM2.5 ของแผ่นกรองแกรไฟโนมโดยใช้วิธีเป็นแหล่งฝุ่น

PM2.5



รูป 24 (บน) กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีแดง) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม

(ล่าง) กราฟแสดงประสิทธิภาพการกรองฝุ่นของแผ่นกรองแกรฟีนโฟม

ตาราง 7 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟีนโพลิม

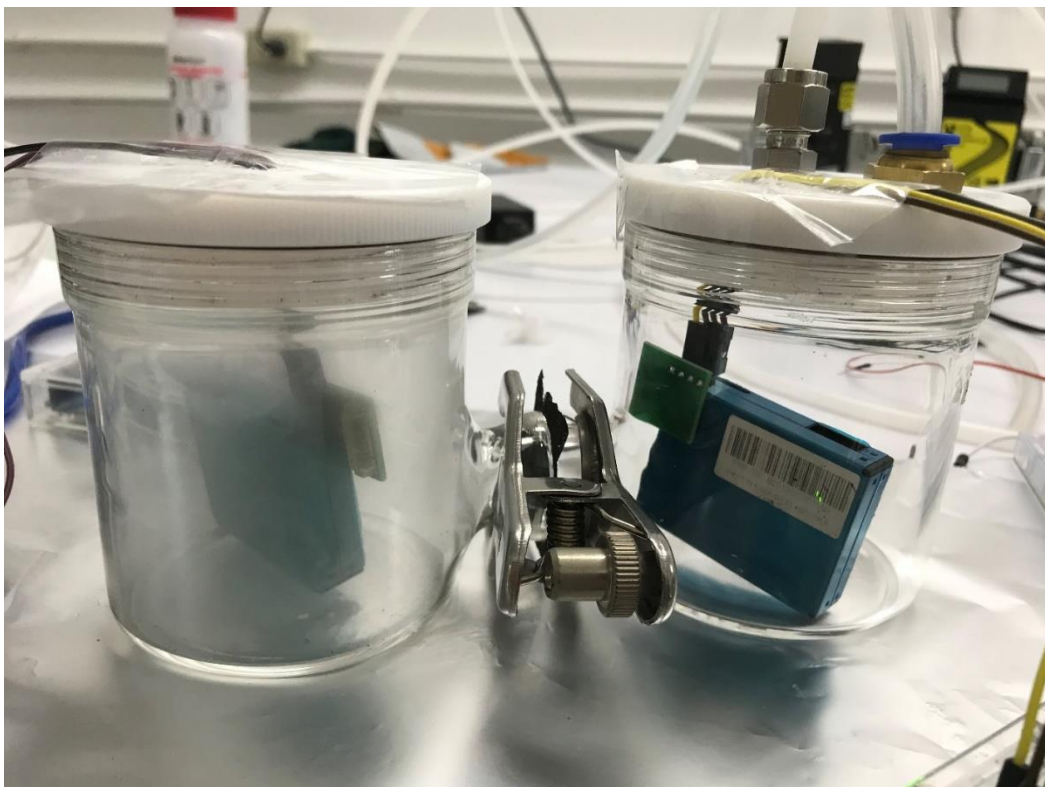
นาที่ที่	ความหนาแน่นของฝุ่น PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		ประสิทธิภาพ (%)
	ก่อนผ่านแผ่นกรอง	หลังผ่านแผ่นกรอง	
1	18	5	72.22
2	18	3	83.33
3	15	3	80.00
4	15	3	80.00
5	3333	1	99.97
6	3333	1	99.97
7	1500	0	100.00
8	1500	0	100.00
9	1756	0	100.00
10	1741	1	99.94
11	1931	0	100.00
12	1949	0	100.00
13	2078	0	100.00
14	2077	0	100.00
15	2275	0	100.00
16	2262	0	100.00
17	2244	0	100.00
18	2249	0	100.00
19	2123	0	100.00

20	2102	0	100.00
21	1939	0	100.00
22	1945	0	100.00
23	1732	0	100.00
24	1726	0	100.00
25	1524	0	100.00
26	1514	0	100.00
27	1313	0	100.00
28	1313	0	100.00
29	1107	0	100.00
30	1109	0	100.00
31	923	0	100.00
32	923	0	100.00
33	780	0	100.00
34	780	0	100.00
35	647	0	100.00
36	647	0	100.00
37	537	0	100.00
38	537	0	100.00
39	426	0	100.00
40	420	0	100.00
41	337	0	100.00

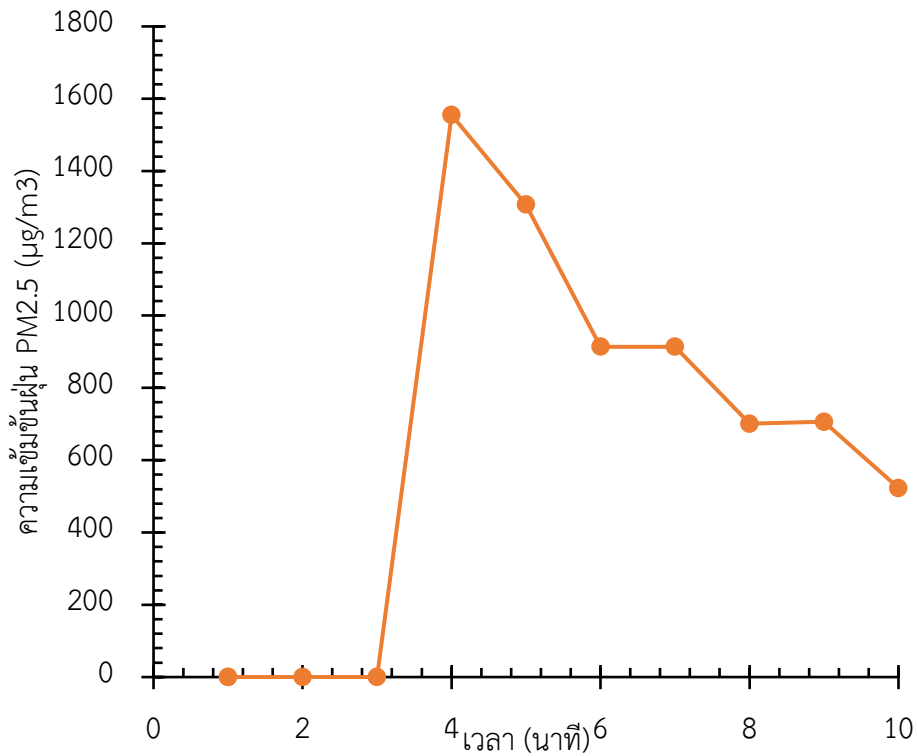
42	337	0	100.00
43	260	0	100.00
44	260	0	100.00
45	201	0	100.00
46	201	0	100.00
47	150	0	100.00
48	149	0	100.00
49	110	0	100.00
50	109	0	100.00
51	81	0	100.00
52	81	0	100.00
53	60	0	100.00
54	61	0	100.00
55	47	0	100.00
56	47	0	100.00
57	39	0	100.00
58	39	0	100.00
59	32	0	100.00
60	32	0	100.00
61	27	0	100.00
62	27	0	100.00
63	17	0	100.00

64	17	0	100.00
65	13	0	100.00
66	13	0	100.00
67	10	0	100.00
68	10	0	100.00
69	7	0	100.00
70	7	0	100.00
71	4	0	100.00
72	4	0	100.00
73	2	0	100.00
74	2	0	100.00
75	2	0	100.00
76	2	0	100.00
77	2	0	100.00
78	2	0	100.00

นอกจากนี้ทีมวิจัยยังได้ทดสอบการกรองฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูงมากดังแสดงในรูป 25 โดยในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์คือ 1. ต้องการทราบว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีที่มีประสิทธิภาพการกรองฝุ่นสูงนั้นสามารถกรองฝุ่นได้จริง โดยไม่ได้เป็นแผ่นที่อุดตันจนอากาศไม่สามารถผ่านได้หรือไม่ และ 2. เพื่อต้องการทราบขีดจำกัดของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีว่าสามารถกรองฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูงมากได้ระดับไหน โดยในการทดสอบนี้ทีมวิจัยได้ใส่ฝุ่น PM2.5 ปริมาณสูงมากๆ (ความหนาแน่นของฝุ่นมากกว่า  $10,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) จากควันธูปในโหลแก้วด้านซ้าย (ดังจะเห็นได้ว่าโหลแก้วด้านซ้ายจะมีลักษณะขุ่นมัว) เนื่องด้วยปริมาณฝุ่น PM2.5 ที่ใส่ในโหลแก้วนั้นมีความหนาแน่นที่สูงมาก ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัดฝุ่น ทีมวิจัยจึงไม่สามารถเปิดใช้งานเครื่องวัดฝุ่นที่อยู่ในโหลแก้วด้านซ้าย แต่ทีมวิจัยยังคงเปิดใช้งานเครื่องวัดฝุ่นที่อยู่ในโหลแก้วด้านขวาเพื่อวัดปริมาณฝุ่นที่ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยรูป 26 แสดงผลการทดสอบการกรองฝุ่นของแผ่นกรองแกรฟีนโพลีที่แสดงให้เห็นว่ามีฝุ่นปริมาณความหนาแน่นสูงสุด  $1555 \mu\text{g}/\text{m}^3$  สามารถผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นแกรฟีนโพลีดังกล่าวไม่ได้ตันแต่มีประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นที่สูงจริง

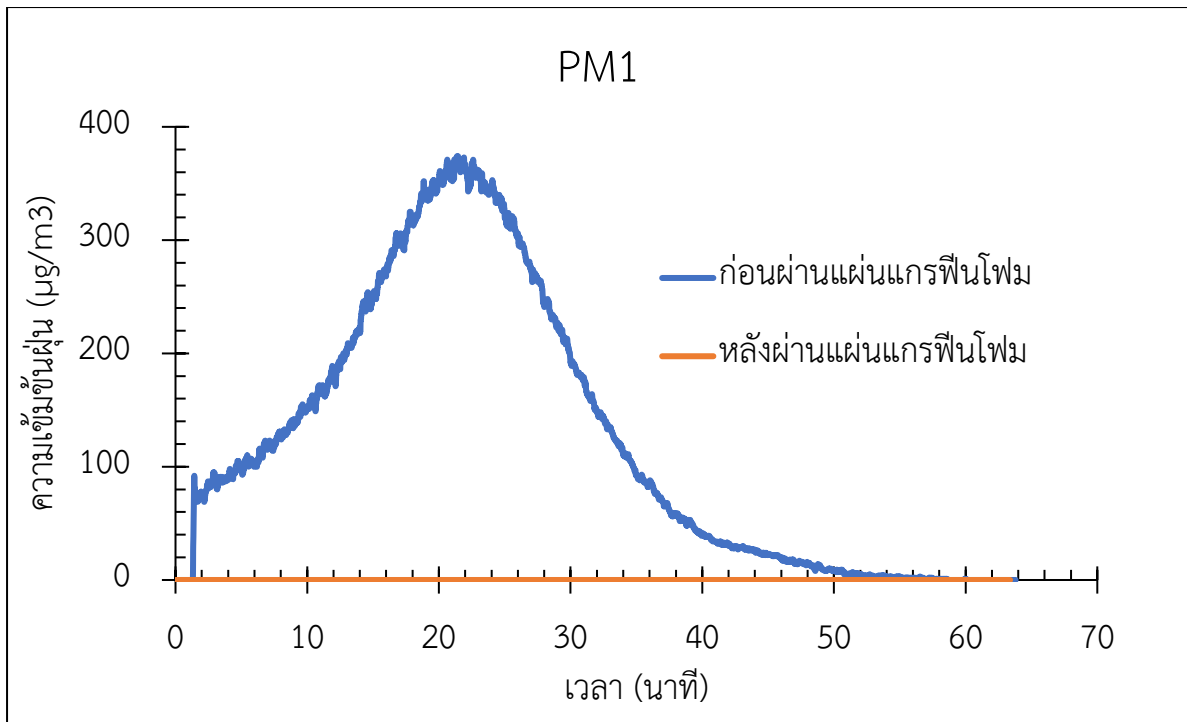


รูป 25 การทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีที่ความหนาแน่นของฝุ่น PM2.5 สูงมาก

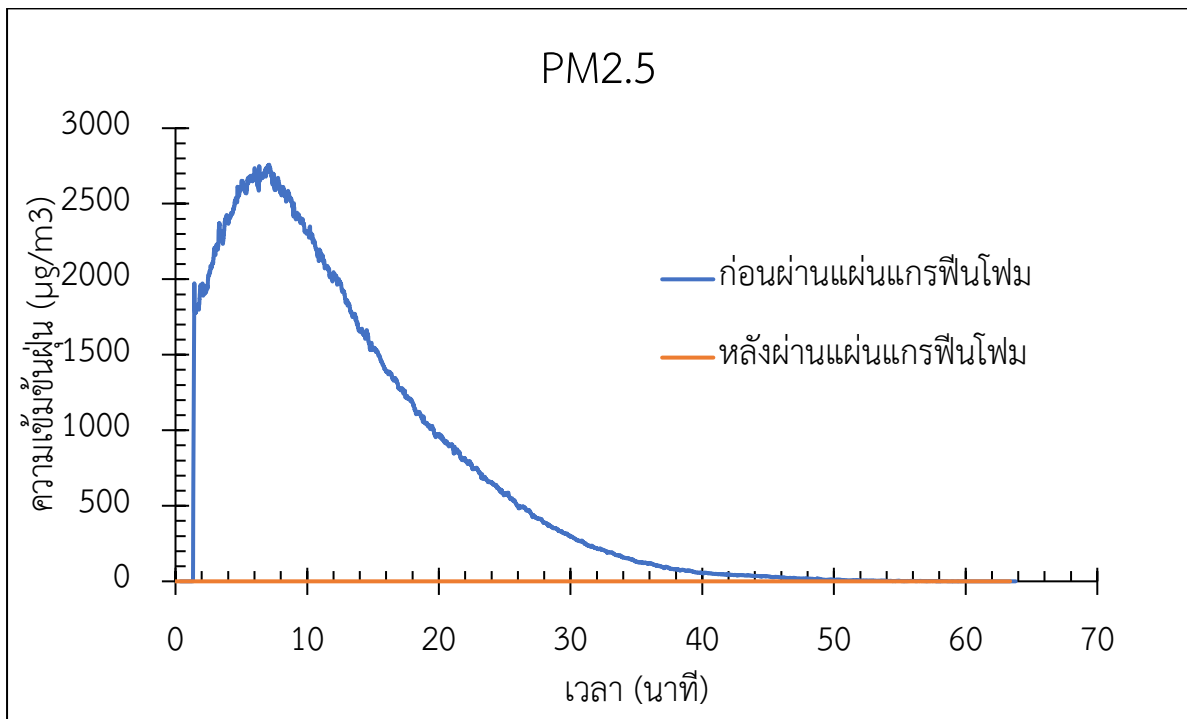


รูป 26 กราฟความหนาแน่นของฝุ่น PM2.5 ที่ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี ที่ทดสอบในสภาวะความหนาแน่นฝุ่นสูงมากๆ

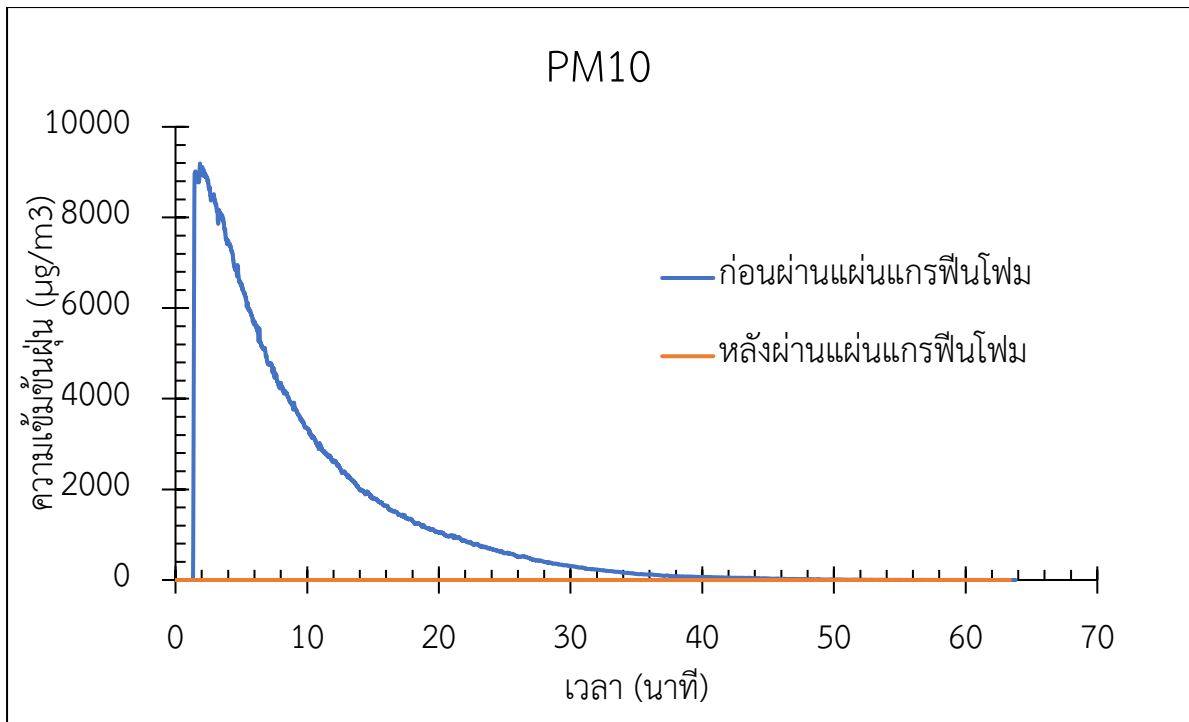
นอกจากนี้ทีมวิจัยได้ทดลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นจากวันรูปเพื่อหาค่าสูงสุดที่แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีจะกรองได้ โดยได้ทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นตั้งต้น 5 ครั้ง โดยผลการวัดฝุ่นก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีของ PM1 PM2.5 และ PM10 ของการทดสอบแต่ละครั้งแสดงใน รูป 27 ถึง รูป 41 จากการทดสอบพบว่าแกรฟีนโพลีสามารถกรองฝุ่นทั้งขนาด PM1 PM2.5 และ PM10 ได้ 100% ดังแสดงใน ตาราง 8 เนื่องด้วยเครื่องวัดฝุ่นไม่สามารถวัดค่าฝุ่นที่สูงกว่านี้ได้จึงทำให้ทีมวิจัยยังไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นของฝุ่นที่สูงที่สุดที่แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนจะสามารถกรองได้



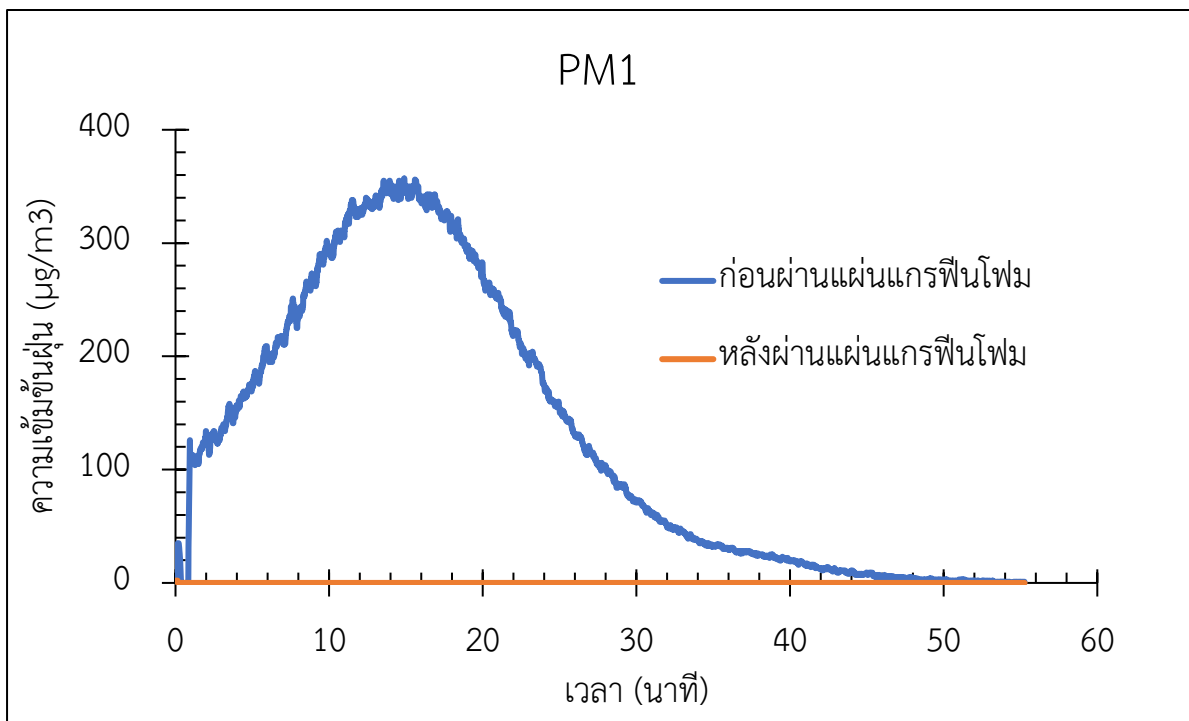
รูป 27 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 1



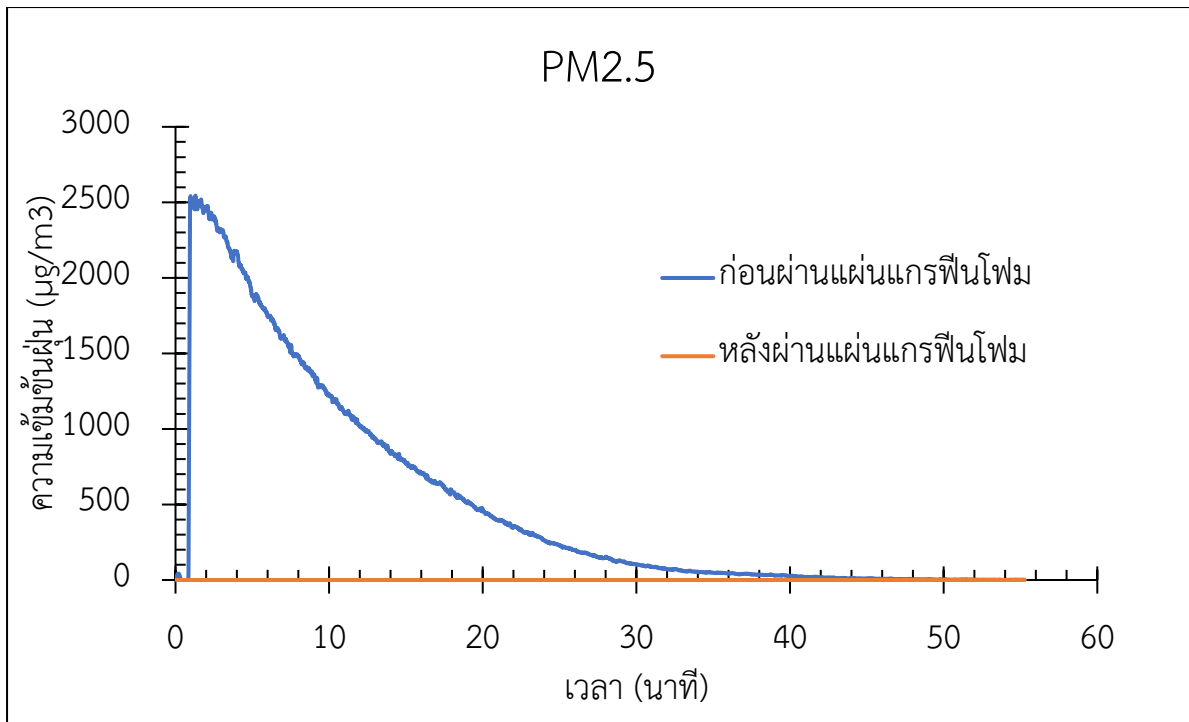
รูป 28 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 1



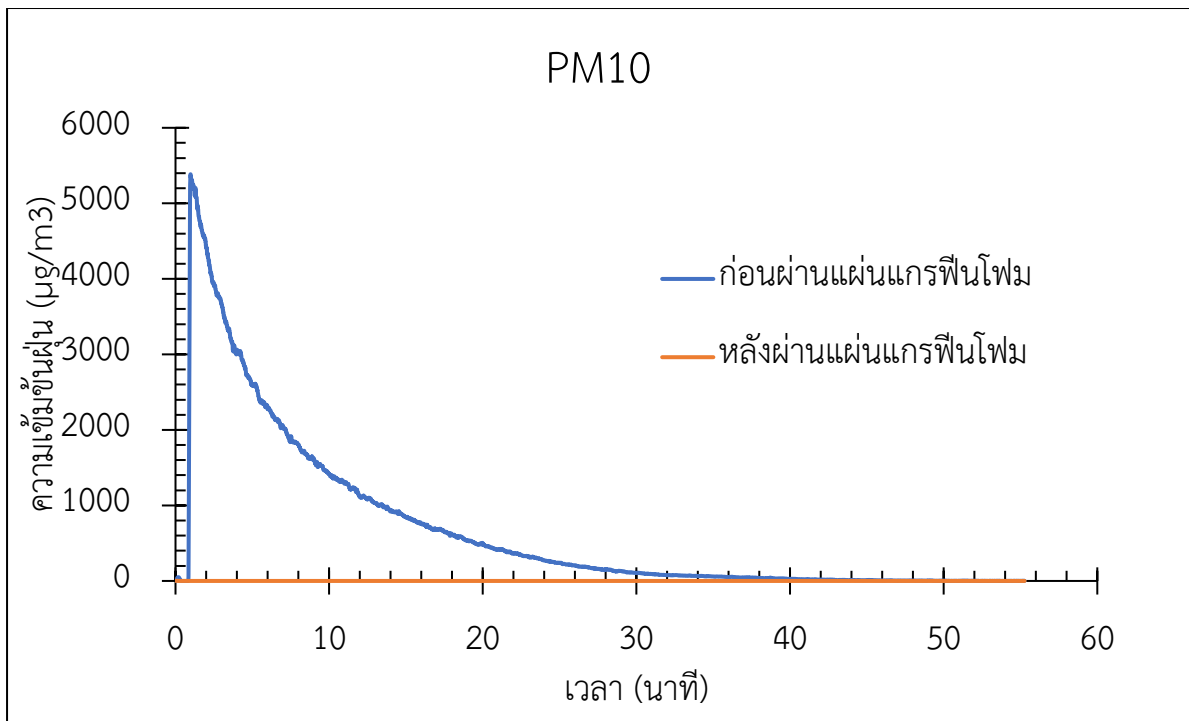
รูป 29 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 1



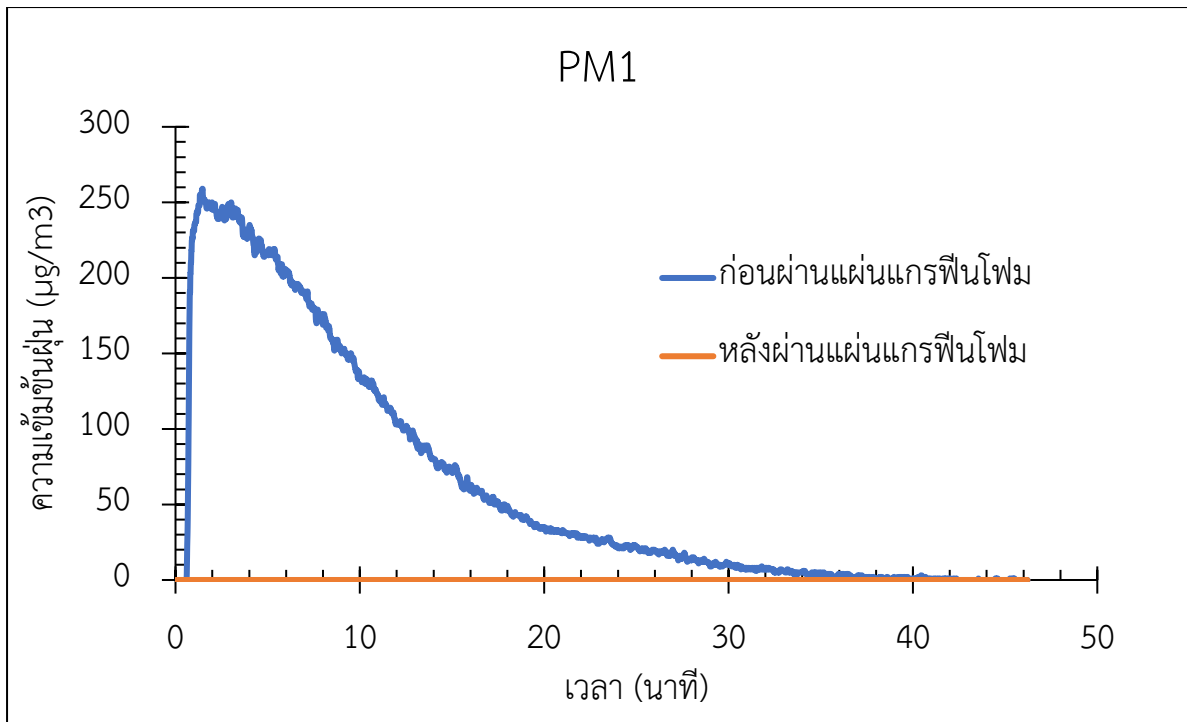
รูป 30 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 2



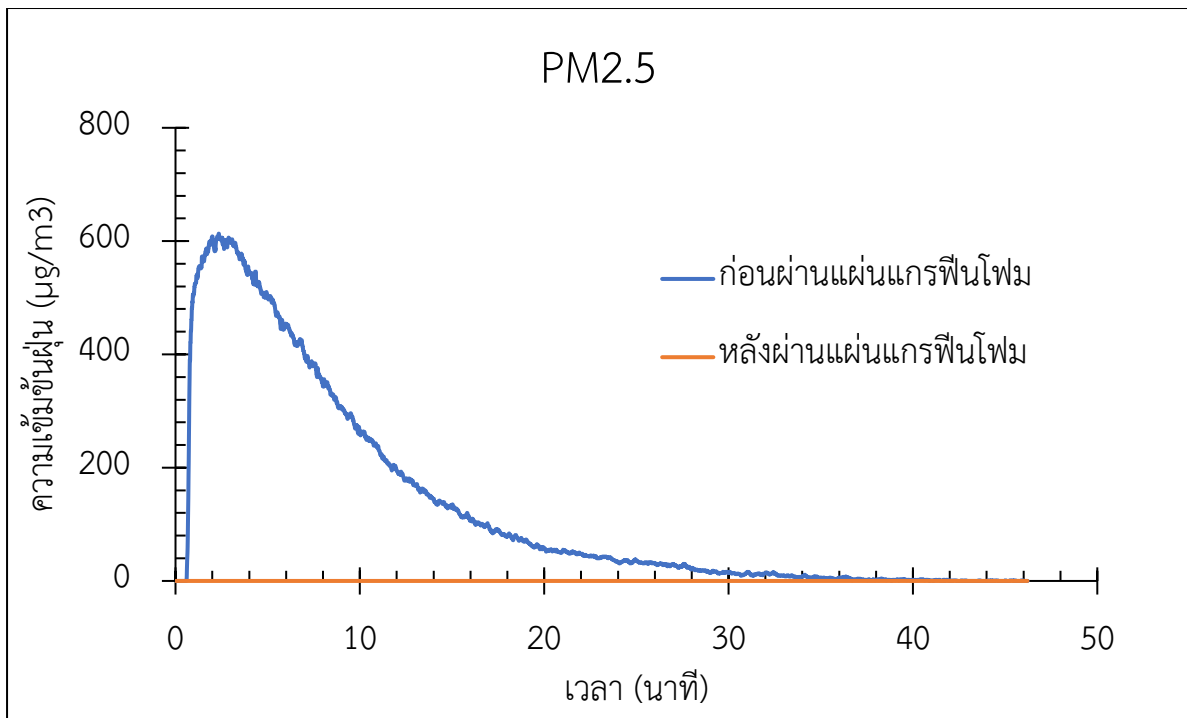
รูป 31 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 2



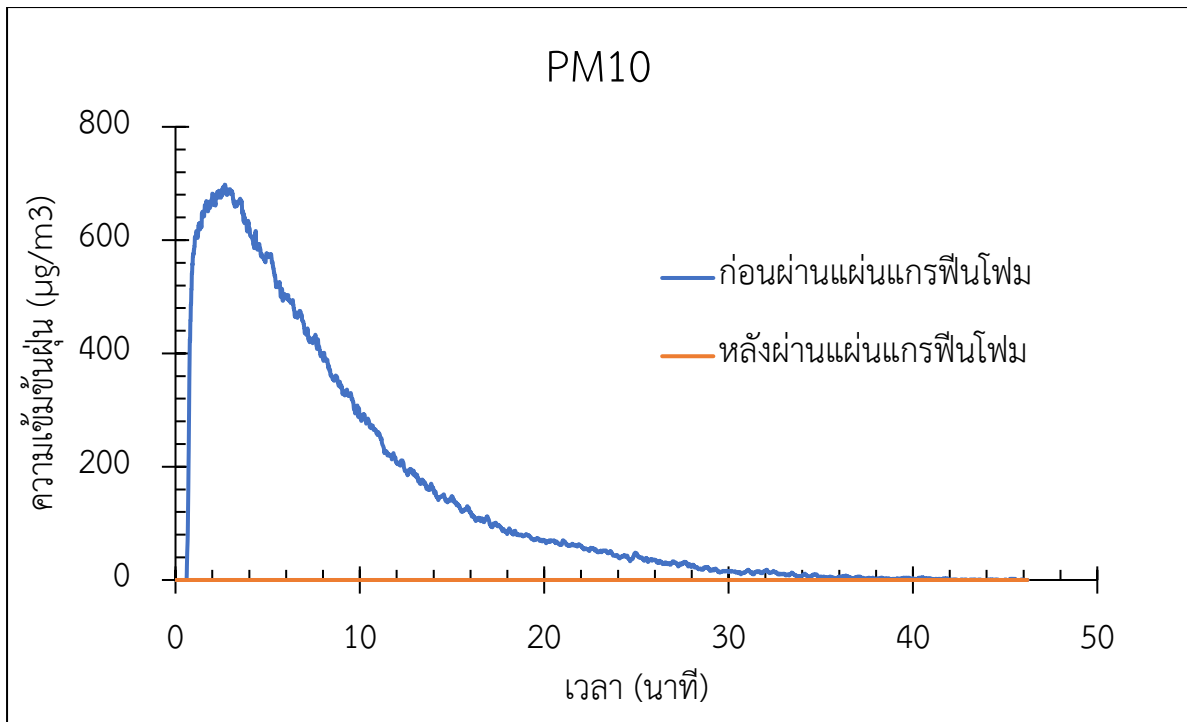
รูป 32 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 2



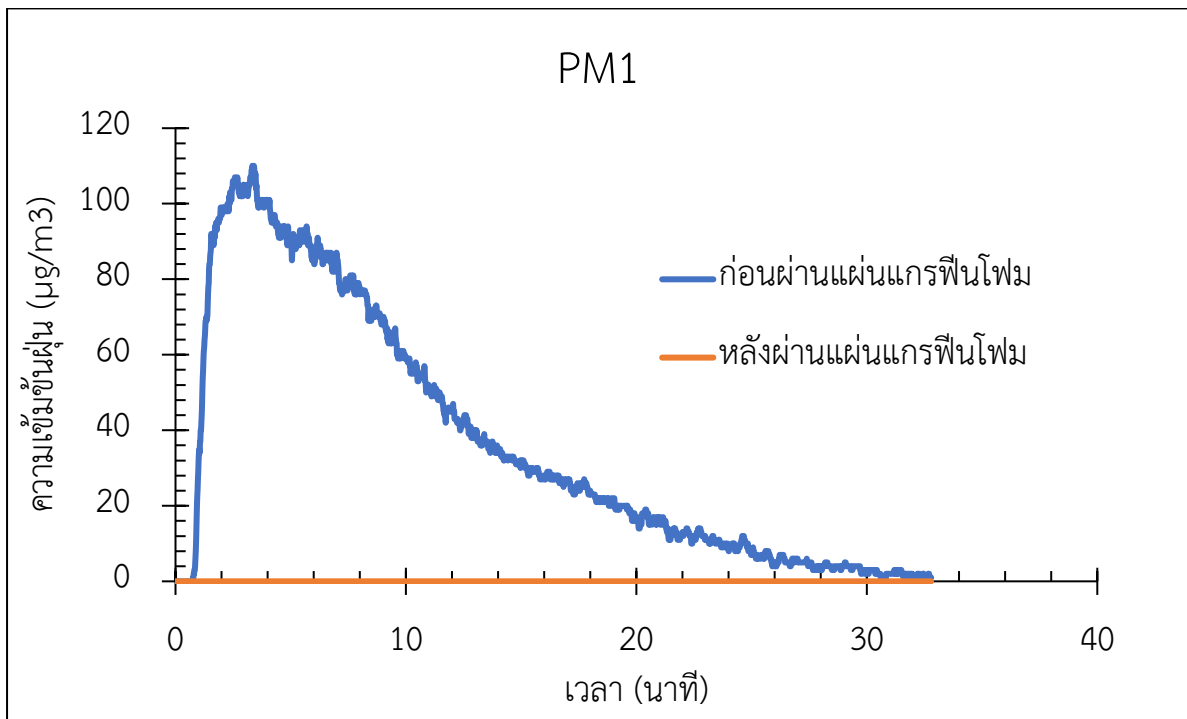
รูป 33 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพน ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 3



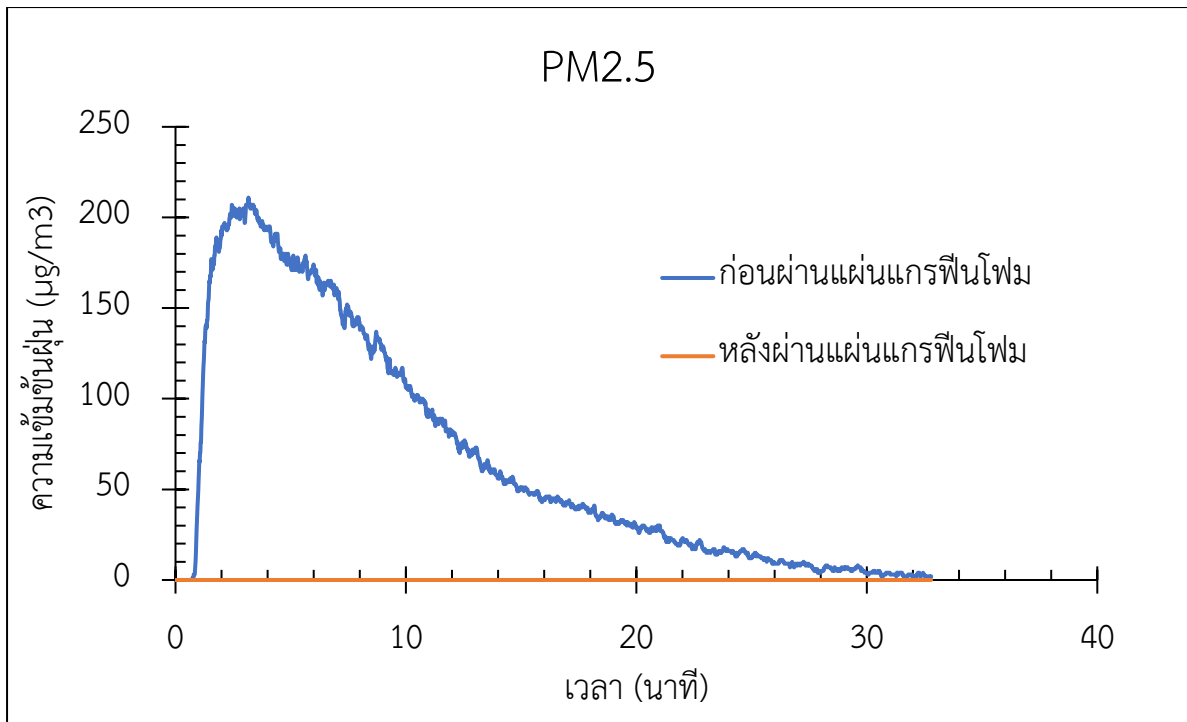
รูป 34 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพน ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 3



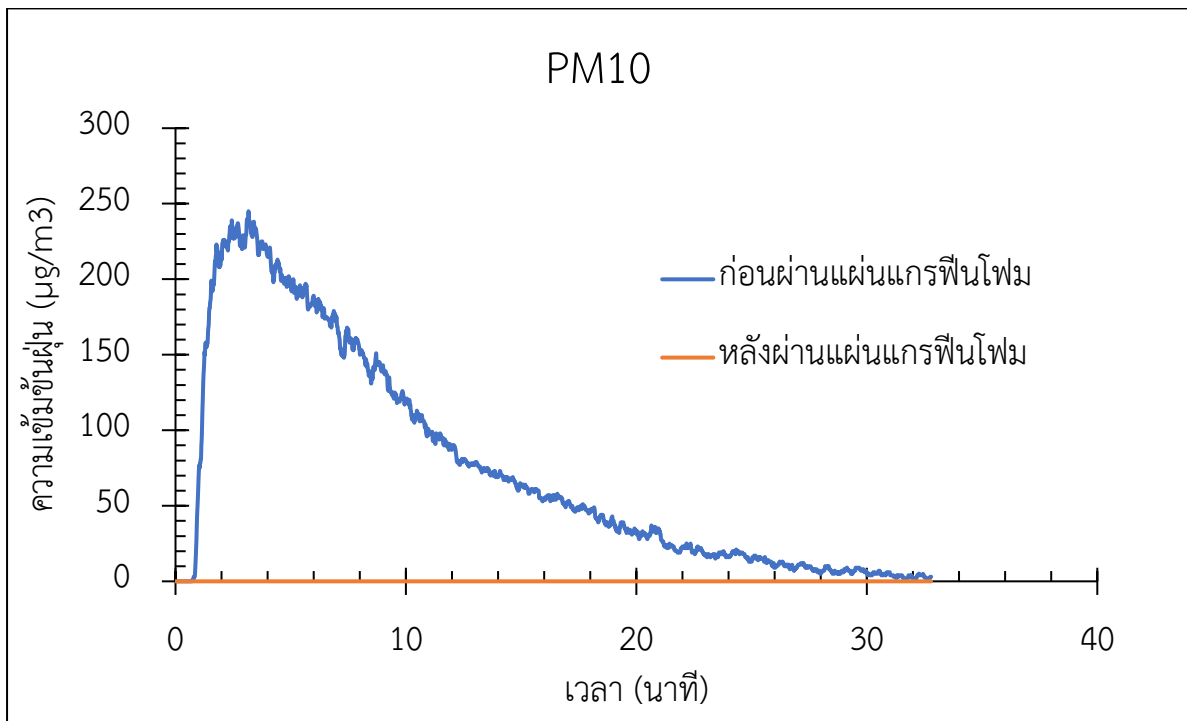
รูป 35 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพรเม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 3



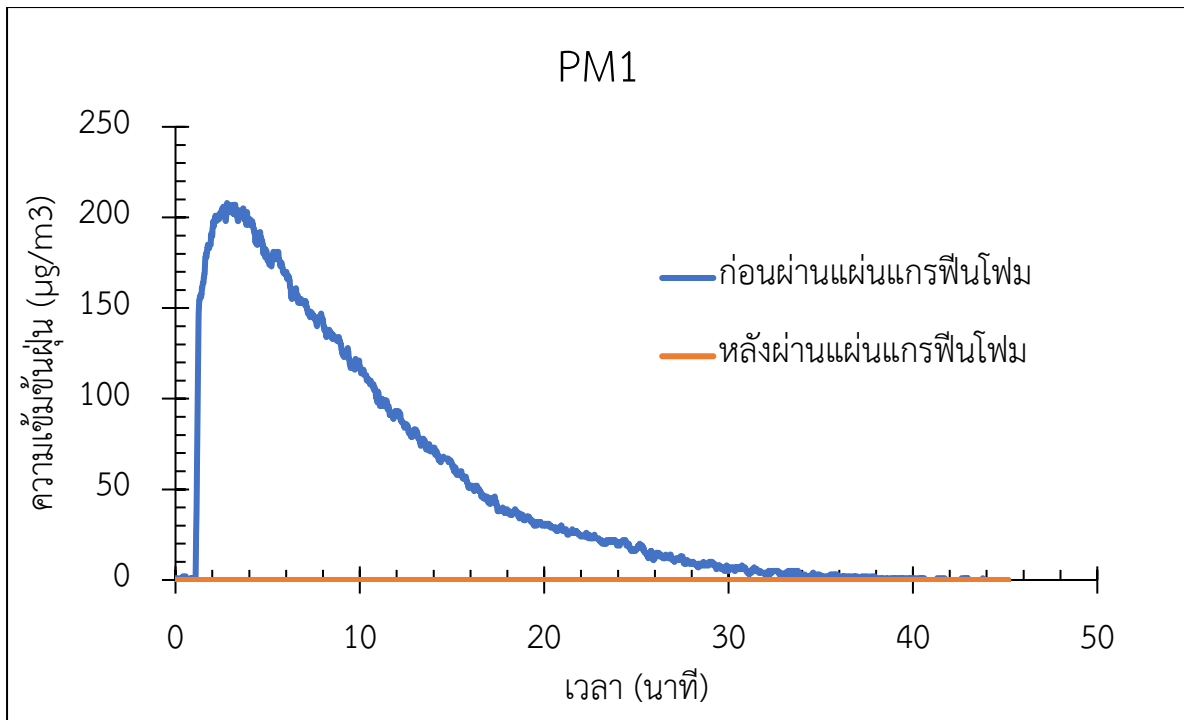
รูป 36 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพรเม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 4



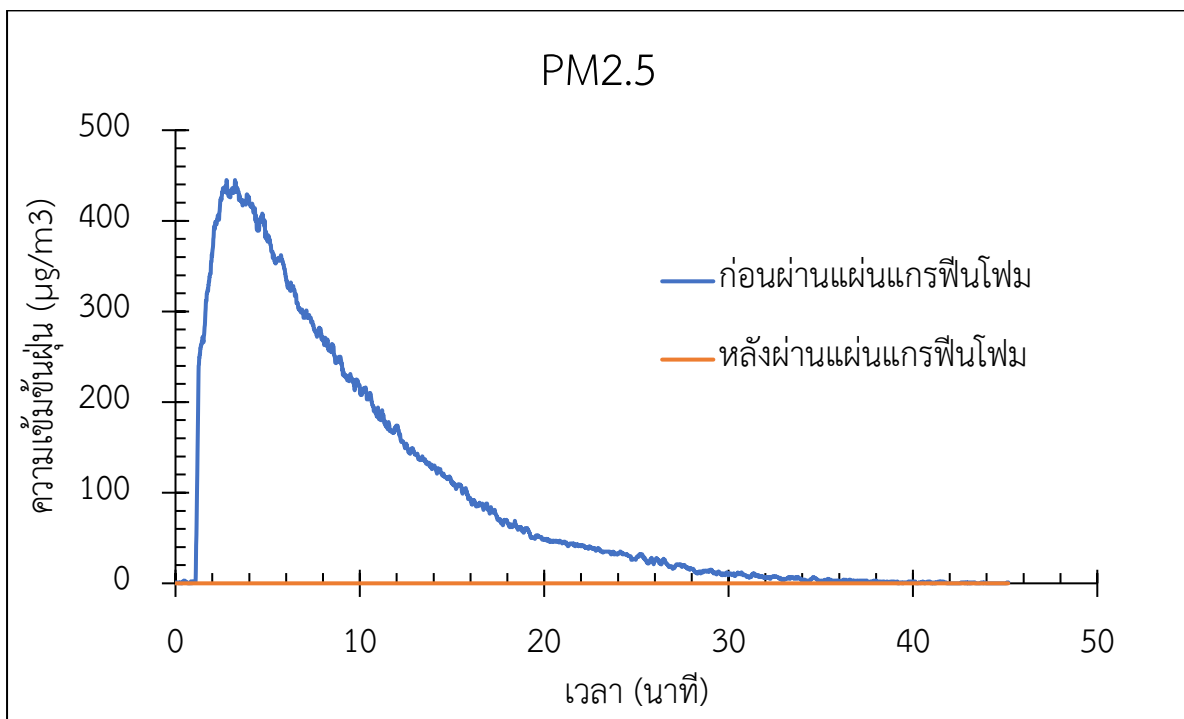
รูป 37 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 4



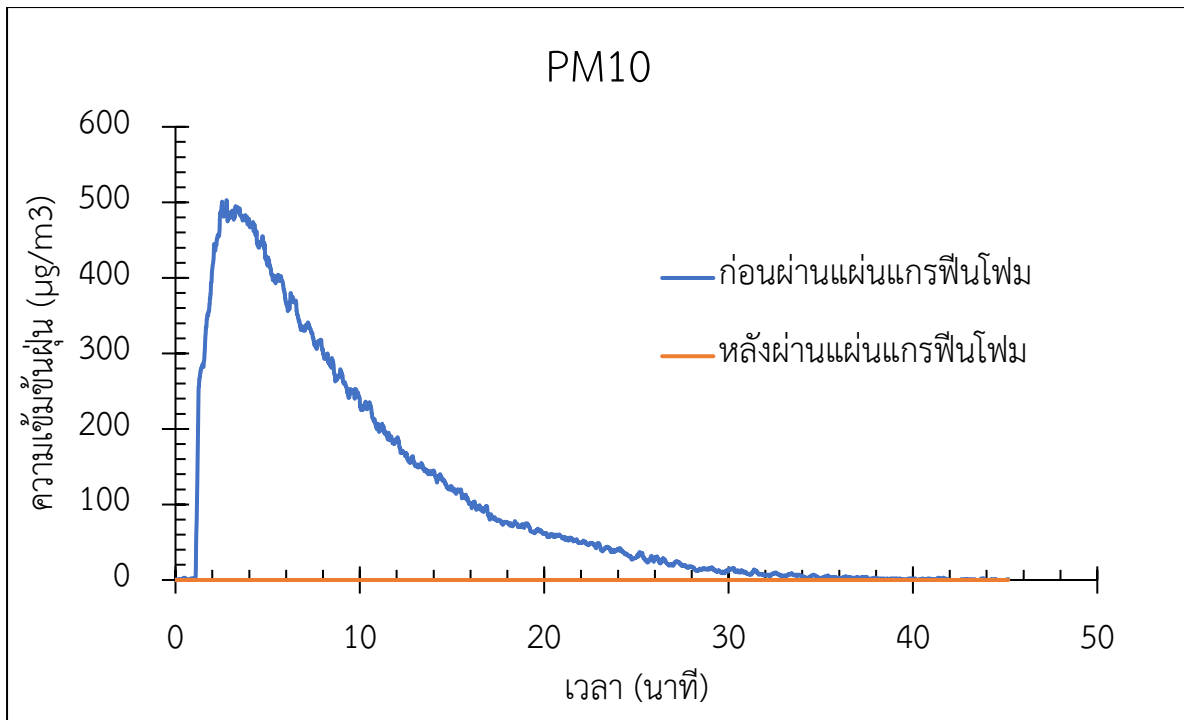
รูป 38 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 4



รูป 39 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 5



รูป 40 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 5



รูป 41 กราฟแสดงความหนาแน่นของฝุ่น PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพน ในการทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของฝุ่นครั้งที่ 5

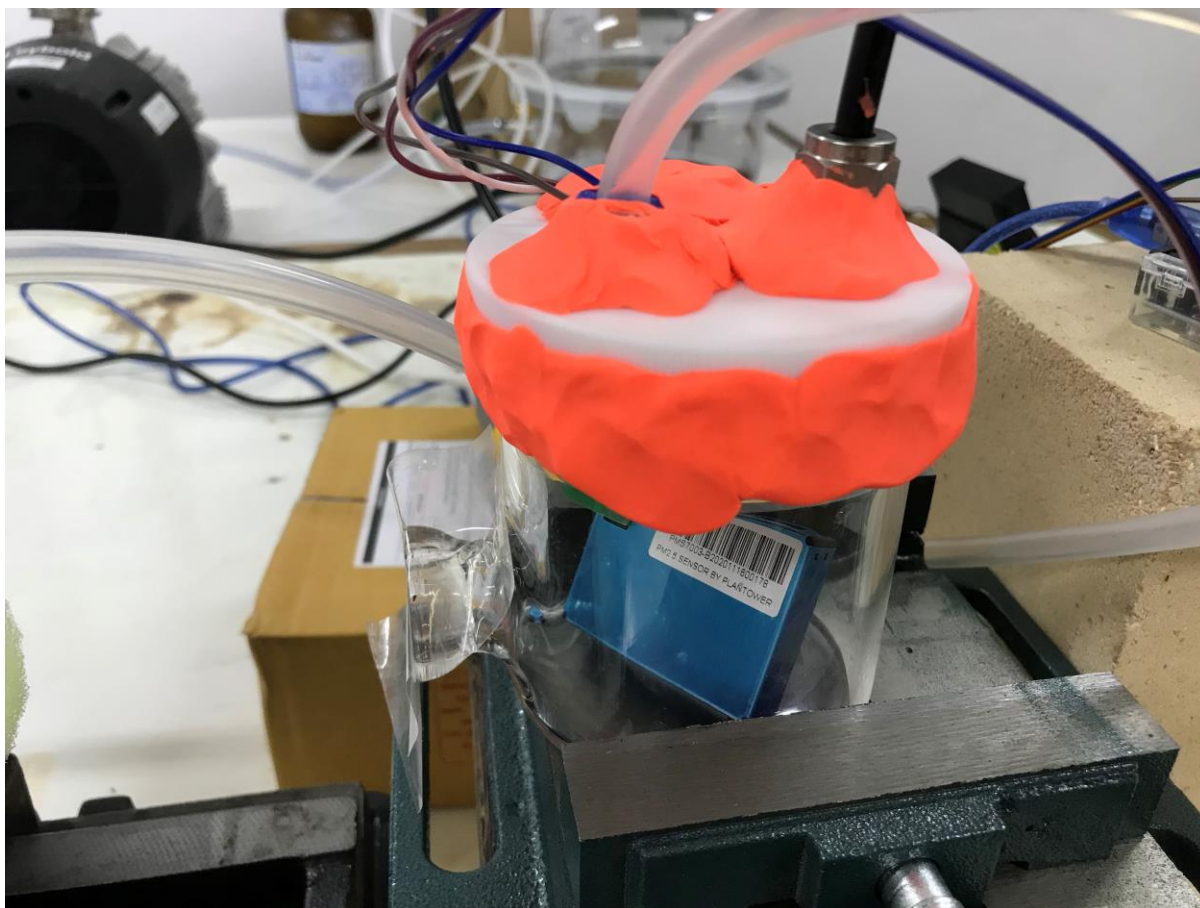
ตาราง 8 สรุปประสิทธิภาพการกรองฝุ่นจากควันทันรูปขนาด PM1, PM2.5 และ PM10 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟิน

โพน

	ชนิดฝุ่น	ความเข้มข้นฝุ่นสูงสุด ( $\mu\text{m}$ )		ประสิทธิภาพ (%)
		ก่อนผ่านแผ่นกรอง	หลังผ่านแผ่นกรอง	
ครั้งที่ 1	PM1	104	0	100
	PM2.5	211	0	100
	PM10	245	0	100
ครั้งที่ 2	PM1	206	0	100
	PM2.5	445	0	100
	PM10	503	0	100
ครั้งที่ 3	PM1	239	0	100
	PM2.5	613	0	100
	PM10	687	0	100
ครั้งที่ 4	PM1	75	0	100
	PM2.5	1928	0	100
	PM10	9192	0	100
ครั้งที่ 5	PM1	110	0	100
	PM2.5	2541	0	100
	PM10	5384	0	100

#### 5.4 การทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นจากอากาศจริงของแผ่นแกรฟีนโฟม

ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นจากอากาศจริงของแผ่นแกรฟีนโฟม โดยได้ทำการทดสอบที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) จังหวัดปทุมธานี โดยการทดลองนี้ได้เพิ่มอุปกรณ์วัดความดันภายในและภายนอกโหลแก้ว (สายสีขาวในรูป 42) และเพิ่มอุปกรณ์ดูดอากาศ (สายสีดำในรูป 42) ในโหลแก้วที่อยู่หลังแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม และเพื่อให้แน่ใจว่าโหลแก้วหลังผ่านกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมนั้นปิดสนิทและไม่มีการรั่วไหลของอากาศ ทีมวิจัยได้ทดสอบโดยการปิดรูรั่วของโหลแก้วทั้งหมดและทดลองดูดอากาศออก ดังแสดงในรูป 42 ซึ่งพบว่าโหลแก้วสามารถปิดได้สนิทไม่มีการรั่วไหลของอากาศภายนอก



รูป 42 การทดสอบการรั่วไหลของอากาศภายนอกโหลแก้ว โดยสายสีขาวใช้สำหรับวัดความดันภายในและภายนอกโหลแก้วและสายสีดำใช้สำหรับดูดอากาศภายในโหลแก้ว

ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพ การระบายอากาศ รวมถึงคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ โดยค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$Quality\ Factor = \frac{-\ln(1 - E)}{\Delta P}$$

เมื่อ E คือ ค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์คำนวณจาก

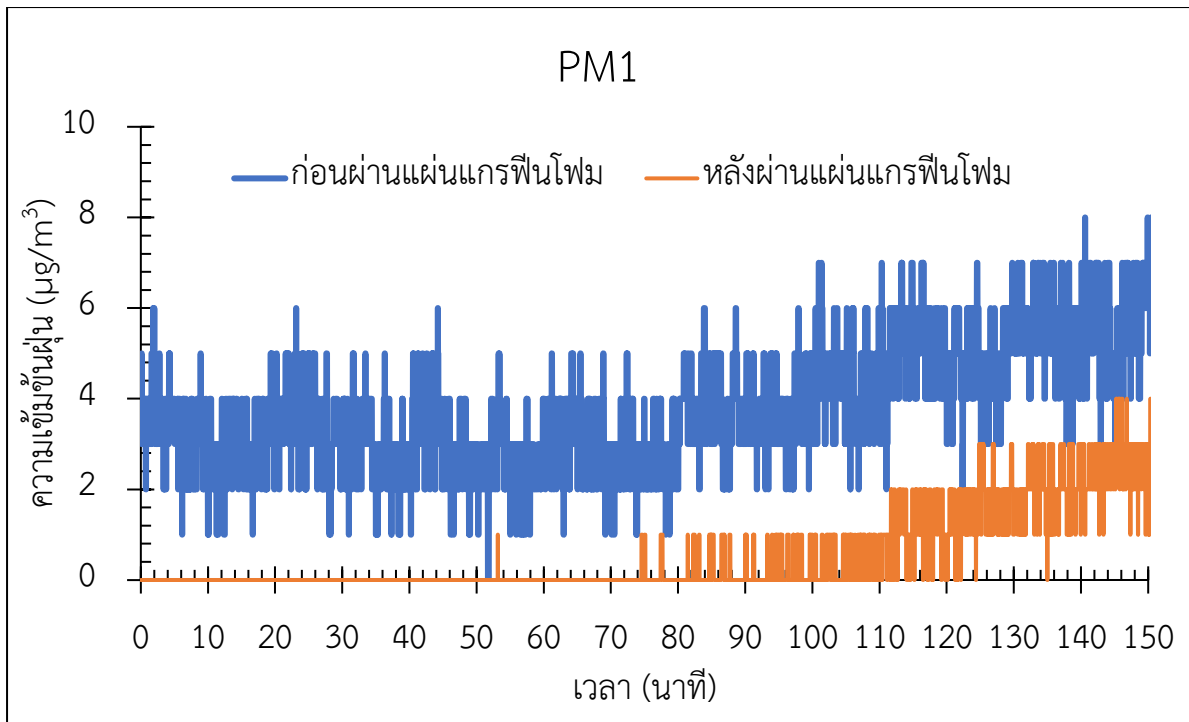
$E = \text{ผลต่างความเข้มข้นฝุ่นก่อนและหลังผ่านแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์} \div \text{ความเข้มข้นฝุ่นก่อนผ่านแผ่นกรองฝุ่น}$

$\Delta P$  คือ ผลต่างของความดันก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์

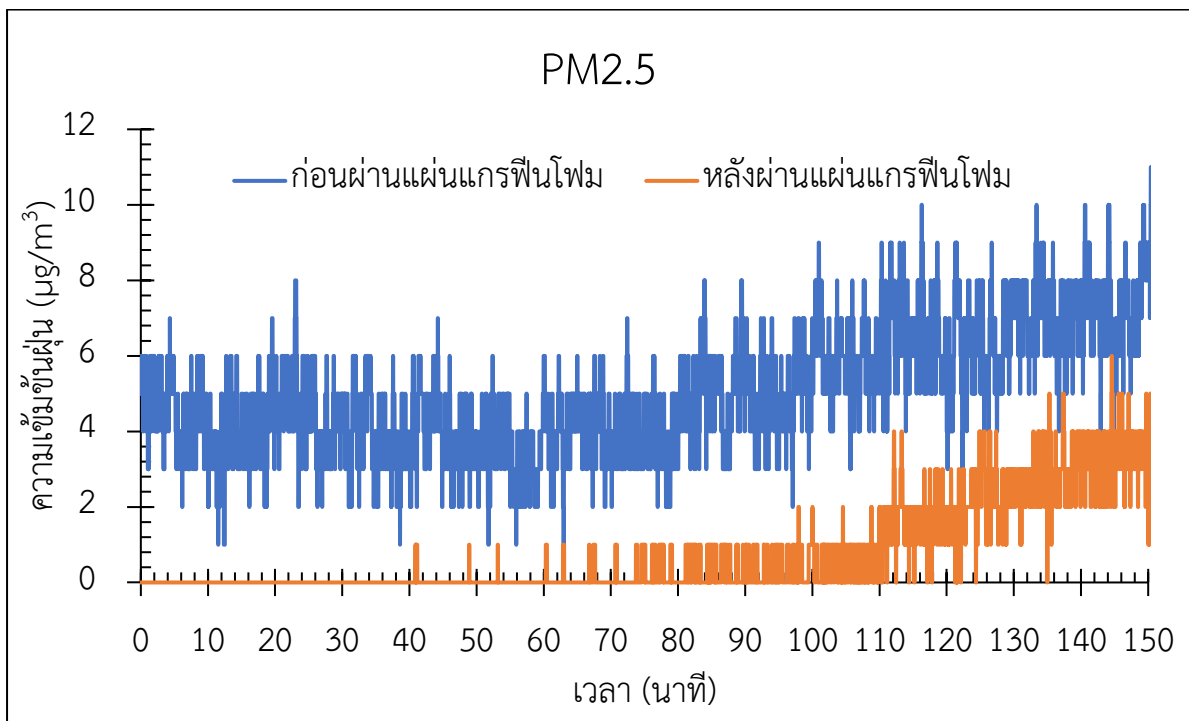
โดยการทดสอบนี้ได้ทดสอบกับอากาศจริงที่มีอัตราการไหลตั้งแต่ 0 ถึง 500 sccm โดยค่าความดันที่แตกต่างกันทำการวัดระหว่างก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) มีค่าเป็น 0 Pa และ อนันต์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นกรองแกรฟีนโพลีเมอร์นั้นมีการระบายอากาศที่ดีมาก โดยสาเหตุที่แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์นี้สามารถระบายอากาศได้ดีนั้นเนื่องมาจากแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์นี้มีค่าความพรุนที่สูง โดยทีมวิจัยได้ทำการทดสอบความพรุนของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ด้วยเครื่องวัดความเป็นรูพรุนของวัสดุโดยการแทนที่ด้วยปรอท (Mercury Intrusion Porosimeter, MIP) จากผลการวิเคราะห์พบว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์มีค่าความพรุนอยู่ที่ 96.6065 % (รายงานผลการวิเคราะห์ฉบับเต็มอยู่ในภาคผนวก) นอกจากนี้ทีมวิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นของแผ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ ซึ่งพบว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์นั้นสามารถกรองฝุ่นได้ทั้งขนาด PM1, PM2.5 และ PM10 โดยรูป 43 ถึง รูป 45 แสดงข้อมูลดิบของความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ โดยรูป 46 ถึง รูป 48 แสดงข้อมูลโดยเฉลี่ยของความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์สามารถลดความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ รูป 49 ถึง รูป 51 แสดงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ผ่านการกรองฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

ตาราง 9 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน (ระหว่างความดันอากาศภายนอกกับความดันอากาศในถ้วยแก้วหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟน์โพน) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564

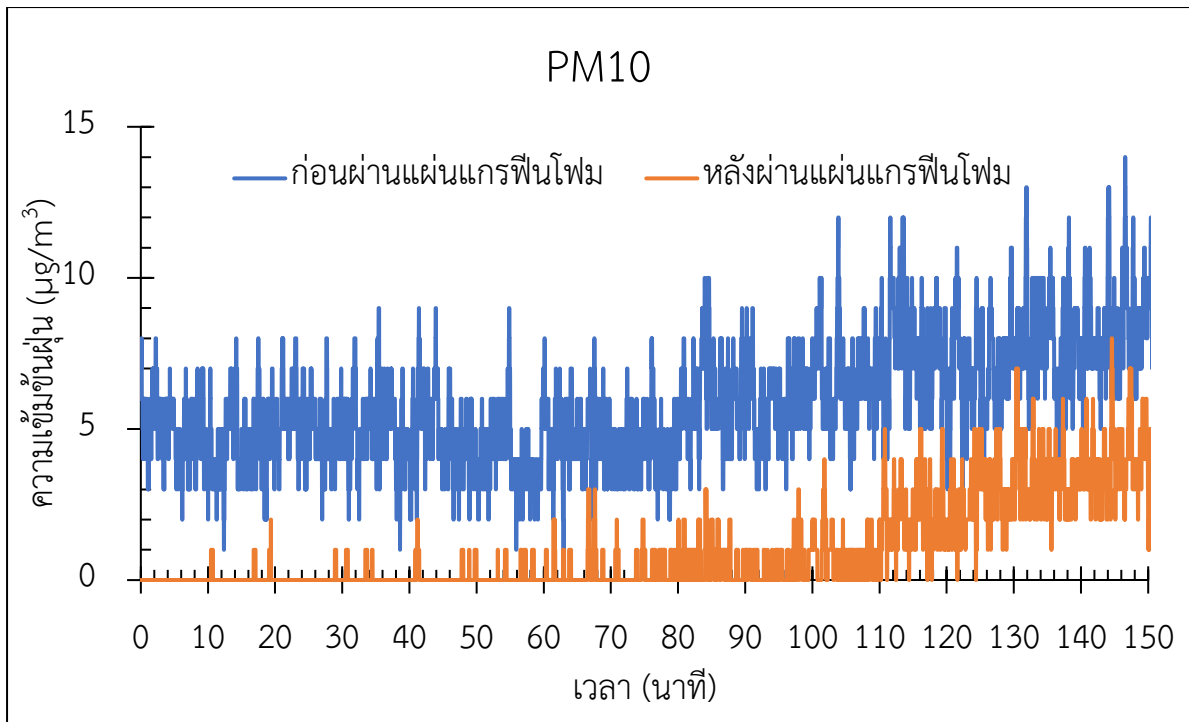
เวลาที่ (นาที)	อัตราไหล (sccm)	ความดัน (Pa)	Quality Factor
0-10	0	0	∞
10-20	10	0	∞
20-30	20	0	∞
30-40	30	0	∞
40-50	40	0	∞
50-60	50	0	∞
60-70	60	0	∞
70-80	70	0	∞
80-90	80	0	∞
90-100	90	0	∞
100-110	100	0	∞
110-120	200	0	∞
120-130	300	0	∞
130-140	400	0	∞
140-150	500	0	∞



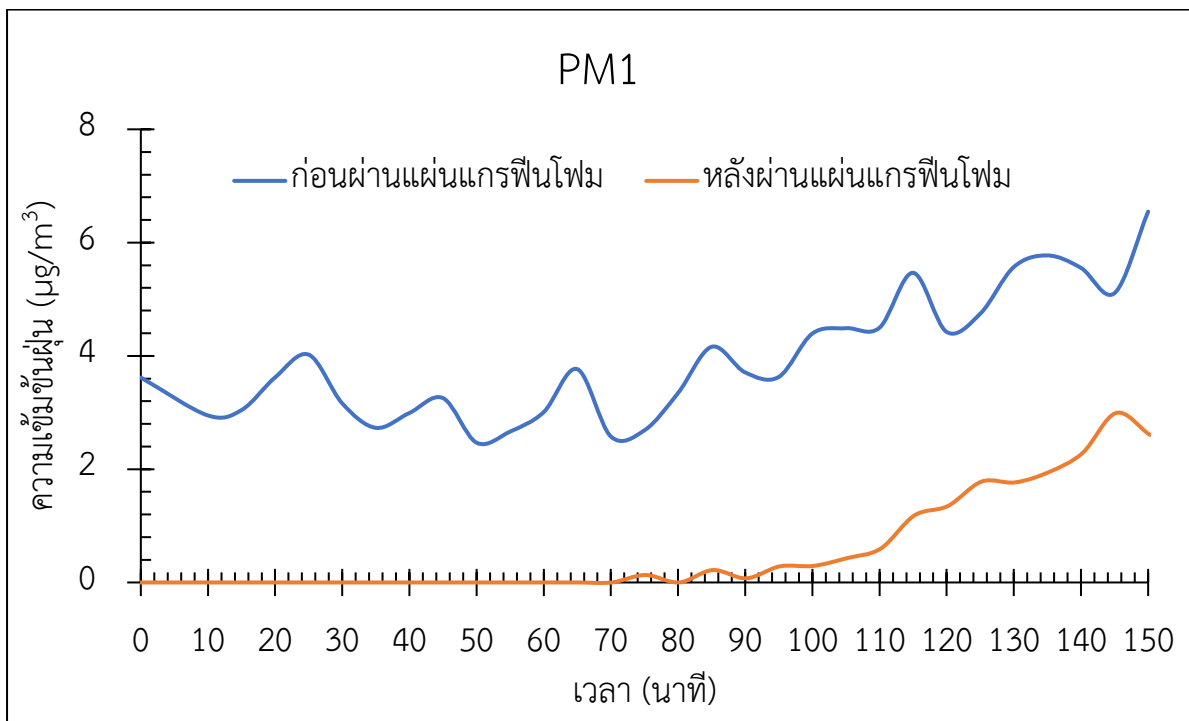
รูป 43 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



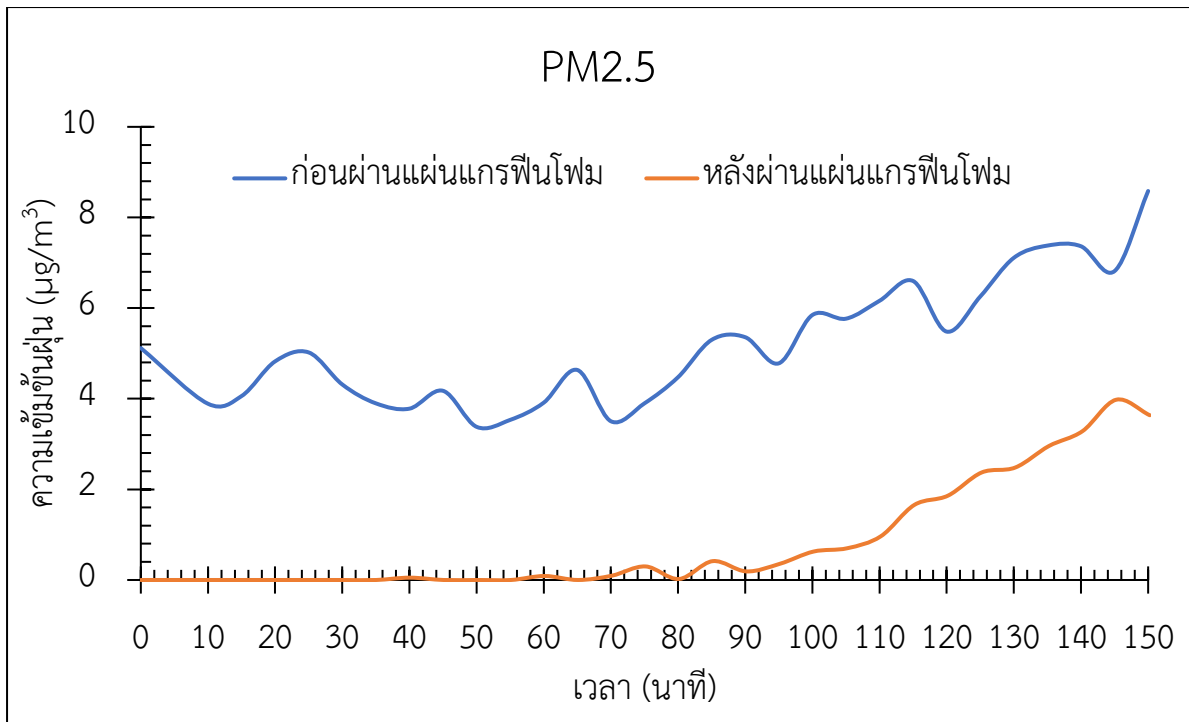
รูป 44 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



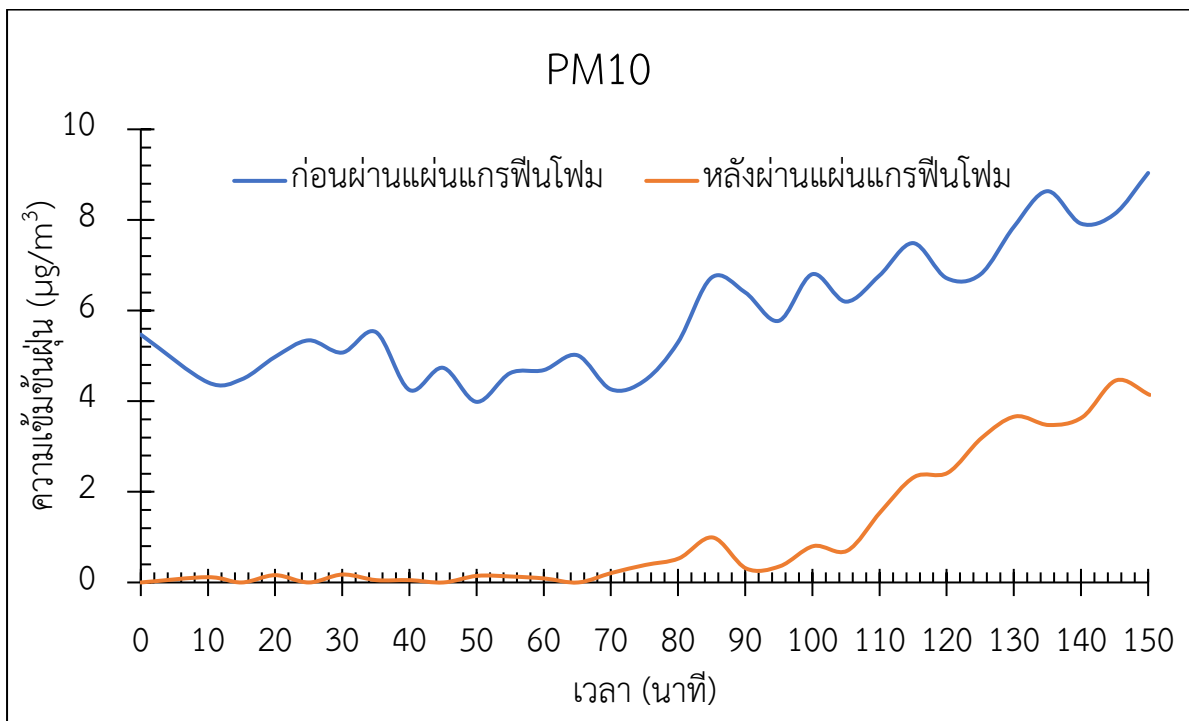
รูป 45 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



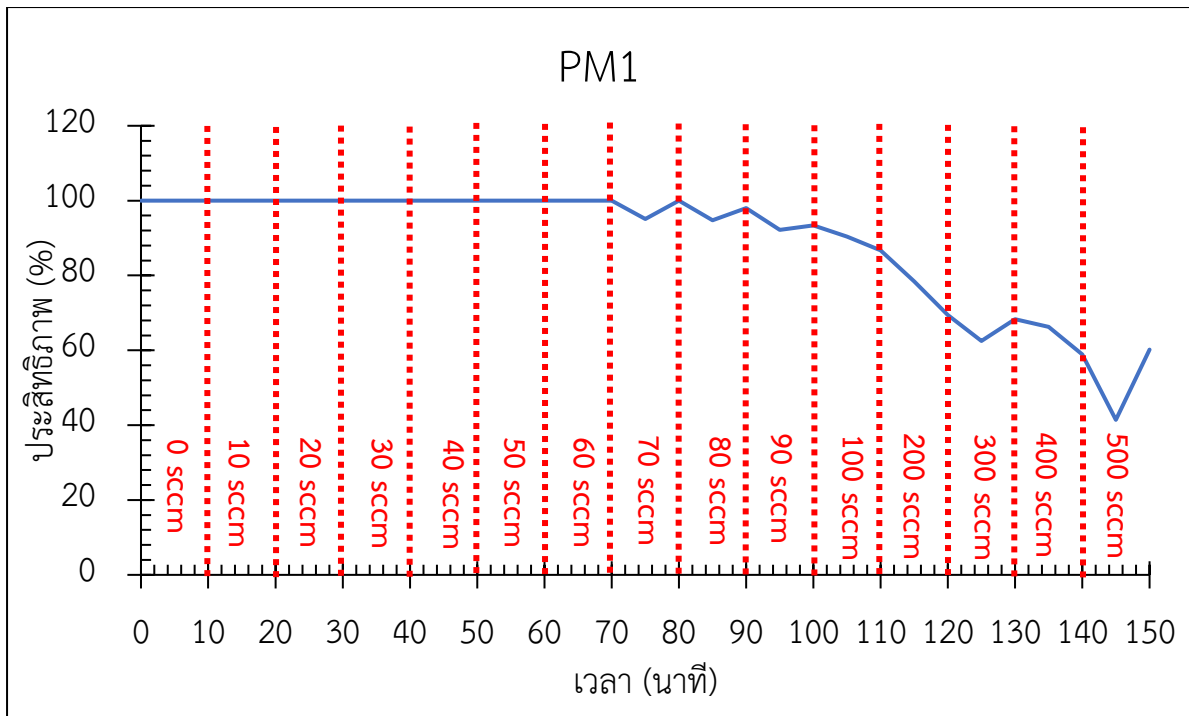
รูป 46 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



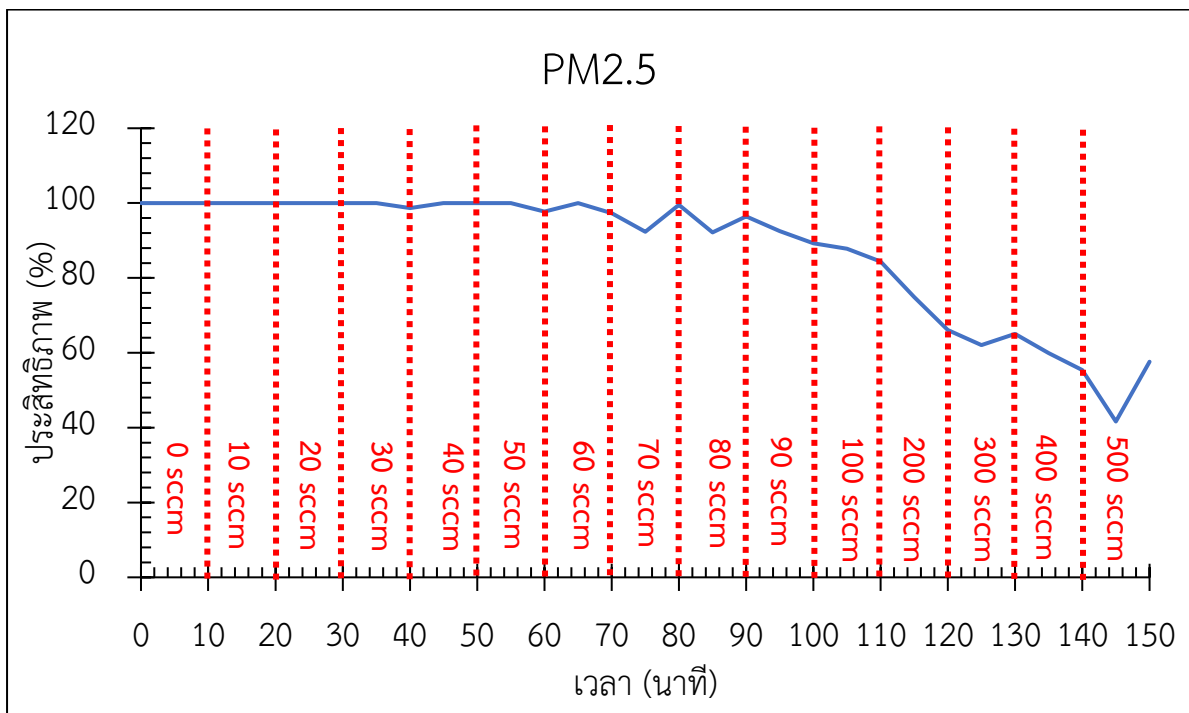
รูป 47 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



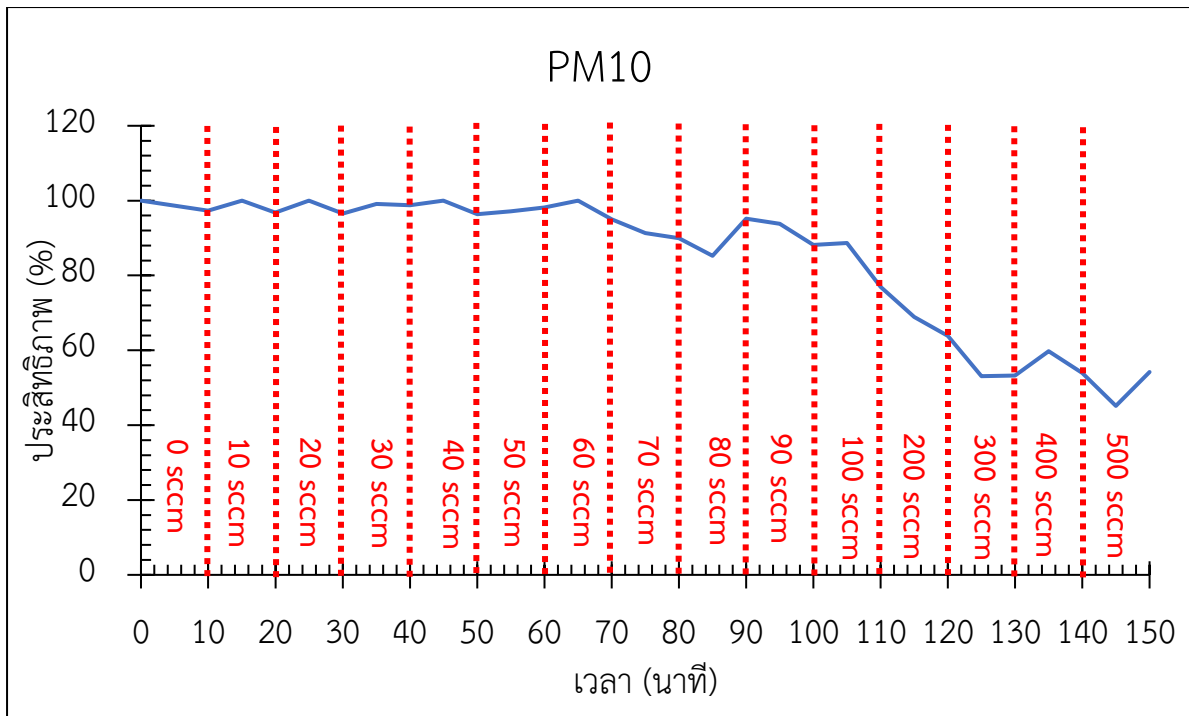
รูป 48 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีส้ม) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



รูป 49 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM1 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564



รูป 50 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM2.5 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564

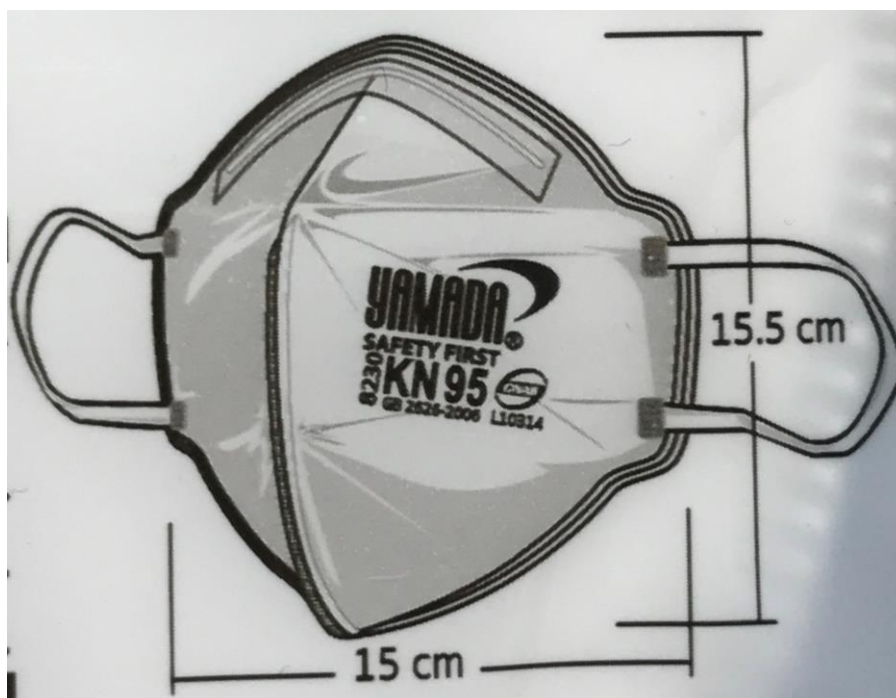


รูป 51 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM10 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564

สำหรับการประยุกต์แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเพื่อใช้เป็นหน้ากากกรองฝุ่น PM2.5 ประสิทธิภาพสูง การทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่น PM2.5 และการระบายอากาศ นั้นเป็นสิ่งที่จำเป็น จากบทความของสำนักข่าวBBC (<https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/z3xq6fr/revision/2>) ที่ให้ข้อมูลว่าปริมาณอากาศที่คนปกติหายใจเข้าในหนึ่งครั้งนั้นประมาณ 0.5 ลิตร และผู้ใหญ่ที่อยู่ในสภาวะปกติจะหายใจประมาณ 12 ครั้งต่อนาที ดังนั้นในหนึ่งนาทีมนุษย์จะหายใจเอาอากาศเข้าสู่ร่างกายประมาณ 6 ลิตร หรือ 6000 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยพื้นที่ของหน้ากากกันฝุ่นทั่วไปนั้นอยู่ที่ประมาณ  $15 \times 15.5 = 232.5$  ตารางเซนติเมตร (รูป 52) ดังนั้นความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นกรองฝุ่นต่อพื้นที่ในหนึ่งนาที จะมีค่าเป็น  $6000/232.5 = 25.81$  เซนติเมตรต่อนาที และเนื่องด้วยพื้นที่แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร (รูป 53) ซึ่งมีพื้นที่เป็น 2 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นปริมาณอากาศที่จะไหลผ่านแผ่นกรองในหนึ่งนาทีคือ 51.61 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกรองฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 sccm และ 60 sccm มีค่าประสิทธิภาพเข้าใกล้ 100% ดังแสดงใน ตาราง 10

ตาราง 10 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของการดักจับฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ที่อัตราการไหลต่างๆ

อัตราไหล	ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น (%)		
	PM1	PM2.5	PM10
50	99.85	99.90	97.83
60	100	97.85	93.21



รูป 52 ขนาดของหน้ากากกันฝุ่นยี่ห้อ yamada



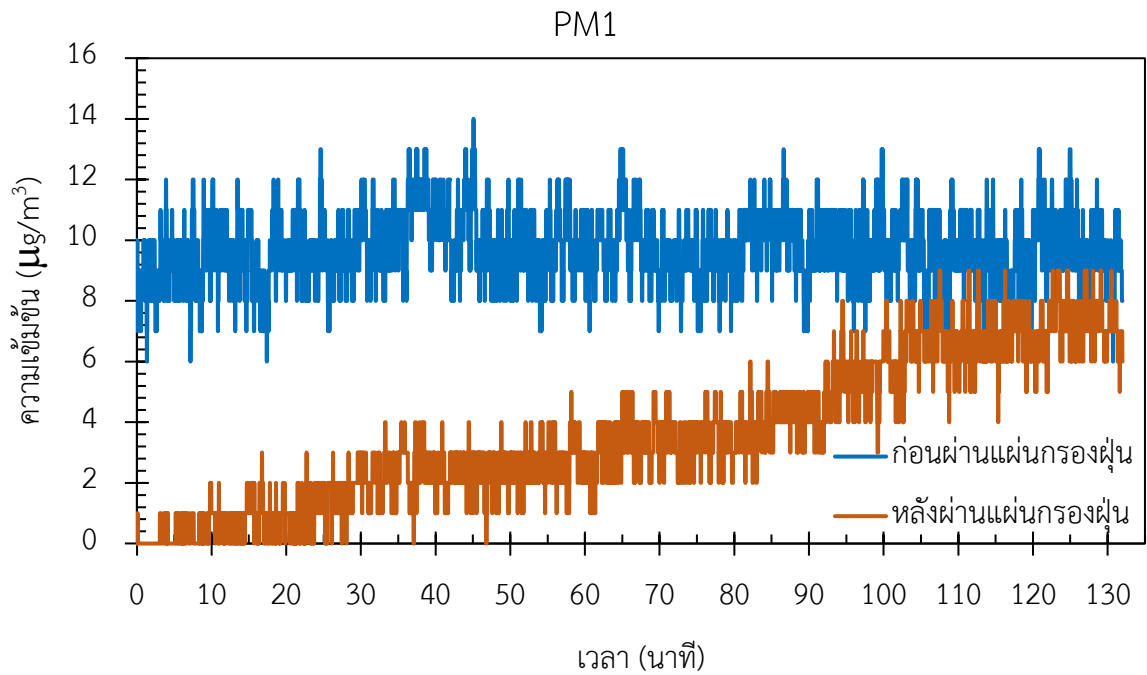
รูป 53 ขนาดของรูที่ให้อากาศไหลผ่านสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพผ่านกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม

นอกจากนี้ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมเพิ่มเติมโดยได้ทำการสังเคราะห์แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมใหม่อีก 2 ชั้น และทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564 และ วันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565 สำหรับการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ตาราง 11 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน, และค่าตัวประกอบคุณภาพ ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยค่าความดันที่แตกต่างกันมีค่าเป็น ศูนย์ ในทุกอัตราไหล ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผ่นกรองฝุ่นมีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าเป็นอนันต์ รูป 54 ถึง รูป 56 แสดงข้อมูลดิบของความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม โดยรูป 57 ถึง รูป 59 แสดงข้อมูลโดยเฉลี่ยของความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม

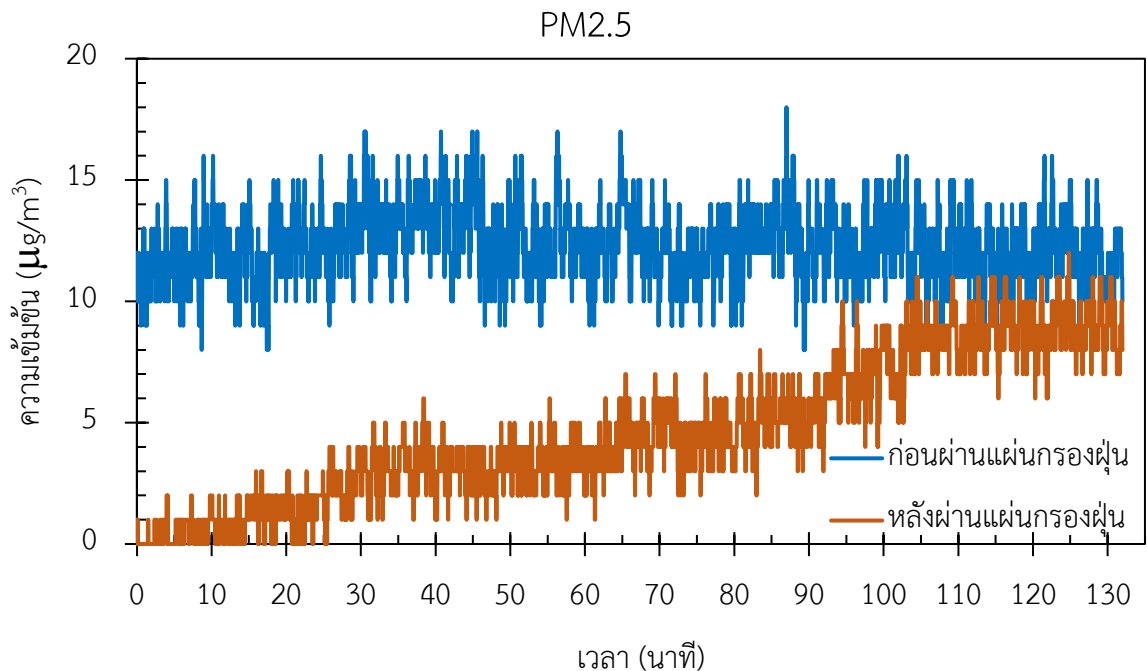
ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟโนไมสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ รูป 60 ถึง รูป 62 แสดงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟโนไมที่ผ่านการกรองฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ตามลำดับ จากกราฟจะเป็นได้ว่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟโนไมลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

ตาราง 11 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน (ระหว่างความดันอากาศภายนอกกับความดันอากาศในถ้วยแก้วหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟน์โพน) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564

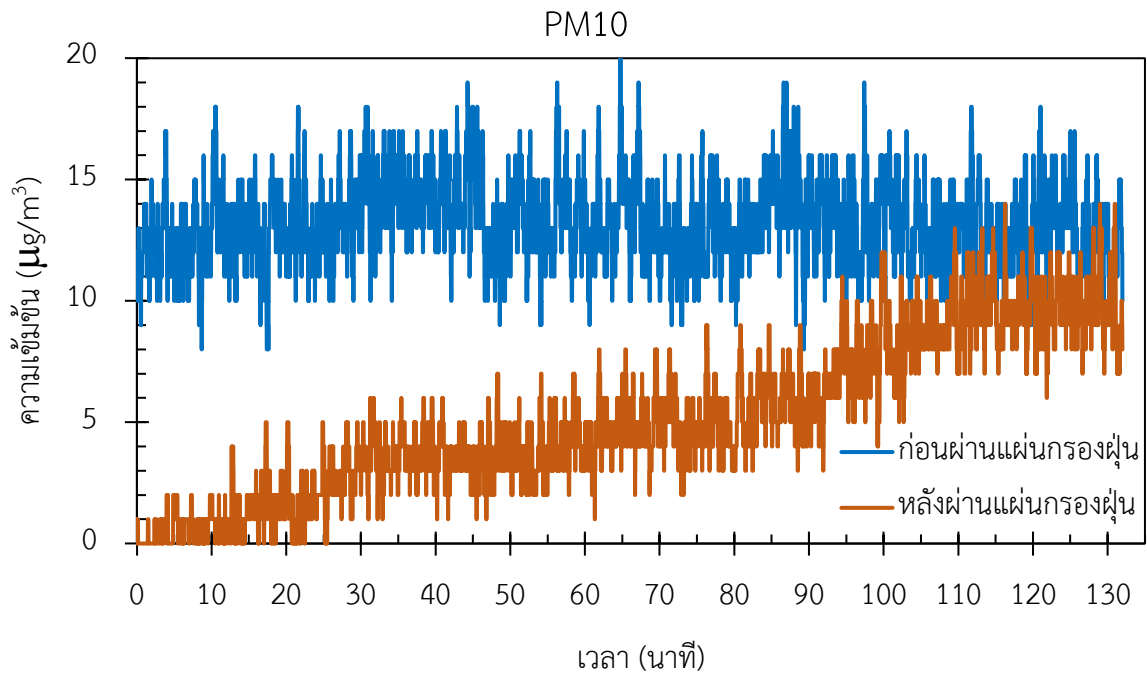
เวลาที่ (นาทื)	อัตราไหล (sccm)	ความดัน (Pa)	Quality Factor
0-10	20	0	∞
10-20	30	0	∞
20-30	40	0	∞
30-40	50	0	∞
40-50	60	0	∞
50-60	70	0	∞
60-70	80	0	∞
70-80	90	0	∞
80-90	100	0	∞
90-100	200	0	∞
100-110	300	0	∞
110-120	400	0	∞
120-130	500	0	∞



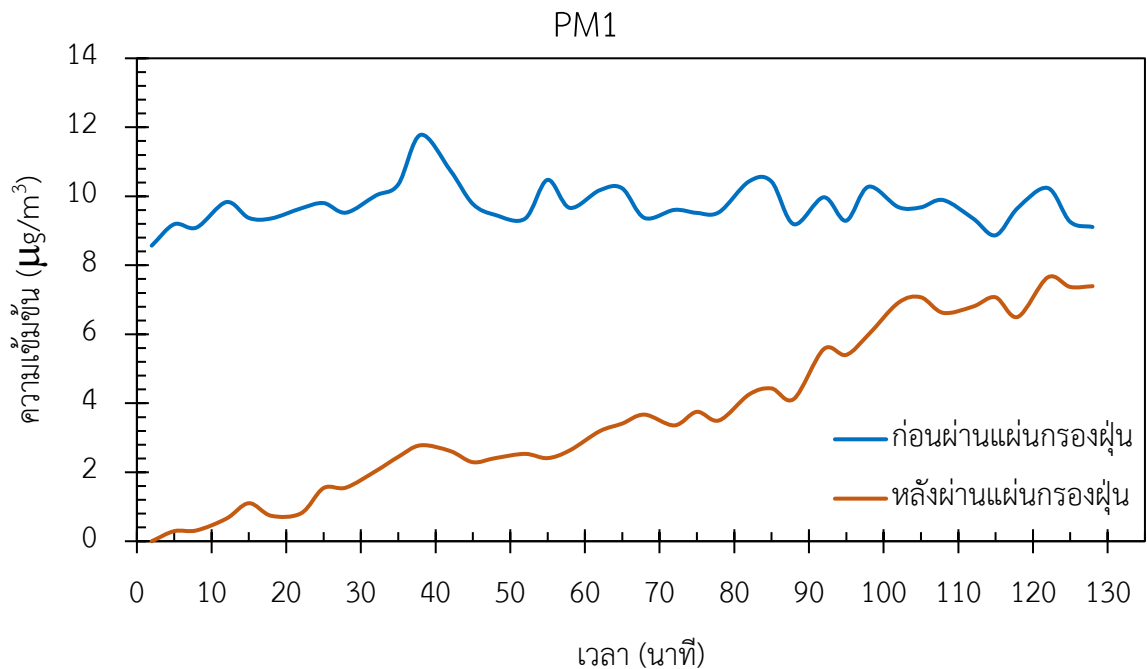
รูป 54 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



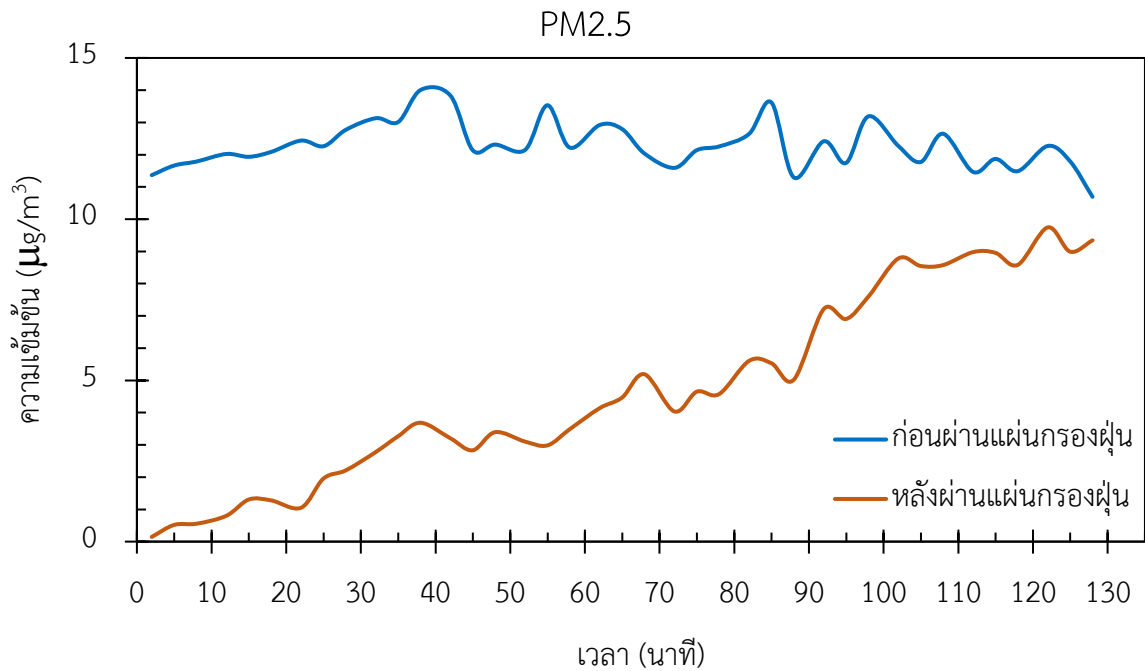
รูป 55 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



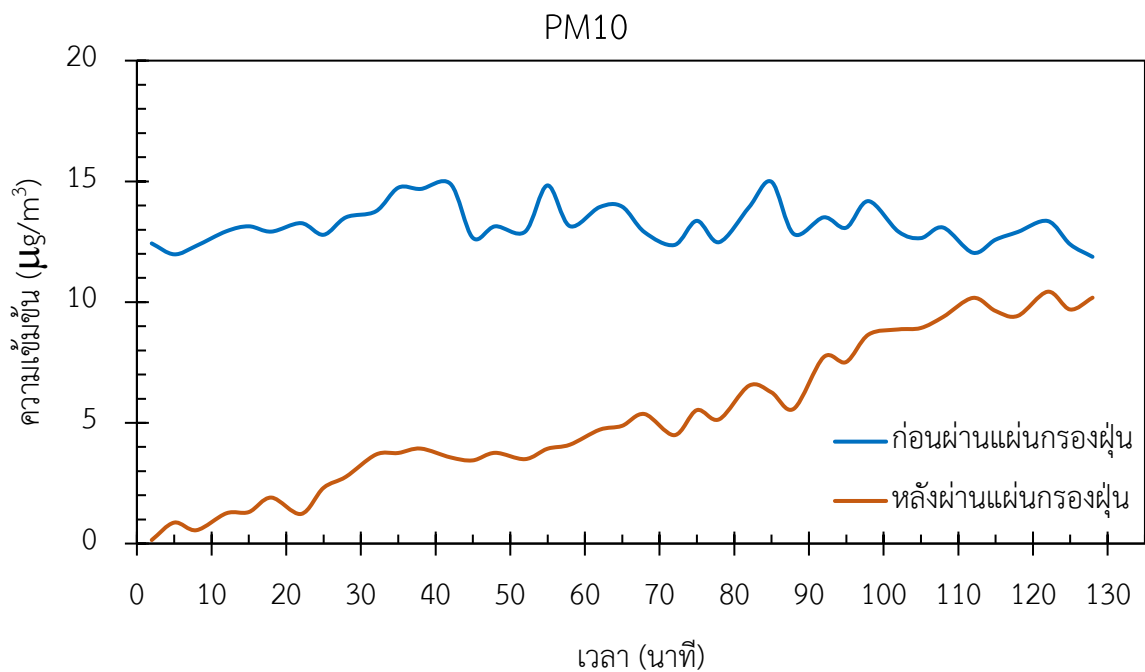
รูป 56 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโม่ โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



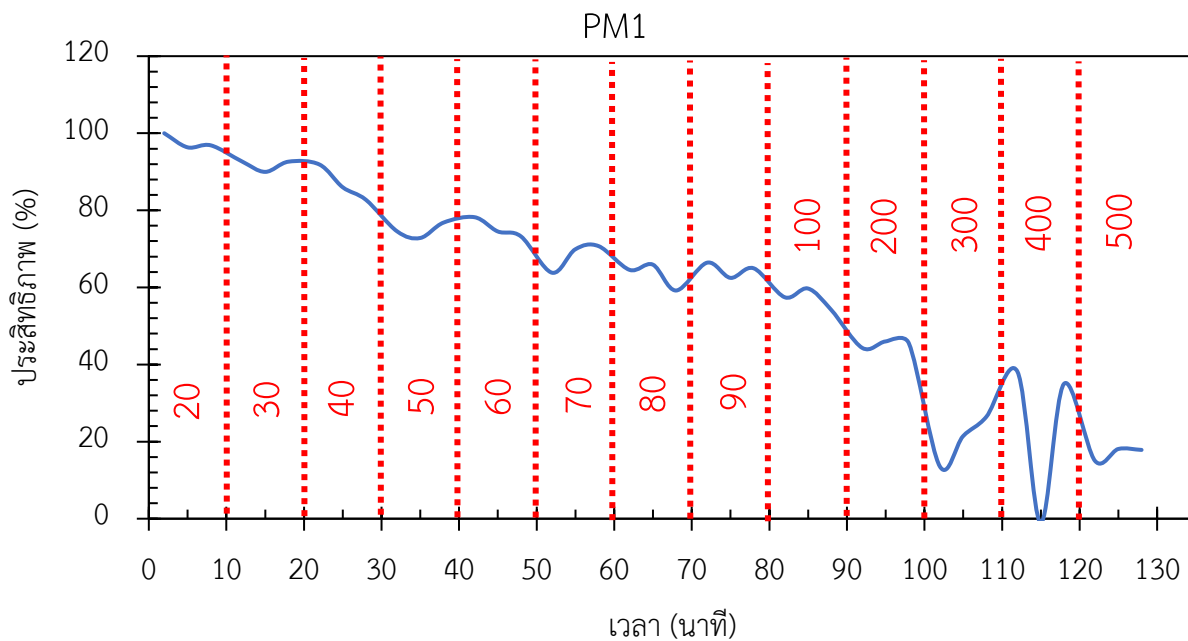
รูป 57 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโม่ โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



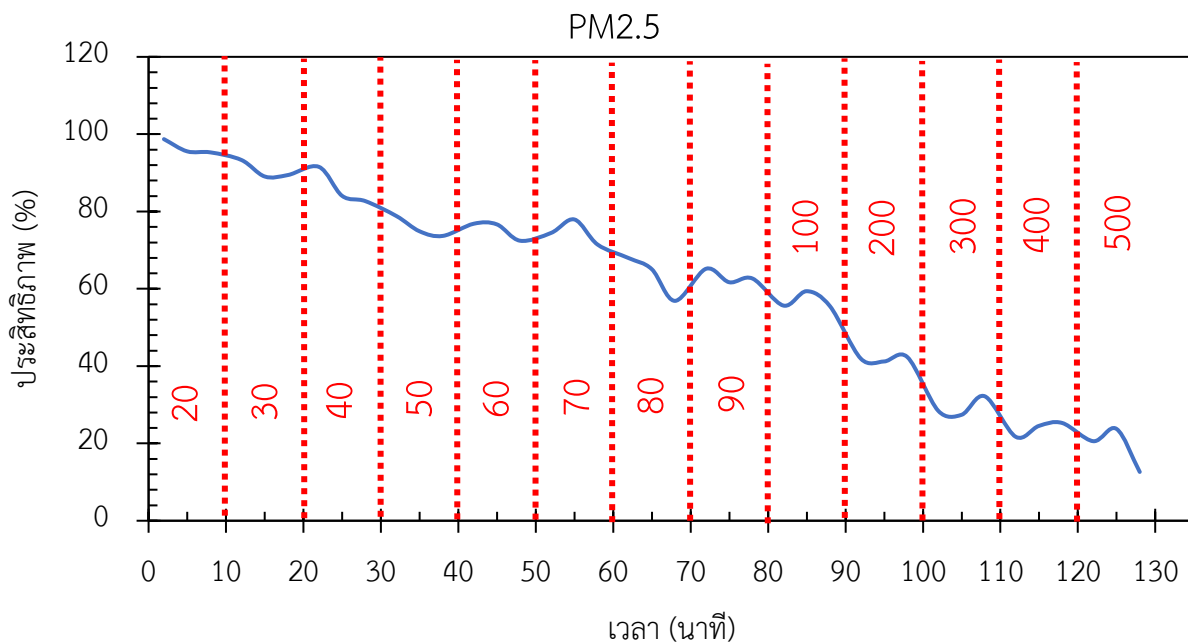
รูป 58 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



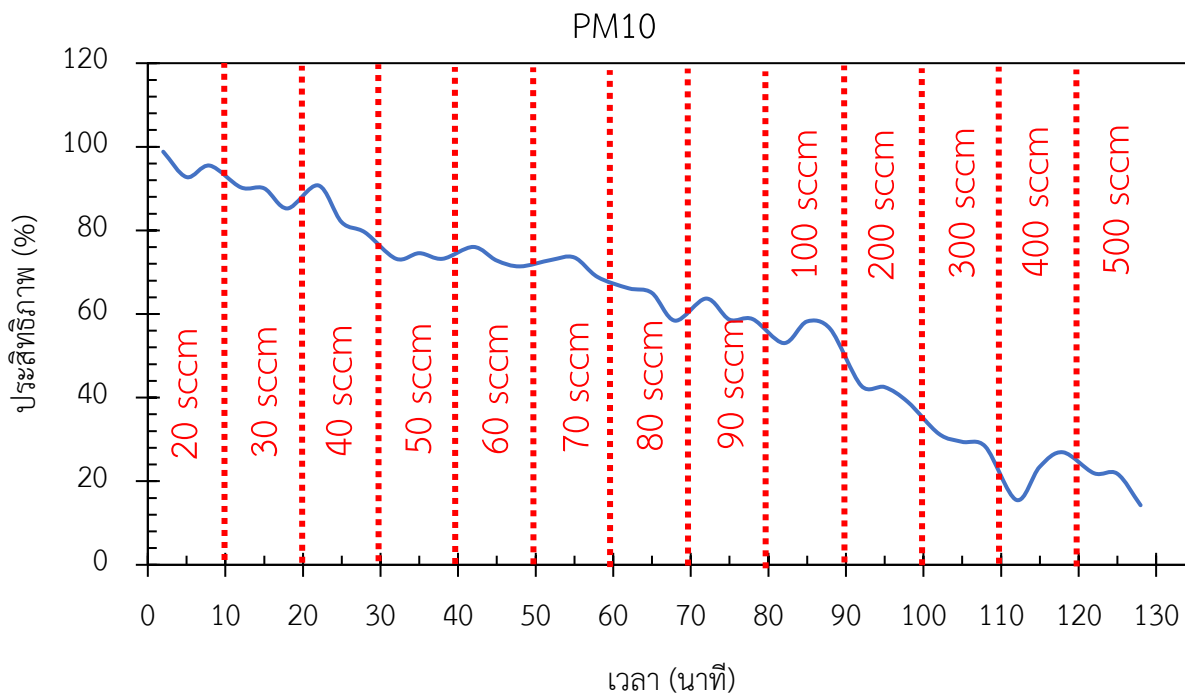
รูป 59 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



รูป 60 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM1 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิเมอร์ โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564



รูป 61 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM2.5 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิเมอร์ โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564

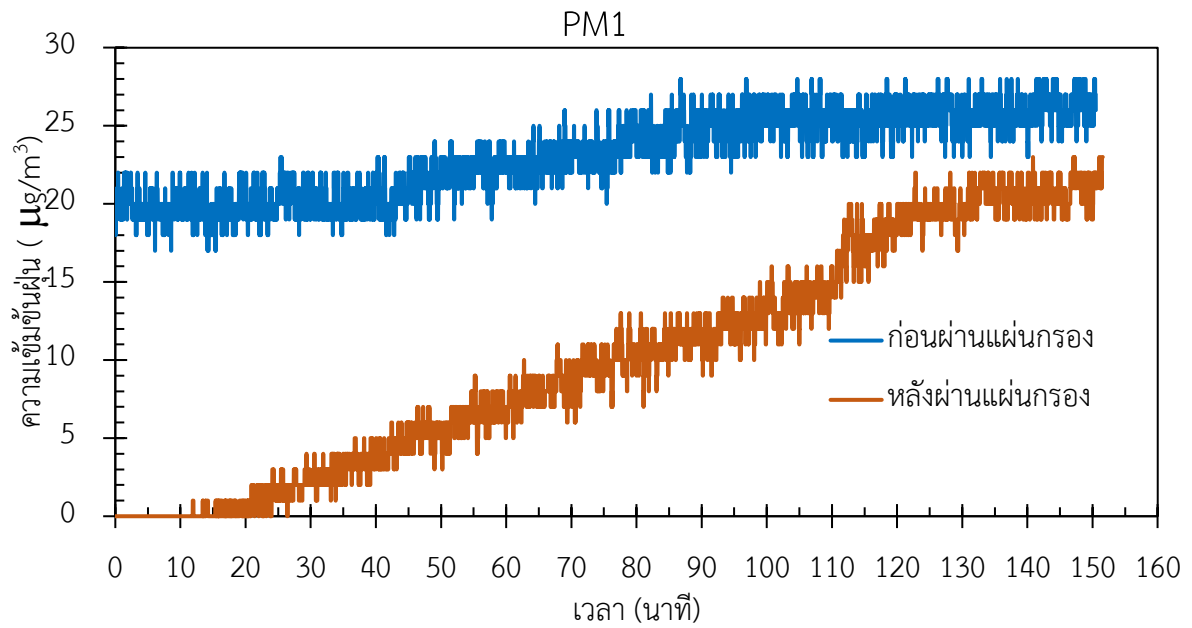


รูป 62 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM10 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร โดยทำการทดสอบในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564

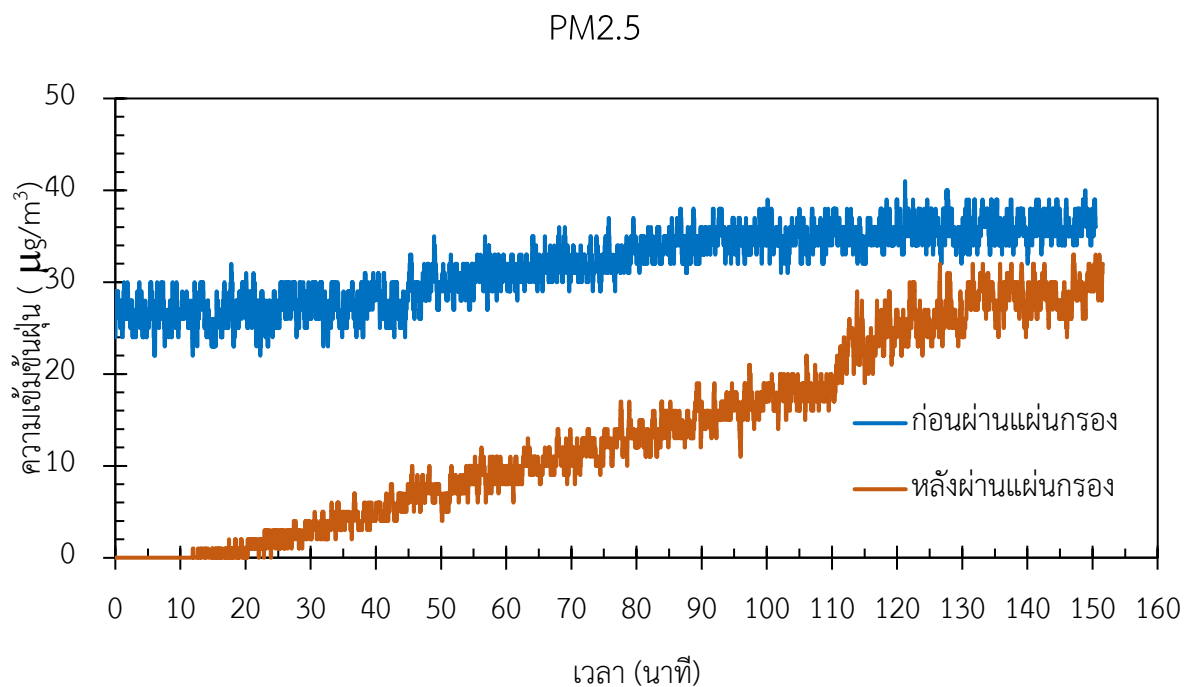
สำหรับการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565 ตาราง 12 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน, และค่าตัวประกอบคุณภาพ ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยค่าความดันที่แตกต่างกันมีค่าเป็น ศูนย์ ในทุกอัตราไหล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นกรองฝุ่นมีการระบายอากาศที่ดี ซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าเป็นอนันต์ รูป 63 ถึง รูป 65 แสดงข้อมูลดิบของความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร โดย รูป 66 ถึง รูป 68 แสดงข้อมูลโดยเฉลี่ยของความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพรสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ รูป 69 ถึง รูป 71 แสดงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพรที่ผ่านการกรองฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ตามลำดับ จากกราฟจะเป็นได้ว่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพรลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

ตาราง 12 แสดงอัตราการไหลของอากาศ, ความดันที่แตกต่างกัน (ระหว่างความดันอากาศภายนอกกับความดันอากาศในถ้วยแก้วหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟน์โพน) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565

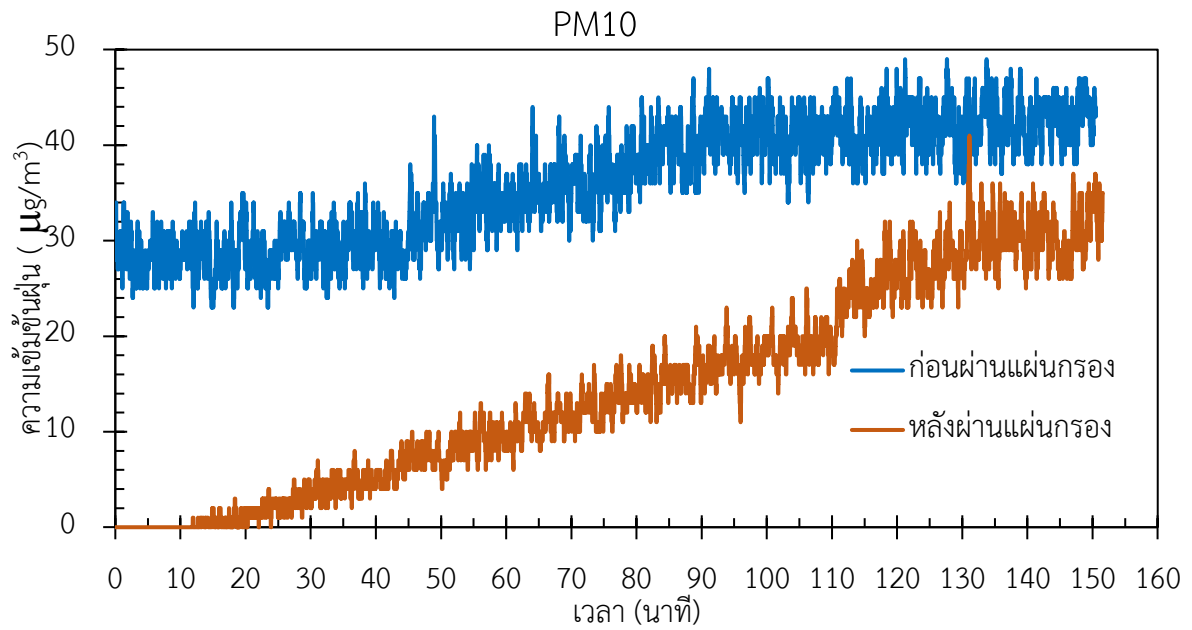
เวลาที่ (นาที)	อัตราไหล (sccm)	ความดัน (Pa)	Quality Factor
0-10	0	0	∞
10-20	10	0	∞
20-30	20	0	∞
30-40	30	0	∞
40-50	40	0	∞
50-60	50	0	∞
60-70	60	0	∞
70-80	70	0	∞
80-90	80	0	∞
90-100	90	0	∞
100-110	100	0	∞
110-120	200	0	∞
120-130	300	0	∞
130-140	400	0	∞
140-150	500	0	∞



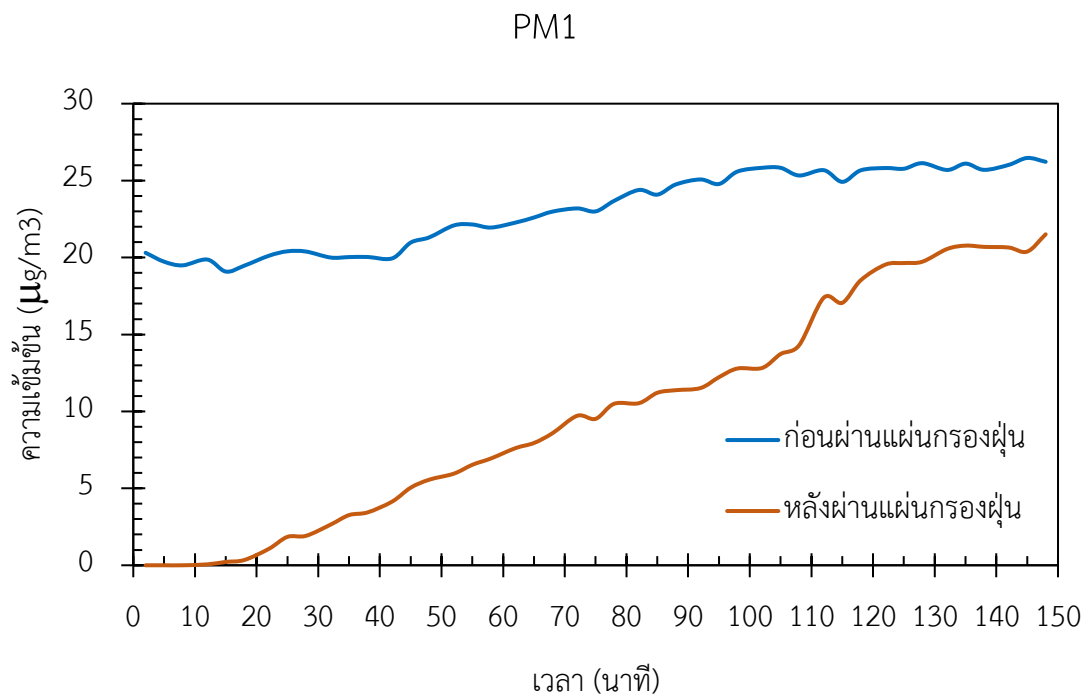
รูป 63 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565



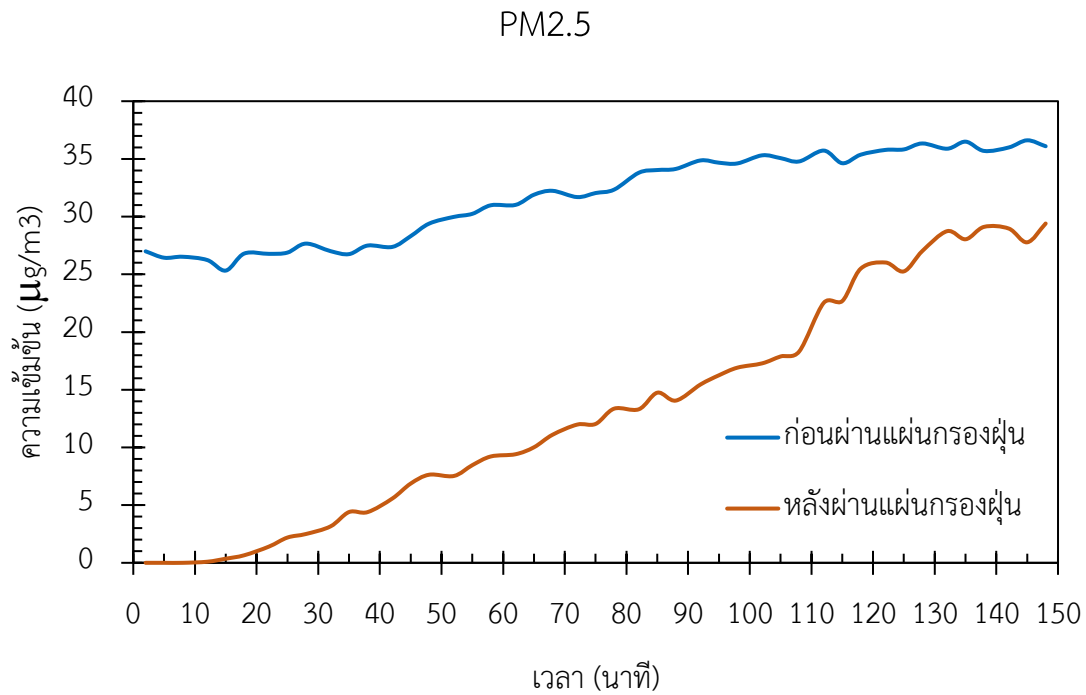
รูป 64 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพร โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565



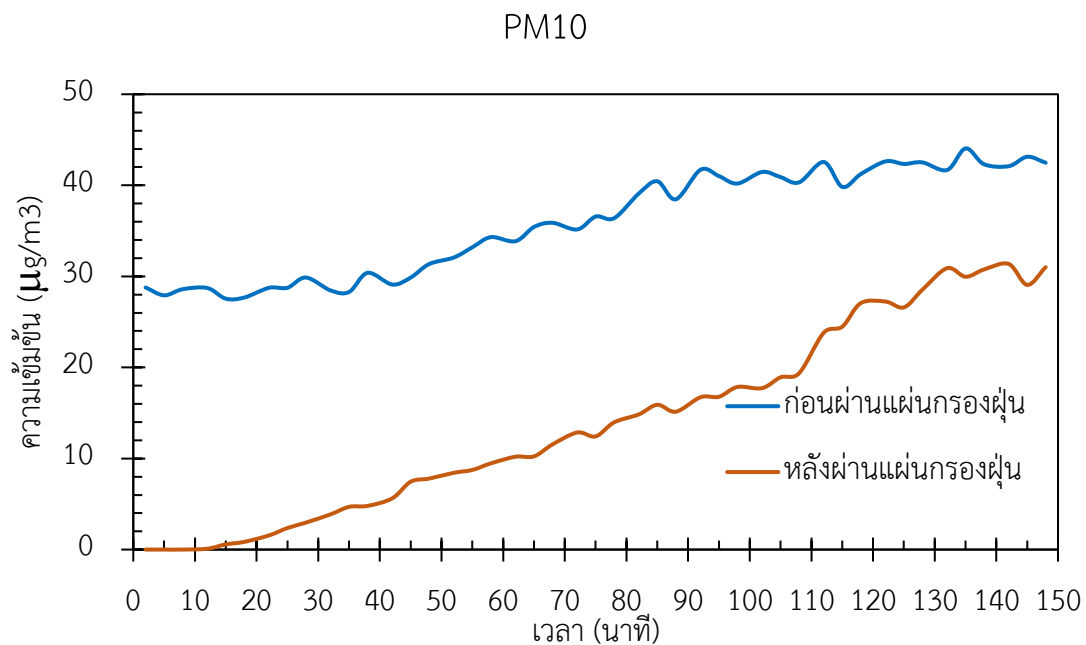
รูป 65 กราฟแสดงความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565



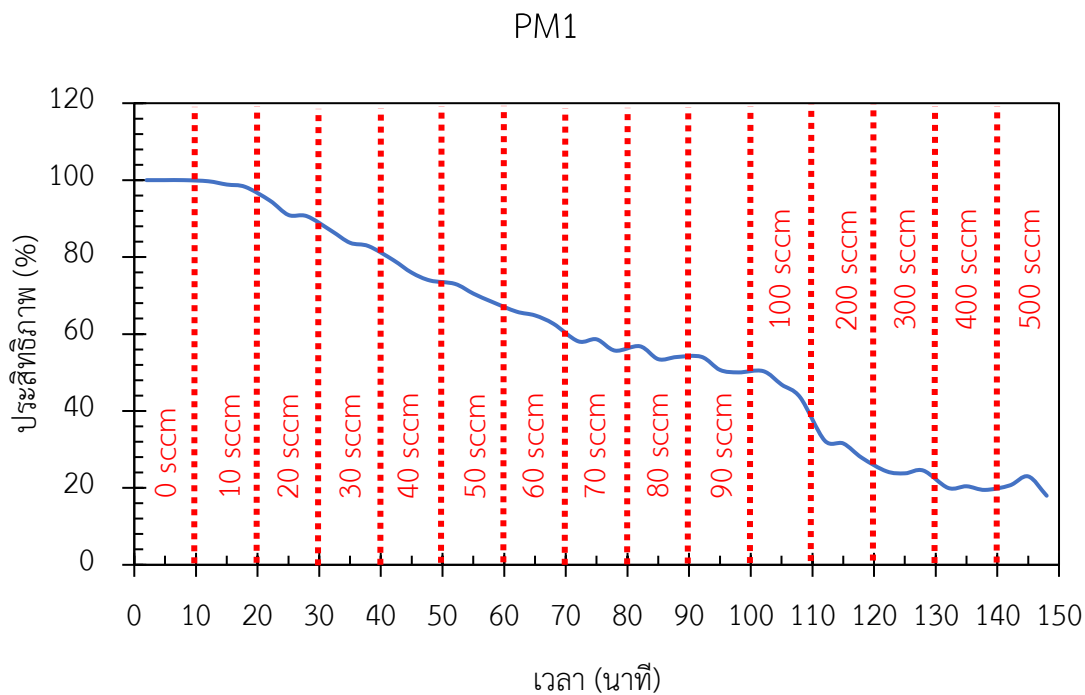
รูป 66 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 1 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565



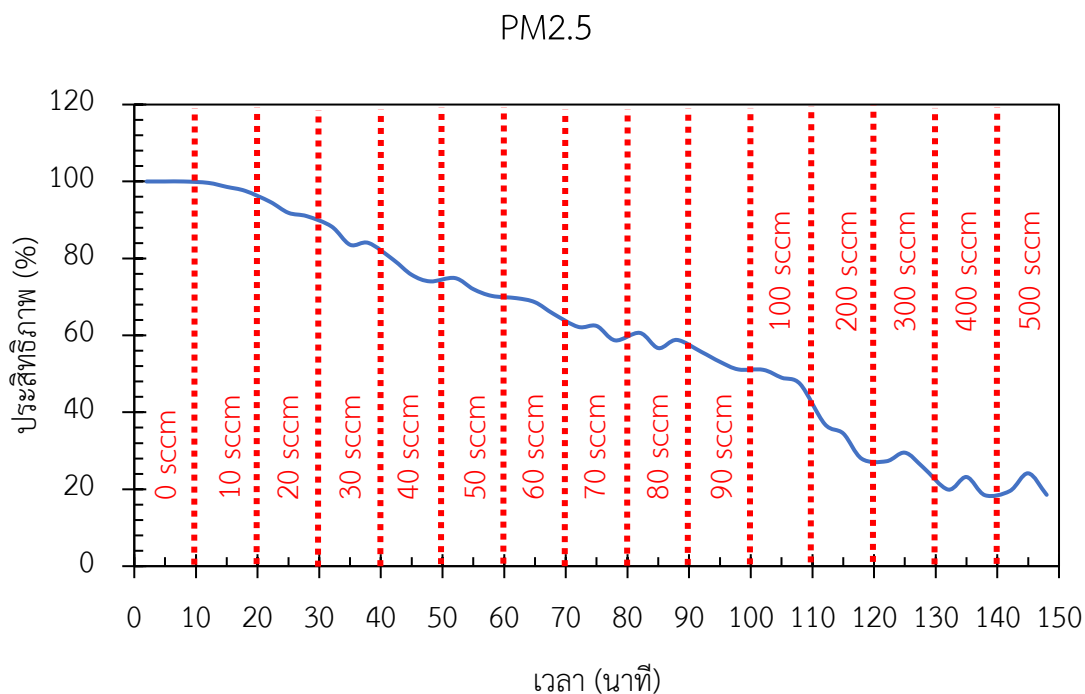
รูป 67 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 2.5 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565



รูป 68 กราฟแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นในอากาศขนาด PM 10 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีน้ำตาล) ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565

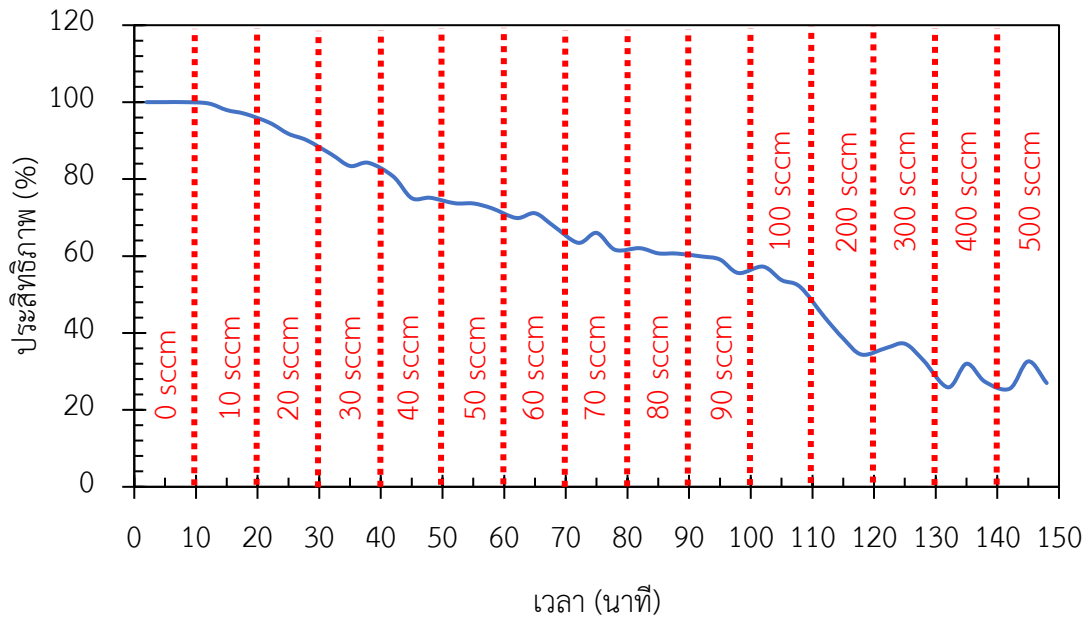


รูป 69 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM1 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิเมอร์ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565



รูป 70 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM2.5 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลิเมอร์ โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565

### PM10



รูป 71 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นในอากาศขนาด PM10 ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพรม โดยทำการทดสอบในวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565

ตาราง 13 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของการดักจับฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 sccm

ครั้งที่และวันที่ทำการทดสอบ	ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น (%)		
	PM1	PM2.5	PM10
ครั้งที่1 เมื่อวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2564	99.85	99.90	97.83
ครั้งที่2 เมื่อวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2564	74.73	75.79	73.65
ครั้งที่3 เมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2565	70.64	72.38	73.26
เฉลี่ย	81.74	82.69	81.58

ตาราง 13 แสดงค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 sccm โดยค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง นั้นอยู่ที่ 81.74%, 82.69% และ 81.58% สำหรับการดักจับฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ตามลำดับ

## 5.5 การกำจัดของเสียเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ )

ในกระบวนการสังเคราะห์แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีนั้นมีขั้นตอนที่ต้องละลายโลหะ निकิลในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เพื่อให้ได้แกรฟีนโพลีที่มีองค์ประกอบของเหล็กเพื่อเพิ่มแรงไฟฟ้าสถิตสำหรับดูดฝุ่น PM1 PM2.5 และ PM10 โดยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้แล้วถ้านำไปทิ้งจะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในแหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่ออย่างหนักกับระบบนิเวศในน้ำ โดยน้ำที่เจือปนสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์จะมีค่าความขุ่น ค่าความนำไฟฟ้า ค่าความนำเสียของน้ำ (chemical oxygen demand) และค่าความกระด้างของน้ำ เพิ่มขึ้น [8] ดังนั้นการนำสารละลายของเสียเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้แล้วจากกระบวนการดังกล่าวมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าและสามารถแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะเสนอการแปรรูปสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้แล้วเป็น 1.) แกรฟีนผงหุ้มโลหะสำหรับดักจับสิ่งเจือปนในน้ำ และ 2.) แกรฟีนผงคุณภาพสูง

### 5.5.1 การสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะสำหรับบำบัดน้ำเสีย

เพื่อให้ได้แกรฟีนโพลีที่มีประสิทธิภาพสูงในการกรองฝุ่น การจุ่มตัวอย่างแกรฟีนบน निकิลโพลีในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อละลายโลหะ निकิลโพลีและเพิ่มเหล็กในแกรฟีนโพลี จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้จะได้สารละลายของเสียที่มีส่วนผสมระหว่างเฟอร์ริกคลอไรด์และ निकิลคลอไรด์ซึ่งเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะแสดงการแปรรูปสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และ निकิลคลอไรด์ที่เป็นของเสียนี้ให้เป็นแกรฟีนผงหุ้มโลหะประสิทธิภาพสูง ต้นทุนประหยัด สำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ปริมาณ 80 กรัม ในน้ำ 200 มิลลิลิตร

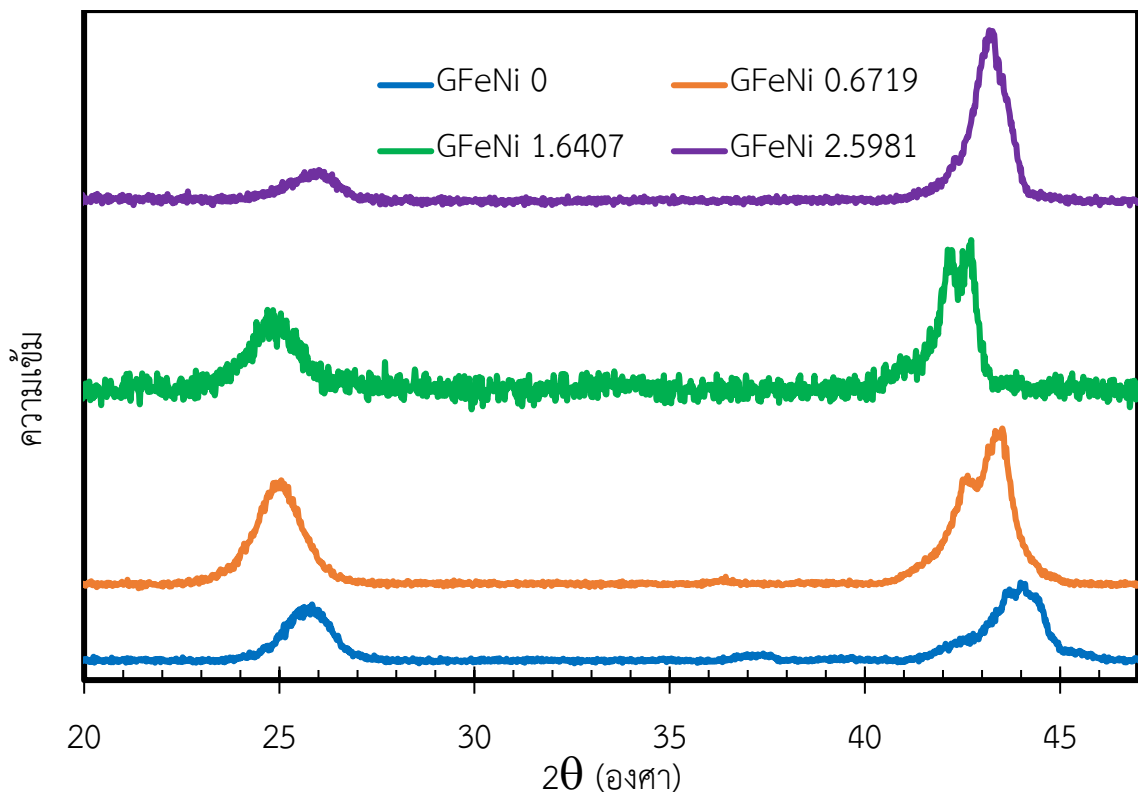
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแผ่นแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ แล้วจึงนำตัวอย่างแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์มาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อละลายโลหะนิกเกิลออกนาน 1 วัน
  3. ล้างแกรฟีนโพลีเมอร์ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water: DI) และตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำแกรฟีนโพลีเมอร์ที่ได้ไปชั่งเพื่อหาค่ามวลนิกเกิลที่ละลายอยู่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์
  4. นำของเสียสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำตาลทราย 2 กรัม คนให้เข้ากันและนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน
  5. นำตัวอย่างที่ผ่านการอบไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของอาร์กอน นาน 6 ชั่วโมง
- ทีมวิจัยได้ทดลองละลายแผ่นตัวอย่างแกรฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์ทั้งหมด 3 แผ่น โดยได้ตั้งชื่อตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง เป็น GFeNi และตามด้วยมวลนิกเกิลที่ผสมในสารละลาย ดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 14 แสดงปริมาณนิกเกิลในแต่ละตัวอย่าง

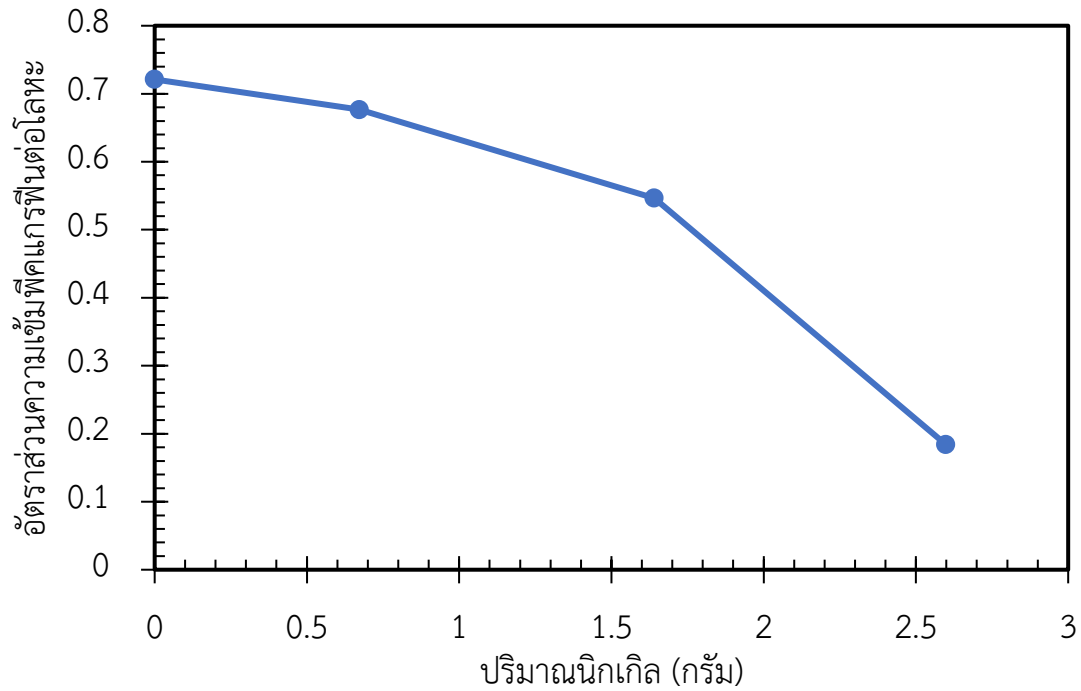
ชื่อตัวอย่าง	มวลของนิกเกิลที่ใส่เพิ่ม (กรัม)	มวลนิกเกิลทั้งหมดในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (กรัม)
GFeNi 0	0	0
GFeNi 0.6719	0.6719	0.6719
GFeNi 1.6407	0.9688	1.6407
GFeNi 2.5981	0.9574	2.5981

นอกจากนี้ทีมวิจัยได้นำตัวอย่างแกรฟีนโพลีเมอร์ผงหุ้มโลหะไปทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูป 72 โดยทั่วไปแกรฟีนจะมีพีคเฉพาะอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 26 องศา ส่วนพีคของเหล็กและนิกเกิลจะอยู่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 44 องศา จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่ามีการพินเกิดขึ้นทุกตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อลองวิเคราะห์อัตราส่วนความเข้มของพีคแกรฟีนต่อพีคโลหะพบว่ามีการลดลงเมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 73 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณแกรฟีนเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อผ่านการละลายนิกเกิลมากขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจจะเกิดจากการระเหยของน้ำในสารละลายเนื่องจากกระบวนการละลายนิกเกิลโพลีเมอร์และกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะแต่ละครั้งใช้เวลาหลายวัน แม้ว่าสารละลายจะถูกปิดฝาด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แต่สารละลายก็ยังระเหยได้ ประกอบกับการละลายตัวอย่างแต่ละครั้งก็มีการนำติดออกไปกับตัวอย่างด้วย การเสียน้ำของสารละลายทำให้

สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนที่ได้จากน้ำตาลทรายยังคงเป็น 2 กรัมเท่าเดิม ด้วยเหตุนี้เมื่อทำการสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะจึงได้อัตราส่วนของแกรฟีนต่อโลหะที่ลดลง

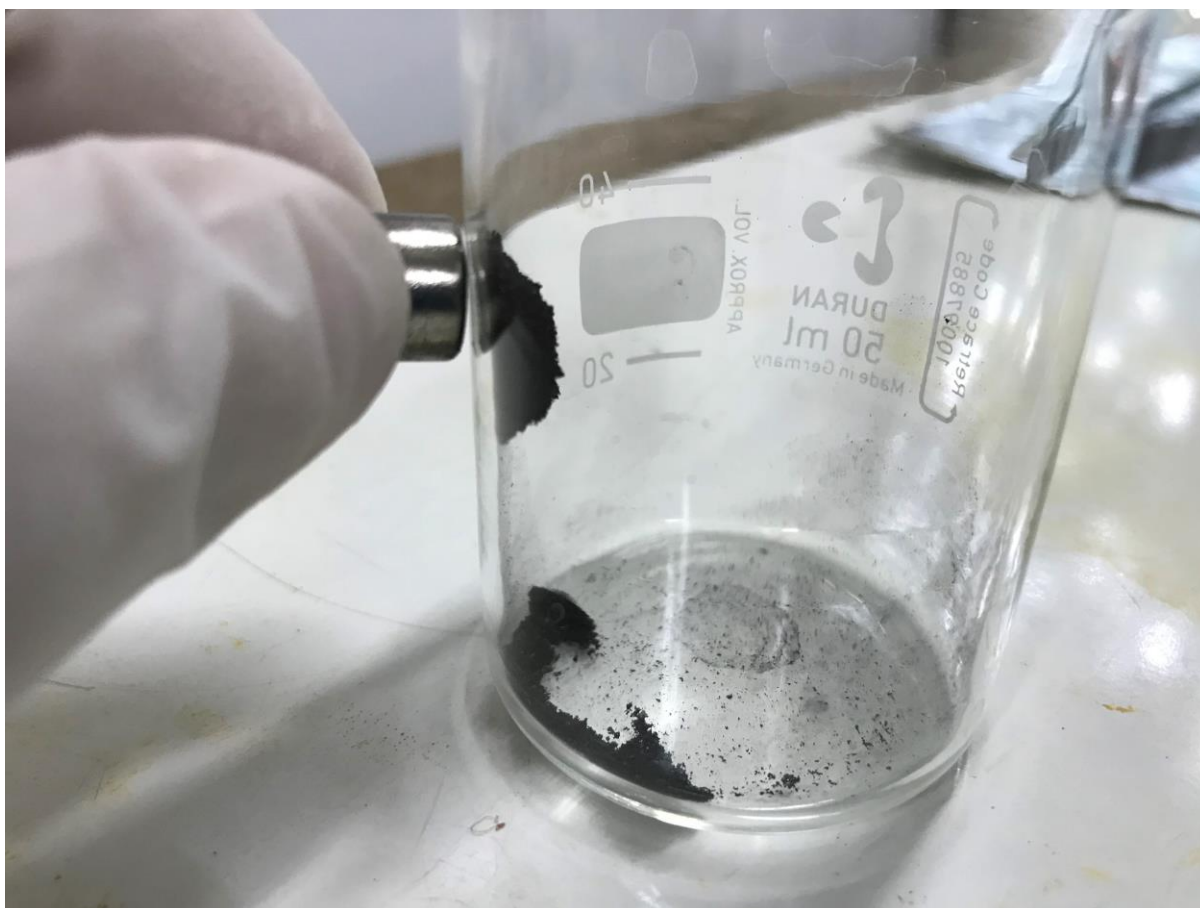


รูป 72 XRD pattern ที่วัดบนตัวอย่างแกรฟีนผงหุ้มโลหะที่ได้จากกระบวนการแปรรูปสารละลายของเสียเฟอร์ริคคลอไรด์และนิกเกิลคลอไรด์



รูป 73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลในสารละลายและอัตราส่วนของแกรฟีนและโลหะ

แกรฟีนผงหุ้มโลหะมีความพิเศษที่นอกจากจะเป็นแกรฟีนผงที่สังเคราะห์ง่าย ต้นทุนประหยัด และสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณที่มากแล้ว แกรฟีนผงหุ้มโลหะนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กที่สามารถดูดติดกับแม่เหล็กได้อีกด้วย ดังแสดงในรูป 74 เนื่องจากในตัวอย่างแกรฟีนผงนี้มีโลหะเหล็กและนิกเกิลซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก

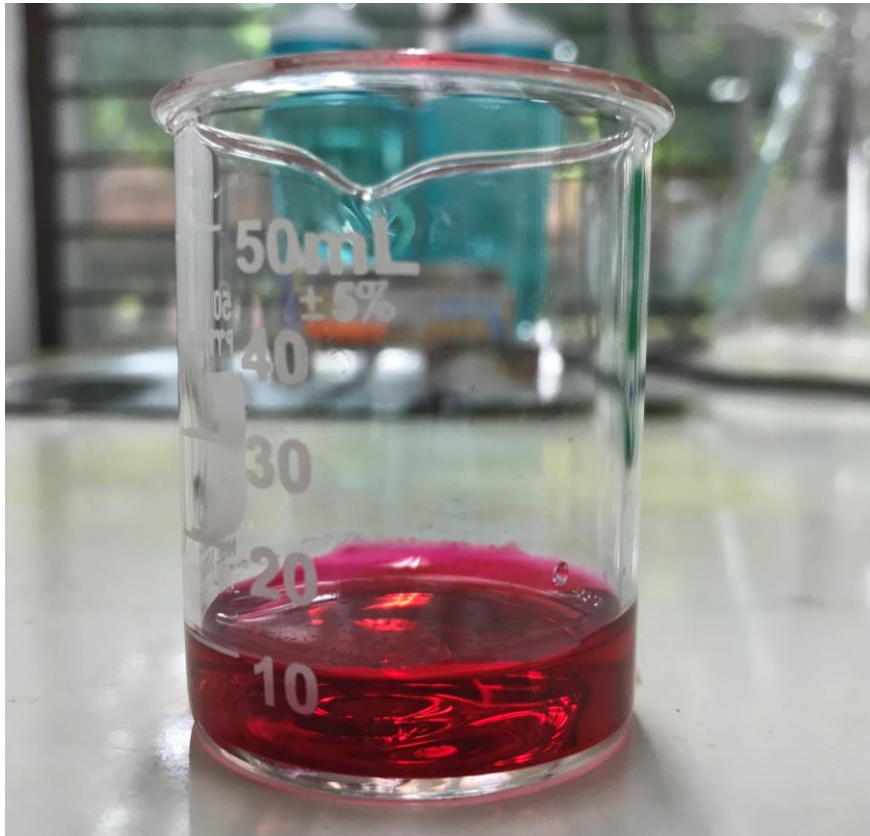


รูป 74 แกรฟีนผงหุ้มโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก

ทีมวิจัยได้ทดลองใช้สาร Fuchsin เป็นตัวอย่างสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยทีมวิจัยได้ละลาย Fuchsin จำนวน 0.0012 กรัม ในน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยสารละลาย Fuchsin จะมีลักษณะเป็นสีแดง ดังแสดงใน รูป 75 แล้วนำแกรฟีนผงหุ้มโลหะตัวอย่าง GFeNi 1.6407 จำนวน 0.1779 กรัม ใส่ในสารละลาย Fuchsin แล้วทำการเขย่าเพื่อให้แกรฟีนได้ดูดซับสาร Fuchsin หลังจากการเขย่าทีมวิจัยได้ใช้แม่เหล็กดูดแกรฟีนผง แล้วพบว่า สารละลายมีลักษณะใสขึ้น ดังแสดงในรูป 76 จุดเด่นของแกรฟีนผงหุ้มโลหะนี้คือสามารถบำบัดน้ำได้และเมื่อบำบัดน้ำเสร็จแล้วสามารถใช้แม่เหล็กดูดแกรฟีนผงนี้ได้โดยไม่ต้องนำน้ำไปกรอง ซึ่งจะช่วยลดเวลาและต้นทุนในการบำบัดน้ำได้

สำหรับกลไกการดักจับสิ่งปนเปื้อนของแกรฟีนอาจจะเหมือนกันกับกลไกการดักจับสิ่งปนเปื้อนของคาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon) เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนเหมือนกัน โดยในปัจจุบันคาร์บอนกัมมันต์นั้นได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้เป็นตัวดูดซับสิ่งปนเปื้อน โดยกลไกการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์และแกรฟีนนั้นอาจจะมาจากแรงดึงดูดอันเนื่องจากแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals) และ

แรงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของไดโพล (induced dipole interaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำกับคาร์บอนในแกรไฟท์หรือคาร์บอนกัมมันต์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แกรไฟท์สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้



รูป 75 สารละลาย Fuchsin มีลักษณะเป็นสีแดง ปริมาณ 10 มิลลิลิตร



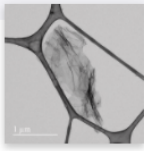
รูป 76 สารละลายที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำโดยแกรฟีนผงหุ้มโลหะ

#### 5.5.2 การสังเคราะห์แกรฟีนผงคุณภาพสูง ราคาประหยัด

ปัจจุบันแกรฟีนผงเป็นวัสดุที่มีราคาสูงมากโดยราคาแกรฟีนผง 500 มิลลิกรัม นั้น อยู่ที่ 13300 บาท (544 SGD × 24.45 บาท) (อ้างอิงราคาจากเว็บไซต์ sigmaaldrich.com ดังแสดงใน รูป 77) การที่แกรฟีนผงมีราคาสูงนั้นเป็นเพราะกระบวนการทั่วไปสำหรับผลิตแกรฟีนผงนั้นนิยมใช้วิธี Hummers เพื่อให้ได้ผงแกรฟีนออกไซด์หลังจากนั้นจึงใช้วิธี reduction of graphene oxide เพื่อกำจัดออกไซด์ออกจากแกรฟีนผง โดยวิธีดังกล่าวนี้ ยุ่งยาก ใช้เวลานาน และได้ปริมาณน้อยในการผลิตแต่ละครั้ง และยังได้แกรฟีนที่มีความบริสุทธิ์น้อย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเสนอการสังเคราะห์แกรฟีนผงด้วยเทคนิคที่แตกต่างจากวิธีดั้งเดิม ซึ่งจะได้แกรฟีนผงที่ต้นทุนประหยัด คุณภาพสูง และสามารถผลิตในปริมาณมากซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม ยิ่งไปกว่านั้นแกรฟีนผงนี้ยังทำจากขยะของเสียอีกด้วย โดยทีมวิจัยจะทำการทดลองแปรรูปผลผลิตแกรฟีนผงหุ้มโลหะให้เป็นแกรฟีนผงบริสุทธิ์โดยการแช่ในกรดไฮโดรคลอริกเพื่อละลายโลหะในตัวอย่างออก โดยทีมวิจัยได้ทดลองละลายโลหะของตัวอย่าง GFeNi 1.6407 โดยใช้วิธีการดังนี้

1. เตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 M จำนวน 20 มิลลิลิตร
2. ใส่ตัวอย่าง GFeNi 1.6407 จำนวน 0.3114 กรัม ในกรดไฮโดรคลอริกแล้วทำการคนนาน 3 ชั่วโมง
3. กรองแกรฟีนผงจากสารละลาย และทำการล้างแกรฟีนผงด้วยน้ำ DI จะมีค่า PH เป็นกลาง แล้วตากแกรฟีนผงให้แห้ง

รูป 78 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง GFeNi 1.6407 ก่อนและหลังกระบวนการละลายโลหะ โดยพีคที่ตำแหน่งประมาณ 26 องศา จะเป็นพีคเฉพาะของแกรฟีน และพีคที่ตำแหน่งประมาณ 44 องศาจะเป็นพีคของโลหะ (เหล็กและนิกเกิล) จากรูป 78 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการละลายโลหะโดยการแช่ในกรดไฮโดรคลอริกจะมีความเข้มของพีคโลหะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มของพีคแกรฟีน แต่อย่างไรก็ตาม รูป 78 แสดงให้ทราบว่ายังมีโลหะหลงเหลืออยู่ในแกรฟีนผง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นและปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้และเวลาที่ใช้สำหรับละลายโลหะจากตัวอย่างนั้นยังน้อยเกินไป



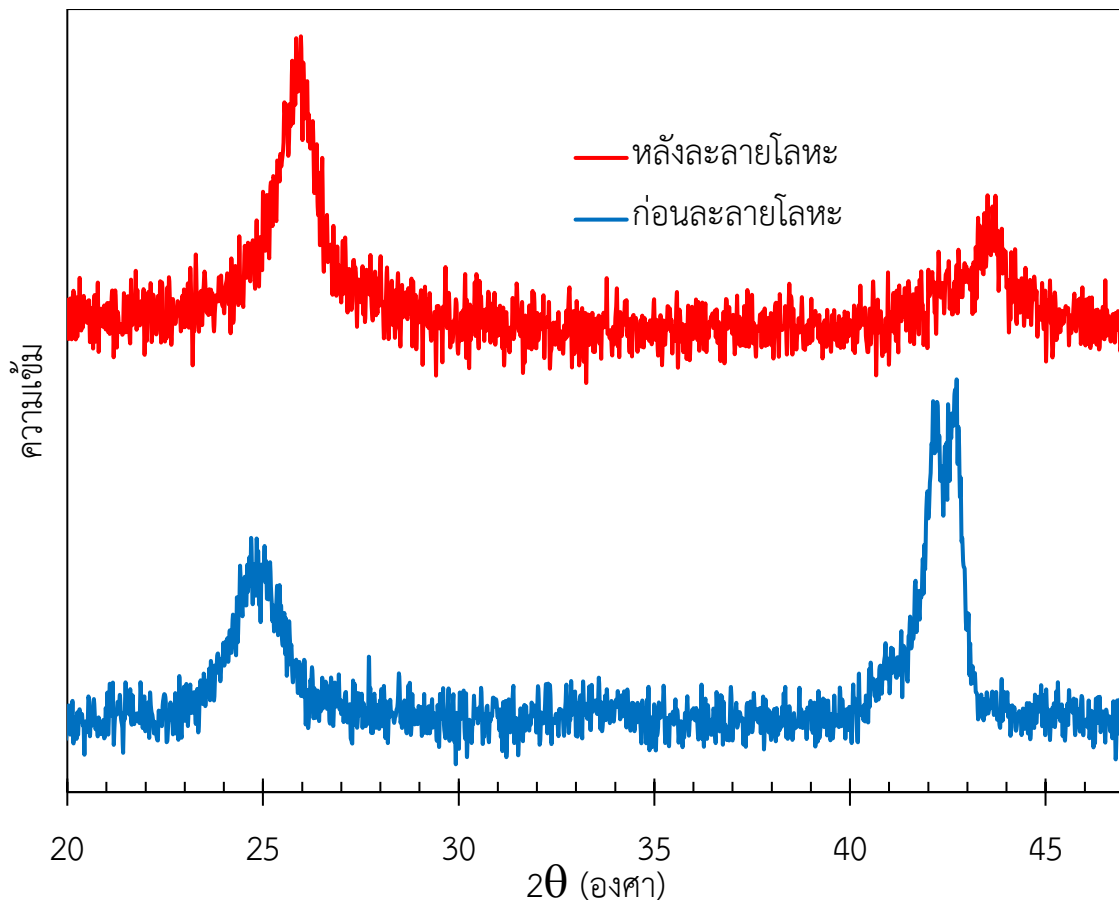
**Graphene**  
CAS Number:  
1034343-98-0

Product Number	Product Description	SDS
<input type="checkbox"/> 900561	powder, electrical conductivity >10 <sup>3</sup> S/m	<a href="#">↓</a> Pricing <a href="#">×</a>

SKU	Pack Size	Availability	Price	Quantity
900561-500MG	500 MG	<input checked="" type="checkbox"/> Estimated to ship on July 19, 2021 - <b>FROM</b>	SGD 544.00	<input type="text" value=""/> <input type="button" value="-"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="i"/>

[Request a Bulk Order](#)

รูป 77 ราคาแกรฟีนผงที่เสนอขายในเว็บไซต์ของ sigmaaldrich.com



รูป 78 XRD pattern ของแกรไฟีนผงหุ้มโลหะตัวอย่าง GFeNi 1.6407 ก่อน (สีน้ำเงิน) และหลัง (สีแดง) การละลายโลหะเพื่อให้ได้แกรไฟีนผง

## 6 อภิปรายและวิจารณ์ผล

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการปลูกแกรไฟีนบนนิกเกิลโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปริมาณคาร์บอนมีผลต่อการปลูกแกรไฟีน ดังแสดงใน รูป 15, รูป 17, รูป 19 และ รูป 21 ด้วยเหตุนี้ความสะอาดของขยะพลาสติกจะส่งผลต่อคุณภาพของแกรไฟีน กล่าวคือถ้าใช้ขยะพลาสติกที่มีคาร์บอนอื่นๆปนเปื้อนเช่น ขยะถุงพลาสติกที่ใส่อาหารที่อาจจะมีการปนเปื้อนของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่ใช้ในการประกอบอาหาร หรือในกรณีที่ใช้ขยะพลาสติกขวดน้ำมันพืชก็จะมีคาร์บอนจากน้ำมันพืชที่เหลือในขวด หรือใช้ขยะขวดพลาสติกบรรจุน้ำมันเครื่องก็จะมีคาร์บอนจากน้ำมันเครื่องที่เหลือในขวด ซึ่งคาร์บอนที่ปนเปื้อนมากับขยะพลาสติกเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพของแกรไฟีน ดังนั้นขยะพลาสติกที่ใช้ในการปลูกแกรไฟีนจำเป็นต้องสะอาดเพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณคาร์บอนในการปลูกแกรไฟีนได้ ด้วยเหตุนี้โครงการวิจัยจึง

เลือกใช้ขั้วพลาสติกชนิด หลอดดูดน้ำ และ ขวดพลาสติกใส่น้ำ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่ปนเปื้อนน้อย และทำความสะอาดได้ง่าย จึงทำให้ง่ายต่อการควบคุมปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในการปลูกแกรฟีนได้ง่าย

ในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นนิกเกิลโฟมหนา 2 มิลลิเมตร เป็นโลหะเร่งปฏิกิริยาการเกิดแกรฟีนโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี โดยหลังจากการกระบวนการดังกล่าวจะได้แกรฟีนเคลือบบนนิกเกิลโฟม และเมื่อนำตัวอย่างแกรฟีนบนนิกเกิลโฟมไปแช่ในสารละลาย  $FeCl_3$  จะได้แผ่นแกรฟีนโฟมที่มีความหนาประมาณ 1.6 มิลลิเมตร โดยเหตุผลที่ทีมวิจัยเลือกใช้แผ่นแกรฟีนโฟมที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร คือ เพื่อศึกษาขีดจำกัดการดักจับฝุ่น  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{1}$  ของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม เนื่องจากถ้าแผ่นแกรฟีนโฟมบางกว่านี้จะทำให้ขาดง่ายและยากต่อการหยิบจับและนำไปประกอบเพื่อใช้งานจริง และถ้าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมมีประสิทธิภาพการกรองฝุ่นน้อยก็ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกรองฝุ่นได้โดยการเพิ่มความหนาของแกรฟีนโฟมหรือเพิ่มจำนวนแผ่นของแกรฟีนโฟมก็ได้เนื่องจากแผ่นแกรฟีนโฟมความหนา 1.6 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าความพรุนสูงมากถึง 96.6% ดังนั้นถึงแม้จะเพิ่มความหนาของแกรฟีนโฟมหรือนำแกรฟีนโฟมมาซ้อนทับกันให้หนาขึ้น น้ำหนักของแกรฟีนโฟมก็ยังคงเบามากและยังคงระบายอากาศได้ดีเยี่ยม

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม ทีมวิจัยพบว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนสามารถดักจับฝุ่นชนิด  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  และ  $PM_1$  ได้ โดยการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพการกรองฝุ่นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นและความเร็วของฝุ่นที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟม กล่าวคือถ้าความเข้มข้นและความเร็วของฝุ่นที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมนั้นยังอยู่ในระดับที่ดี (ดังแสดงในตาราง 13) และเนื่องด้วยแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมนั้นมีความสามารถในการระบายอากาศได้ดีเยี่ยม (pressure drop เข้าใกล้ 0) ดังนั้นแกรฟีนโฟมจึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นกรองฝุ่น  $PM_{2.5}$  ที่ติดกับท่อไอเสียรถยนต์ โดยในปัจจุบันประเทศไทยเกือบทั้งประเทศใช้ยานพาหนะท่อใช้น้ำมันซึ่งปลดปล่อยฝุ่น  $PM_{2.5}$  ในปริมาณมาก แม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่หลายๆประเทศกำลังมุ่งพัฒนาจะสามารถลดการปล่อยฝุ่น  $PM_{2.5}$  ในอากาศได้ แต่เนื่องด้วยราคายานยนต์ไฟฟ้าที่ยังคงสูงมาก ประกอบกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยยังไม่เอื้อต่อการใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการที่ยานยนต์ไฟฟ้าจะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทยอาจต้องใช้เวลาอีกมากกว่า 10 ปี ดังนั้นคนไทยอาจจะต้องทนกับปัญหาฝุ่น  $PM_{2.5}$  อีกนาน ด้วยเหตุนี้ถ้านำแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น  $PM_{2.5}$  จากท่อไอเสียยานพาหนะท่อใช้น้ำมัน ก็จะสามารถลดการปล่อยฝุ่น  $PM_{2.5}$  ลงได้

นอกจากนี้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโฟมยังเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากกันฝุ่น  $PM_{2.5}$  สำหรับนักกีฬา แม้ว่าปัจจุบันจะมีหน้ากากกันฝุ่นออกมาจำหน่ายมากมาย แต่ยังไม่มียี่ห้อหน้ากากกันฝุ่น  $PM_{2.5}$  สำหรับ

นักกีฬา เนื่องจากการออกกำลังกายนั้นทำให้ร่างกายต้องการออกซิเจนมากกว่าปกติ ดังนั้นหน้ากากสำหรับนักกีฬาจึงจำเป็นต้องระบายอากาศได้ดีเยี่ยม แกร์ฟีนโพลีเมอร์เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงมากที่สามารถระบายอากาศได้ดีเยี่ยมดังนั้น แผ่นกรองฝุ่นแกร์ฟีนโพลีเมอร์จึงเหมาะสำหรับพัฒนาเป็นหน้ากากกันฝุ่นสำหรับนักศึกษาด้วย

สำหรับการกำจัดของเสีย  $FeCl_3$  ซึ่งเกิดขึ้นจากขั้นตอนการละลายโลหะ निकเกิดเพื่อให้ได้แกร์ฟีนโพลีเมอร์ ทีมวิจัยได้ทำการเพิ่มมูลค่ากากของเสียโดยการแปรรูปเสีย  $FeCl_3$  เป็นแกร์ฟีนผงหุ้มโลหะและแกร์ฟีนผงคุณภาพสูงต้นทุนประหยัด โดยราคาต้นทุนในการผลิตแกร์ฟีนผงหุ้มโลหะและแกร์ฟีนผงในห้องปฏิบัติการคือ 32.4 บาทต่อกรัม และ 86.05 บาทต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงใน ตาราง 15 จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันยังไม่มีการขายแกร์ฟีนผงหุ้มโลหะ แต่มีการขายผงผสมระหว่างแกร์ฟีนออกไซด์กับ  $Fe_3O_4$  ซึ่งจำหน่ายผ่านทางเว็บไซต์ของ aliexpress ในราคากรัมละ 28,414 บาท ( $\$848.19 \times 33.5$  บาท) ดังแสดงใน รูป 79 นอกจากนี้ยังมีการขายแกร์ฟีนผงซึ่งราคาขายของแกร์ฟีนผงนั้นอยู่ที่ 26,600 บาทต่อกรัม (รูป 77) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนที่โครงการวิจัยนี้ผลิตได้พบว่าโครงการวิจัยนี้สามารถผลิตแกร์ฟีนผงได้ในต้นทุนที่ต่ำมากเพราะโครงการวิจัยนี้ผลิตแกร์ฟีนผงจากกากของเสียและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียอีกด้วย นอกจากนี้แกร์ฟีนผงหุ้มโลหะยังมีคุณสมบัติติดติดกับแม่เหล็กได้ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มมูลค่าให้แก่แกร์ฟีนผงอีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองสังเคราะห์แกร์ฟีนผงจากกากของเสีย  $FeCl_3$  เบื้องต้นพบว่าแม้จะทำการละลายโลหะของแกร์ฟีนผงหุ้มโลหะจำนวน 0.3114 กรัม ออกโดยการแช่ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 M จำนวน 20 มิลลิลิตร และทำการคนนาน 3 ชั่วโมง แต่เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยวิธีการลิ้นเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (รูป 78) พบว่ายังมีโลหะหลงเหลืออยู่ ซึ่งทำให้ทราบว่าความเข้มข้นและปริมาณของกรด HCl และเวลาที่ใช้ในการคนยังน้อยเกินไปสำหรับการกำจัดโลหะ ดังนั้นการศึกษาต่อยอดเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเข้มข้นและปริมาณของกรด HCl และเวลา จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  ให้เป็นแกร์ฟีนผงมูลค่าสูง



Fe3O4 Magnetic graphene



99% Purity graphene oxide ferrous oxide magnetic composites material nanoparticle Fe3O4 magnetic graphene powder

US \$848.19 ~~US \$932.08~~ -9%

After discounts: **US \$838.19**

US \$5.00 off on US \$100.00 Get coupons

Insert Width(mm): 1g

500mg 1g

Quantity:

1 Additional 8% off (10 Gram or more)  
1000 Gram available

Shipping: US \$6.29

to Thailand via China Post Registered Air Mail

Estimated Delivery on Sep 11

รูป 79 ราคาผงแกรฟีนออกไซด์ที่ผสมกับ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กที่ขายผ่านเว็บไซต์ Aliexpress ในราคากรัมละ 28,414 บาท (\$848.19×33.5 บาท)

ตาราง 15 แสดงต้นทุนในการสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะและแกรฟีนผง 1 ครั้ง (ไม่รวมค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์) โดยอ้างอิงราคาจากห้องปฏิบัติการการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้แกรฟีน ม.ธรรมศาสตร์

รายการ	ราคา (บาท)
ค่าไฟฟ้าเตาเผา (1800 วัตต์) = (1.8หน่วย×10ชั่วโมง×5.5บาท)	99
แก๊ส	160
กากของเสีย FeCl <sub>3</sub>	ฟรี
น้ำตาล 8 กรัม (1 ก.ก. ราคา 25 บาท)	0.2
<b>รวมต้นทุนในการสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะ 8 กรัม</b>	<b>259.2</b>
<b>รวมต้นทุนในการสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะ 1 กรัม</b>	<b>32.4</b>
ขั้นตอนการละลายโลหะ	
HCl (1ขวด=450ml)	85
<b>รวมต้นทุนในการสังเคราะห์แกรฟีนผง 4 กรัม</b>	<b>344.2</b>

รวมต้นทุนในการสังเคราะห์แกรฟีนผง 1 กรัม	86.05
---	-------

## 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5 และศึกษาการกำจัดกากของเสีย  $FeCl_3$  ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์ สำหรับการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกนั้น ทีมวิจัยพบว่าการปลูกแกรฟีนบนโลหะนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ ใช้อุณหภูมิในการปลูก 800 °C เวลาในการปลูก 30 นาที และใช้ปริมาณขยะหลอดพลาสติก 0.5 กรัม ในการปลูกแกรฟีนขนาด 3×4 ตารางเซนติเมตร

สำหรับการทดสอบการดักจับฝุ่นพบว่าแกรฟีนโพลีเมอร์หนา 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งมีการระบายอากาศได้ดีมากเกือบ 100% (เนื่องจากมีความพรุนอยู่ที่ 96.6065%) และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยของการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 สูงถึง 81.74%, 82.69%, และ 81.58% ตามลำดับสำหรับบุคคลที่หายใจในสภาวะปกติ แต่ในกรณีที่ต้องการใช้กับบุคคลที่หายใจเร็ว (เช่น การใส่หน้ากากเวลาออกกำลังกาย เป็นต้น) แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์จำเป็นต้องหนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น โดยความหนาของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อยอดต่อไป

สำหรับการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  ที่เกิดขึ้นนั้น ทีมวิจัยได้ทำการผสมกากของเสีย  $FeCl_3$  กับน้ำตาลแล้วนำไปอบที่ 90 °C นาน 1 วัน หลังจากนั้นทำการเผาสารผสมดังกล่าวภายในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ 700 °C นาน 6 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แกรฟีนผงหุ้มโลหะ โดยทีมวิจัยพบว่าแกรฟีนผงหุ้มโลหะนั้นมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กสามารถดูดติดกับแม่เหล็กได้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นสารดักจับสิ่งสกปรกในน้ำได้ นอกจากนี้เมื่อนำแกรฟีนผงหุ้มโลหะไปละลายโลหะออกโดยการแช่ในกรด HCl ก็จะได้แกรฟีนผงที่มีมูลค่าสูงได้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1. ผลการวิจัยของโครงการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าขยะพลาสติกสามารถแปรรูปเป็นแกรฟีนโพลีคุณภาพสูงได้ แต่เนื่องด้วยปริมาณคาร์บอนของขยะพลาสติกมีผลต่อการปลูกแกรฟีน ดังนั้นเพื่อให้ได้แกรฟีนที่มีคุณภาพคงที่ขยะพลาสติกที่ใช้จำเป็นต้องเป็นขยะที่สะอาด

7.2.2. ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของฝุ่นที่เคลื่อนผ่านแผ่นกรอง ซึ่งโครงการวิจัยนี้ใช้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีหนาประมาณ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ยของการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 สูงถึง 81.74%, 82.69%, และ 81.58% ตามลำดับ สำหรับบุคคลที่หายใจในสภาวะปกติ แต่ในกรณีที่ต้องการใช้กับบุคคลที่หายใจเร็ว เช่น การใส่หน้ากากเวลาออกกำลังกาย เป็นต้น ประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีที่หนา 1.6 มิลลิเมตร จะมีค่าลดลง ดังนั้นการวิจัยต่อยอดเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี ซึ่งอาจจะทำโดยการเพิ่มความหนาหรือนำแกรฟีนโพลีหลายๆแผ่นมาซ้อนทับกันนั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม

7.2.3. โครงการวิจัยนี้แสดงให้เห็นการเพิ่มมูลค่ากากของเสีย  $FeCl_3$  โดยการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  เป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูงอย่างเช่น แกรฟีนผงหุ้มโลหะและแกรฟีนผง ซึ่งในขั้นตอนการแช่แกรฟีนผงหุ้มโลหะในกรด HCl เข้มข้น 6 M จำนวน 20 มิลลิลิตร และทำการคนนาน 3 ชั่วโมง นั้น พบว่าสามารถกำจัดโลหะส่วนใหญ่ออกไปได้ แต่ยังคงหลงเหลือโลหะบางส่วนอยู่ ดังนั้นการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับปริมาณและความเข้มข้นของกรด HCl และเวลาที่ใช้ในการคนนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม

7.2.4. สำหรับผู้ประกอบการหรือผู้ที่มีส่วนได้เสียที่ต้องการนำผลการวิจัยจากโครงการนี้ไปใช้ประโยชน์ ทีมวิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

7.2.4.1. กรณีการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีโดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน ทีมวิจัยขอเสนอให้ใช้ขยะหลอดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอนเนื่องจากใช้พลังงานในการเผาขยะหลอดพลาสติกและโลหะนิกเกิลโพลีน้อยกว่ากรณีการใช้ขยะขวดน้ำพลาสติก นอกจากนี้ขยะหลอดพลาสติกส่วนมากเป็นขยะที่ทำความสะอาดง่าย มีคาร์บอนอื่นๆปนเปื้อนน้อย ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมคุณภาพของแกรฟีนได้ง่าย ยิ่งไปกว่านั้นการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีนี้ยังง่ายและใช้ต้นทุนที่ประหยัด อีกทั้งแกรฟีนโพลีนั้นยังไม่มีการผลิตขายในประเทศไทย ประกอบกับการสังเคราะห์แกรฟีนในปริมาณมากระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์นั้นจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยถูกลงอีกด้วย ซึ่งเป็นจุดเด่นสำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการลงทุนการผลิตแกรฟีนใช้เชิงพาณิชย์

7.2.4.2. กรณีการนำแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีมาประยุกต์ใช้เป็นหน้ากากกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 ประสิทธิภาพสูง แม้ว่าทีมวิจัยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีหนา 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 จากอากาศจริง ในกรณีที่ผู้สวมใส่หน้ากากหายใจปกติ แต่เนื่องด้วยการทดสอบการกรองฝุ่นจากอากาศจริงนั้นอยู่ในช่วงกึ่งล็อกดาวน์อันเนื่องจากการแพร่ระบาดของโรคโควิด19 และเนื่องด้วยทีมวิจัยใช้คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) เป็นสถานที่ในการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี ซึ่งในช่วงเวลานั้นมีจำนวนผู้ใช้รถใช้ถนนน้อยเนื่องจากมีคำสั่งให้บุคคลกรทำงานจากที่บ้านและนักศึกษาให้เรียนออนไลน์ ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศจึงมีน้อยกว่าช่วงเวลาปกติ ดังนั้นถ้านำแกรฟีนโพลีหนา 1.6 มิลลิเมตร นี้ไปทดสอบในช่วงเวลาปกติอาจจะได้ค่าประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นที่ลดลง แต่เนื่องด้วยแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีที่หนา 1.6 มิลลิเมตร นี้ยังมีค่าความดันที่แตกต่างระหว่างก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลี (pressure drop) เป็น 0 Pa ซึ่งทำให้ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) มีค่าสูงเป็นอันดับ 1 อีกทั้งแกรฟีนโพลีที่สังเคราะห์ได้ยังมีค่าความพรุนที่สูงมากถึง 96.61% และมีมวลเฉลี่ยประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีนี้ระบายอากาศได้ดีมากและมีน้ำหนักเบา ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีโดยการสังเคราะห์แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีให้หนามากขึ้นหรือการนำแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีหลายๆแผ่นมาซ้อนทับกัน เพื่อให้ได้หน้ากากกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา และระบายอากาศได้ดี จึงมีความเป็นไปได้สูง นอกจากนี้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลียังมีศักยภาพที่จะพัฒนาต่อยอดเป็นหน้ากากกรองฝุ่นสำหรับนักกีฬาและผู้สูงอายุได้อีกด้วย เนื่องจากนักกีฬาและผู้สูงอายุนั้นต้องการอากาศมากกว่า 2 ถึง 3 เท่า ของบุคคลที่อยู่ในสภาวะปกติ ดังนั้นหน้ากากกันฝุ่นนอกจากจะต้องมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงแล้วยังต้องสามารถระบายอากาศได้ดีมากอีกด้วย ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีหน้ากากกันฝุ่นสำหรับนักกีฬาและผู้สูงอายุจำหน่าย ประกอบกับกลุ่มนักกีฬาและผู้สูงอายุเป็นผู้ที่มีกำลังซื้อสูงและใส่ใจในสุขภาพ ดังนั้นการลงทุนในอุตสาหกรรมหน้ากากกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีจึงมีโอกาประสบความสำเร็จสูง

7.2.4.3. การประยุกต์ใช้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีสำหรับดักจับฝุ่น PM2.5 จากท่อไอเสียยานพาหนะท่อใช้น้ำมัน เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยเกือบทั้งประเทศใช้ยานพาหนะท่อใช้น้ำมันซึ่งปลดปล่อยฝุ่น PM2.5 ในปริมาณมาก แม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่หลายๆประเทศกำลังมุ่งพัฒนาจะสามารถลดการปล่อยฝุ่น PM2.5 ในอากาศได้ แต่เนื่องด้วยราคายานยนต์ไฟฟ้าที่ยังคงสูงมาก ประกอบกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยยังไม่เอื้อต่อการใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการที่ยานยนต์ไฟฟ้าจะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทยอาจต้องใช้เวลาอีกมากกว่า 10 ปี ดังนั้นคนไทยอาจจะต้องทนกับปัญหาฝุ่น PM2.5 อีกนาน ด้วยเหตุนี้ถ้านำแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5 จากท่อไอเสียยานพาหนะท่อใช้น้ำมัน ก็จะสามารถลดการปล่อยฝุ่น PM2.5 ลงได้ และเนื่องด้วยแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีมีความพรุนสูงเกือบ 100% และ

ระบายอากาศได้ดีเยี่ยม ดังนั้นการติดตั้งแผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์จะไม่ทำให้เครื่องยนต์เกิดปัญหาจากการระบายไอเสีย อีกทั้งในปัจจุบันผู้คนให้ความสนใจต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นประกอบกับยังไม่มีผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจำหน่าย ดังนั้นจึงเป็นโอกาสที่ดีสำหรับผู้สนใจลงทุนในผลิตภัณฑ์นี้

7.2.4.4. กรณีการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  จากกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์ โดยกระบวนการนี้จะทำการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  เป็นแกรฟีนผงหุ้มเหล็กและแกรฟีนผง ด้วยต้นทุนที่ประหยัดมาก และจากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันยังไม่มีการขายแกรฟีนผงหุ้มโลหะ แต่มีการขายผงผสมระหว่างแกรฟีนออกไซด์กับ  $Fe_3O_4$  ซึ่งเป็นวัสดุแกรฟีนออกไซด์ที่สามารถดูดติดกับแม่เหล็กได้และจำหน่ายผ่านทางเว็บไซต์ของ aliexpress ในราคากรัมละ 28,414 บาท ( $\$848.19 \times 33.5$  บาท) ดังแสดงใน รูป 79 ซึ่งแพงกว่าต้นทุนที่ผลิตในห้องปฏิบัติการอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีการขายแกรฟีนผงซึ่งราคาขายของแกรฟีนผงนั้นอยู่ที่ 26,600 บาทต่อกรัม (รูป 77) ซึ่งแพงกว่าต้นทุนที่ผลิตในห้องปฏิบัติการมากเช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้นการสังเคราะห์แกรฟีนผงหุ้มโลหะและแกรฟีนผงจากกากของเสีย  $FeCl_3$  นั้นทำได้ง่ายและสามารถขยายกำลังการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ได้ ยิ่งไปกว่านั้นต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์จะลดลงอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อรวมค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการกำจัดกากของเสีย  $FeCl_3$  ก็จะทำให้การแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  เป็นแกรฟีนผงหุ้มโลหะและแกรฟีนผงนั้นเป็นกระบวนการที่คุ้มค่ามาก และเมื่อที่มิวิจัยค้นหาลาดแกรฟีนในประเทศไทยพบว่า ปัจจุบันประเทศไทยผลิตและจัดจำหน่ายมีเพียงแกรฟีนออกไซด์และผงรีดิวส์แกรฟีนออกไซด์เท่านั้น ยังไม่มีการผลิตและจัดจำหน่ายแกรฟีนผงหุ้มโลหะและแกรฟีนผงบริสุทธิ์ ดังนั้นการลงทุนในการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  จึงเป็นโอกาสที่ดีมากสำหรับผู้ประกอบการที่สนใจ

## 8 บรรณานุกรม

- [1] Andronico, Michael. "5 Ways Graphene Will Change Gadgets Forever", <http://news.yahoo.com/5-ways-graphene-change-gadgets-155243022.html>. (2014).
- [2] J. Hass, W. A. de Heer, and E. H. Conrad, "The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene," J. Phys: Condens. Matter, 20, 323202 (2008).
- [3] A. Ruammaitree, H. Nakahara, K. Akimoto, K. Soda, Y. Saito, "Determination of non-uniform graphene thickness on SiC (0001) by X-ray diffraction.", Applied Surface Science 282, 297-301 (2013).

- [4] Francesco Bonaccorso, Luigi Colombo, Guihua Yu, Meryl Stoller, Valentina Tozzini, Andrea C. Ferrari, Rodney S. Ruoff, Vittorio Pellegrini, “Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage”, *Science* 347, 1246501 (2015).
- [5] Liqiang Lu, Jeff Th. M. De Hosson, Yutao Pei, “Three-dimensional micron-porous graphene foams for lightweight current collectors of lithium-sulfur batteries”, *Carbon* 144 (2019) 713-723.
- [6] Supang Chatuchinda, 21 กันยายน 2018, “พลาสติก 101 : รู้จักพลาสติกในชีวิตประจำวัน”, <https://www.greenpeace.org/thailand/story/2242/plastic-101/>
- [7] Wonji Jung, Jeong Seok Lee, Seonggeun Han, Seung Hwan Ko, Taewoo Kim, and Yong Hyup Kim, “An efficient reduced graphene-oxide filter for PM2.5 removal”, *J. Mater. Chem. A*, 2018, 6, 16975
- [8] Rosana B. Sotero-Santos, Odete Rocha, Jurandyr Povinelli, “Toxicity of ferric chloride sludge to aquatic organisms”, *Chemosphere* 68 (2007) 628–636

# ภาคผนวก

## สรุปผลงานวิจัย/โครงการวิจัย 1 หน้ากระดาษ A4 (สำหรับประชาสัมพันธ์)

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5 โดยเริ่มจากการปลูกแกรฟีนบนโลหะนิกเกิลโพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะพลาสติกและขยะขวดพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์คือ การเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800 °C นาน 30 นาที และใช้ปริมาณขยะพลาสติก 0.5 กรัม โดยแกรฟีนโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์นั้นมีความพรุนสูงถึง 96.61%, มีความสามารถในการระบายอากาศได้ดีเยี่ยม, และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยของการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 (ในกรณีของการหายใจในสภาวะปกติ) เป็น 81.74%, 82.69%, และ 81.58% ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์จึงเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นแผ่นกรองฝุ่นในหน้ากากกันฝุ่น ซึ่งจะช่วยให้ผู้สวมใส่หายใจได้สะดวก หน้ากากมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้แผ่นกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์ยังสามารถนำไปสร้างต้นแบบอุปกรณ์กรองฝุ่นขนาดเล็กจากท่อไอเสียของยานพาหนะที่ใช้ใช้น้ำมัน ซึ่งจะช่วยลดปัญหาฝุ่น PM2.5 ที่เกิดจากยานพาหนะที่ใช้ใช้น้ำมันได้ และเนื่องด้วยแกรฟีนโพลีเมอร์นี้สังเคราะห์จากขยะของเสียจึงทำให้มีต้นทุนประหยัด ซึ่งจะเหมาะสำหรับผู้ประกอบการที่สนใจลงทุนผลิตหน้ากากกันฝุ่นคุณภาพสูงและอุปกรณ์กรองฝุ่นจากยานพาหนะที่ใช้ใช้น้ำมัน เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีหน้ากากกันฝุ่นสำหรับนักกีฬาและอุปกรณ์กันฝุ่น PM2.5 จากยานพาหนะที่ใช้ใช้น้ำมัน ประกอบกับกลุ่มนักกีฬาและกลุ่มนักอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเป็นกลุ่มที่มีกำลังซื้อสูงและใส่ใจในสุขภาพ ยิ่งไปกว่านั้นจำนวนผู้ที่ต้องการออกกำลังกายกลางแจ้งและจำนวนยานพาหนะที่ใช้ใช้น้ำมันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทุกปี ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่ผลิตภัณฑ์หน้ากากกรองฝุ่นแกรฟีนโพลีเมอร์สำหรับนักกีฬาและอุปกรณ์กรองฝุ่นจากท่อไอเสียยานพาหนะที่ใช้ใช้น้ำมันจะได้รับความนิยม

นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้ยังศึกษาการแปรรูปกากของเสีย  $FeCl_3$  ซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์ โดยกากของเสีย  $FeCl_3$  จะถูกแปรรูปให้เป็นแกรฟีนผงหุ้มโลหะและแกรฟีนผงที่มีมูลค่าสูงและสามารถใช้เป็นสารดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้

## สรุปผลงานวิจัย/โครงการวิจัย 5 บรรทัด

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์แกรไฟน์โพลีเมอร์โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ขยะหลอดพลาสติกและขยะขวดน้ำพลาสติกเป็นแหล่งคาร์บอน โดยผลการวิจัยพบว่าการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800 °C นาน 30 นาที และใช้ปริมาณขยะหลอดพลาสติก 0.5 กรัม เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์แกรไฟน์โพลีเมอร์ โดยแกรไฟน์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพสูงในการกรองฝุ่น PM1, PM2.5, และ PM10 อีกทั้งแผ่นกรองฝุ่นแกรไฟน์โพลีเมอร์ยังสามารถระบายอากาศได้ดีเยี่ยมอีกด้วย

# การสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5

## Synthesis of graphene foam from plastic waste for PM2.5 capture

### วัตถุดิบ

ขยะพลาสติก



สังเคราะห์แกรฟีนโดยวิธี  
การเคลือบผิวด้วยไอเคมี



### ผลผลิต

แกรฟีนโพลีเมอร์



### การประยุกต์ใช้

1. หน้ากากกันฝุ่น PM2.5 ประสิทธิภาพสูง
2. อุปกรณ์ดักจับฝุ่น PM2.5 จากท่อไอเสียยานยนต์น้ำมัน



แกรฟีนผงหุ้มโลหะที่  
เป็นสารแม่เหล็ก



ตัวดูดซับสิ่งสกปรกในน้ำ



ของเสีย  $FeCl_3$

ผสมกับน้ำตาลทราย  
แล้วนำไปเผา



แช่ใน HCl



ขั้วไฟฟ้าแบตเตอรี่และ  
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด



แกรฟีนผง



สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

ผศ.ดร. อรรถวชิร รวมไมตรี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อีเมลล์ [u4605070@hotmail.com](mailto:u4605070@hotmail.com)



ด่วนที่สุด  
ที่ อว ๐๔๑๔/๘๕๐๕



สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

๑๕๖ ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐

๗ ตุลาคม ๒๕๖๓

เรื่อง การอนุญาตนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในวารสารนานาชาติ

เรียน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรชวัชร ร่วมไมตรี

อ้างถึง หนังสือคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ลงวันที่ ๑๘ กันยายน ๒๕๖๓

ตามหนังสือที่อ้างถึง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ขออนุญาตนำผลงานวิจัยของโครงการ “การสังเคราะห์แกรฟีนโพลีเมอร์จากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นแผ่นดักจับฝุ่น PM2.5” โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรชวัชร ร่วมไมตรี เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย ที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เพื่อนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในวารสารนานาชาติ Journal of Physics : Conference Series นั้น

ในการนี้ วช. พิจารณาแล้ว เห็นควรอนุญาตให้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรชวัชร ร่วมไมตรี นำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในวารสารนานาชาติ Journal of Physics : Conference Series เพื่อเป็นประโยชน์ให้แก่ักวิจัยที่จะได้ประเมินคุณภาพและเผยแพร่บทความวิจัย รวมทั้งเป็นการสร้างเครือข่ายกับนักวิจัยในวงการเดียวกัน

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาววิภารัตน์ ตีอ่อง)

รองผู้อำนวยการสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

รักษาราชการแทน ผู้อำนวยการสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ภารกิจการวิจัยและนวัตกรรมของประเทศด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โทร. ๐ ๒๕๗๙ ๑๓๗๐ - ๙ ต่อ ๓๐๘ - ๓๑๐ (วัชรระ/ศิวพร/กรรณิกา)

โทรสาร ๐ ๒๕๗๙ ๐๑๙๔ ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ envi.research@nrct.go.th

PAPER • OPEN ACCESS

## Increase in surface hardness of stainless steel through graphene growth on stainless steel surface by chemical vapor deposition using waste vegetable oil as a carbon source

To cite this article: P Surinlert *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1719** 012111

View the [article online](#) for updates and enhancements.



**IOP | ebooks™**

Bringing together innovative digital publishing with leading authors from the global scientific community.

Start exploring the collection—download the first chapter of every title for free.

## Increase in surface hardness of stainless steel through graphene growth on stainless steel surface by chemical vapor deposition using waste vegetable oil as a carbon source

P Surinlert<sup>1,3</sup>, P Chuenoppakun<sup>2</sup> and A Ruammaitree<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> Chulabhorn International College Medicine, Thammasat University, Pratumthani 12120, Thailand

<sup>2</sup> Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pratumthani 12120, Thailand

<sup>3</sup> Thammasat University Research Unit in Synthesis and Applications of Graphene, Thammasat University, Pratumthani 12120, Thailand

\*Corresponding author's E-mail address: u4605070@hotmail.com

**Abstract.** Stainless steel has been widely utilized due to its high resistance of corrosion, rust, and stain more than ordinary steel. However, a hardness of stainless-steel surface is not high resulting in engineering applications of stainless steel are limited. Graphene is an extremely hard material therefore the growth of graphene on stainless steel can increase the surface hardness of stainless steel. Vegetable oil consists of triglyceride which has abundant carbon in the constituent. Vegetable oil has been widely used for cooking. After the cooking, a huge amount of the waste vegetable oil is flushed down the drain resulting in water pollution. However, the waste vegetable oil still contains abundant carbon which can be used as a carbon source for graphene growth on stainless steel by chemical vapor deposition (CVD). In this study, the surface hardening of stainless steel through graphene growth on stainless steel by CVD using waste palm oil as a carbon source is demonstrated. The results show that the fourth-used palm oil can be utilized as a carbon source for the growth of graphene on stainless steel by CVD. Moreover, the graphene growth on stainless steel by CVD using the fourth-used palm oil can increase the surface hardness of stainless steel by 175%

### 1. Introduction

Stainless steel is steel alloy which has been widely utilized due to its high resistance of corrosion, rust, and stain more than ordinary steel. However, a hardness of stainless-steel surface is not high resulting in engineering applications of stainless steel are limited. The surface hardening of stainless steel can improve many equipment such as cam or ring gear, bearings or shafts, turbine applications, and automotive components [1] therefore increase in surface hardness of stainless steel can broaden its application range.

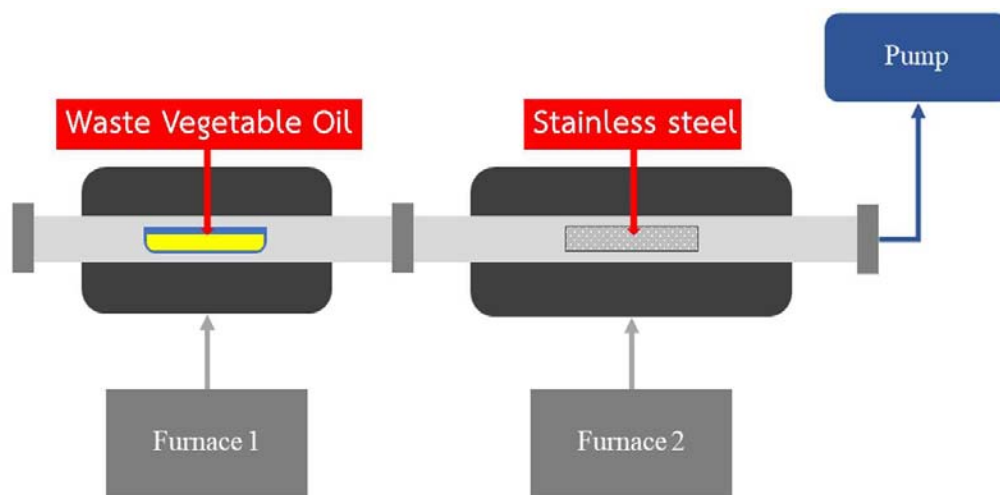


Graphene is an allotrope of carbon which is arranged in a 2D honeycomb lattice [2-5]. Graphene is a superhard material [6] which has an intrinsic strength of 130 GPa, young's modulus of 1.0 TPa, and elastic stiffness of -2.0 TPa [7]. Therefore, the growth of graphene on stainless steel can increase the surface hardness of stainless steel [8,9]. Vegetable oil consists of triglyceride which has abundant carbon in the constituent. Vegetable oil has been widely utilized for cooking. After the cooking, a huge amount of the waste vegetable oil is flushed down the drain [10]. Since the density of the waste vegetable oil is lower than that of water, the waste vegetable oil will float in water and obstruct the oxygen exchange between water and air resulting in polluted water. However, the waste vegetable oil still contains abundant carbon which can be used as a carbon source for graphene growth on stainless steel by chemical vapor deposition (CVD). In this study, the surface hardening of stainless steel through graphene growth on stainless steel by CVD using waste palm oil as a carbon source is demonstrated.

## 2. Experimental procedures

The growth of graphene on stainless steel was prepared by CVD using waste palm oil as a carbon source [11,12]. A  $3 \times 4 \times 0.085 \text{ cm}^3$  stainless-steel (S304) plate was pre-cleaned by ultrasonic sonication in acetone for 5 minutes. After the acetone evaporated from the substrate's surface, a tray of waste palm oil with quantity of 25 ml and the cleaned stainless-steel substrate were put into the quartz tube in the area of furnace 1 and furnace 2, respectively, as shown in figure 1 followed by evacuation until the base pressure in the quartz tube reached  $\sim 3 \text{ Pa}$  and then the stainless-steel substrate was annealed to the graphene growth temperature of  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  by furnace 2. At the growth temperature, the vapor of waste palm oil was introduced to the area of furnace 2 by annealing the waste palm oil at  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  using furnace 1. The substrate was annealed for 30 minutes under the vapor of the waste palm oil. After that the substrate was fast cooled down to room temperature.

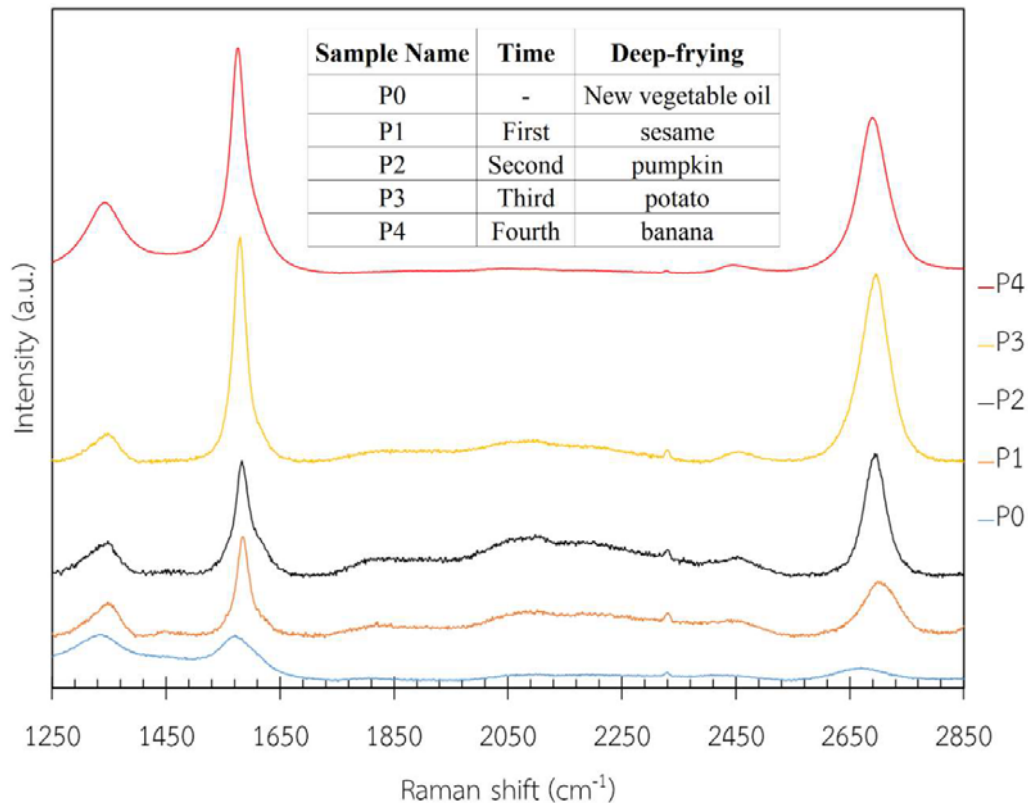
The presence of graphene on stainless-steel plates was confirmed by Raman spectroscopy measured at room temperature using a 100x objective and a 532 nm laser. The laser beam size is 1 mm in diameter. Morphology and element analysis were investigated by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) equipped with an energy dispersive X-ray spectroscope (EDX) at incident beam of 15 keV. Surface hardness test was performed by nanoindenter using load up to 200 mN



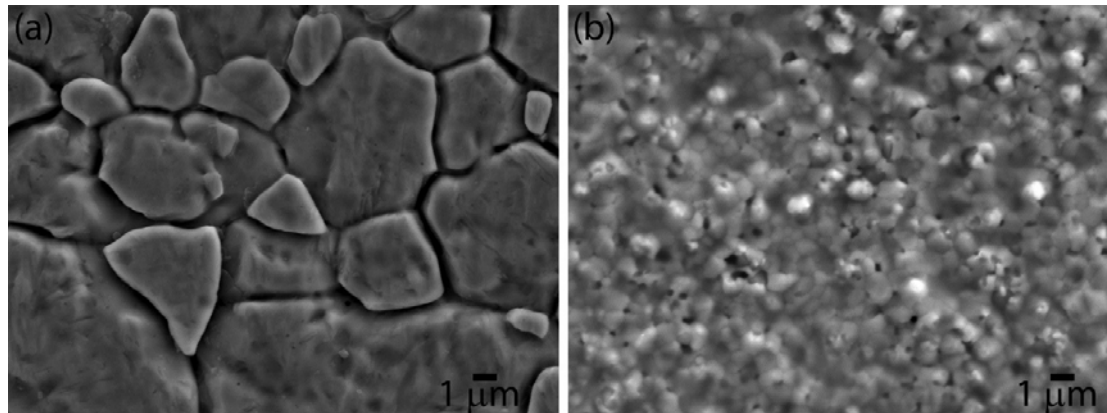
**Figure 1.** Schematic of experimental setup of graphene growth on stainless steel by CVD using waste vegetable oil as a carbon source.

### 3. Results and discussion

In this study, used palm oil is utilized as a carbon source for graphene growth by CVD. The used palm oil is obtained after deep-frying sesame, pumpkin, potato, and banana, respectively. Figure 2 shows Raman spectra measured on the samples underwent the growth of graphene on stainless steel by CVD using the waste palm oil obtained by deep-frying various foodstuffs. The names of samples and types of deep-fried foodstuff are shown in figure 2 (inset). The Raman spectra of all samples show G and 2D bands which are the characteristic bands of graphene at  $\sim 1580\text{ cm}^{-1}$  and  $\sim 2700\text{ cm}^{-1}$ , respectively [13-15]. Although Raman spectra show the graphene characteristic G and 2D bands, it cannot confirm the presence of graphene on the sample surfaces since carbon nanotube also has these G and 2D bands because both of graphene and carbon nanotube are  $\text{sp}^2$  carbon materials [16]. Figure 3 show SEM images of pristine stainless steel (figure 3 (a)) and P4 sample (figure 3 (b)). The SEM image of P4 shows there is not carbon nanotube on the surface confirming the presence of graphene on P4 sample and the fourth-used palm oil (P4) can be used as a carbon source for graphene growth by CVD. The SEM image of P4 sample also shows that the surface of P4 sample is not smooth implying that the graphene film on the sample surface is not uniform.



**Figure 2.** Raman spectra measured on the surfaces of samples underwent graphene growth on stainless steel by CVD using various waste palm oil as a carbon source. (Inset) Table shows sample names and foodstuffs which deep-fried in the palm oil.



**Figure 3.** SEM images measured on surfaces of (a) pristine stainless steel and (b) P4 sample

In general, the carbon source for the growth of graphene on stainless steel by CVD should be without oxygen because it obstructs graphene formation. However, the results show that palm oil which contains abundant oxygen can be utilized as the carbon source for graphene growth on stainless steel by CVD. It may be attributed to carbothermal reduction which is a process to eliminate oxide from the metal surface by annealing the metal oxide with reducing-agent carbon at high temperature [17,18]. Liu et al. show that annealing iron oxide at temperature more than 600 K with gaseous carbon can reduce the iron oxide [19]. In our case, stainless steel which is iron-rich alloy was annealed at 900 °C with the vapor of the waste palm oil which contains abundant oxygen and carbon. The reaction of reduction of iron oxide is displayed step by step as follows [11].

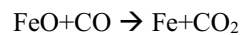
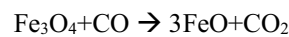
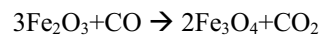
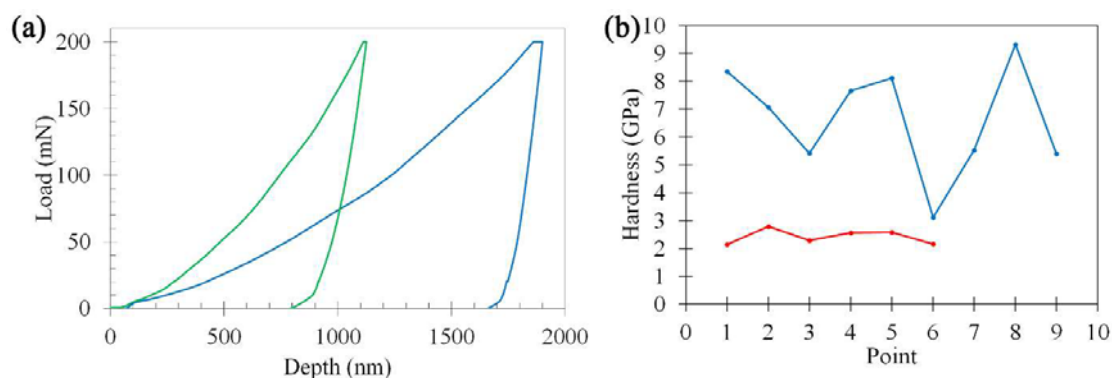


Figure 4 (a) shows load vs depth curves of pristine stainless steel (blue) and P4 sample (green). The average surface hardnesses of pristine stainless steel and P4 sample are 2.42 GPa and 6.66 GPa, respectively. Figure 4 (b) shows surface hardnesses of pristine stainless steel and P4 sample randomly measured 6 points on pristine stainless steel and 9 points on P4 sample. The graph shows the surface hardness of P4 sample considerably fluctuates. It may be attributed to non-uniform graphene thickness.



**Figure 4.** (a) Load vs depth curves of pristine stainless steel (blue) and P4 sample (green). (b) Surface hardness randomly measured 6 points on pristine stainless steel (red) and 9 points on P4 sample (blue).

#### 4. Conclusions

In this report, we have demonstrated the growth of graphene on stainless steel by CVD using waste palm oil as a carbon source. The results show that the fourth-used palm oil can be utilized as a carbon source for graphene growth on stainless steel by CVD. Moreover, the growth of graphene on stainless steel by CVD using the fourth-used palm oil can increase the surface hardness of stainless steel by 175%

#### Acknowledgement

This work was supported by Thammasat University Research Unit in Synthesis and Applications of Graphene. This project is funded by National Research Council of Thailand (No. 136/2563). The authors thank Center of Scientific Equipment for Advanced Research, Thammasat University for SEM measurements.

#### References

- [1] Schneider M J and Chatterjee M S 2013 *Introduction to surface hardening of steels Steel heat treating fundamentals and processes* (ASM Handbook Vol 4A) Dossett J and Totten G E (Ohio: ASM International) pp. 389–398
- [2] Ruammaitree A, Nakahara H, Akimoto K, Soda K and Saito Y 2013 *Appl. Surf. Sci.* **282** 297
- [3] Hass J, de Heer W A and Conrad E H 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 323202
- [4] Ruammaitree A, Nakahara H and Saito Y 2014 *Surf. Interface Anal.* **46** 1156
- [5] Ruammaitree A, Nakahara H and Saito Y 2014 *Appl. Surf. Sci.* **307** 136
- [6] Zhang Y and Pan C 2012 *Diamond Relat. Mater.* **24** 1
- [7] Lee C, Wei X, Kysar J W and Hone J 2008 *Sci.* **321** 385
- [8] Ruammaitree A, Phokharatkul D and Wisitsoraat A 2018 *Solid State Phenom.* **283** 173
- [9] Surinlert P and Ruammaitree A 2020 *Solid State Phenom.* **302** 79
- [10] Hamasaki K, Tajima H, Takasaki K, Satohira K, Enomoto M and Egawa H 2001 *J. Fuels Lubr.* **110** 1499
- [11] Ruammaitree A 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **773** 012003.
- [12] Naksakul T, Sunpong P and Ruammaitree A 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **773** 012015
- [13] Hu H, Ruammaitree A, Nakahara H, Asaka K and Saito Y 2012 *Surf. Interface Anal.* **44** 793
- [14] Ruammaitree A, Phokharatkul D, Nuntawong N and Wisitsoraat A 2018 *Surf. Rev. Lett.* **25** 1840003
- [15] Kokmat P, Donnuea N, Nuntawong N, Wisitsoraat A and Ruammaitree A 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **526** 012008.
- [16] Saito R, Hofmann M, Dresselhaus G, Jorio A and Dresselhaus M S 2011 *Adv. Phys.* **60** 413
- [17] Boris V L 2000 *Thermochim. Acta* **360** 109
- [18] Eick B M and Youngblood J P 2009 *J. Mater. Sci.* **44** 1159
- [19] Liu B, Zhang Y, Lu M, Su Z, Li G and Jiang T 2019 *Miner. Eng.* **131** 286



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 1 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

### Summary Report

#### Surface Area

Single point surface area at  $p/p^\circ = 0.204145573$ : 14.8175 m<sup>2</sup>/g

BET Surface Area: 14.8494 m<sup>2</sup>/g

Langmuir Surface Area: 20.2712 m<sup>2</sup>/g

t-Plot external surface area: 23.4734 m<sup>2</sup>/g

BJH Adsorption cumulative surface area of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 19.6925 m<sup>2</sup>/g

BJH Desorption cumulative surface area of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 20.6339 m<sup>2</sup>/g

D-H Adsorption cumulative surface area of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 21.1373 m<sup>2</sup>/g

D-H Desorption cumulative surface area of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 21.4583 m<sup>2</sup>/g

#### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
less than 403.122 Å width at  $p/p^\circ = 0.950000000$ : 0.028002 cm<sup>3</sup>/g

Single point desorption total pore volume of pores  
less than 403.122 Å width at  $p/p^\circ = 0.950000000$ : 0.030886 cm<sup>3</sup>/g

t-Plot micropore volume: -0.003132 cm<sup>3</sup>/g

BJH Adsorption cumulative volume of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 0.034383 cm<sup>3</sup>/g

BJH Desorption cumulative volume of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 0.034523 cm<sup>3</sup>/g

D-H Adsorption cumulative volume of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 0.035602 cm<sup>3</sup>/g



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 2 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Pore Volume**

D-H Desorption cumulative volume of pores  
between 17.000 Å and 3,000.000 Å width: 0.036162 cm<sup>3</sup>/g

**Pore Size**

Adsorption average pore diameter (4V/A by BET): 75.428 Å

Desorption average pore diameter (4V/A by BET): 83.198 Å

BJH Adsorption average pore width (4V/A): 69.840 Å

BJH Desorption average pore width (4V/A): 66.925 Å

D-H Adsorption average pore width (4V/A): 67.372 Å

D-H Desorption average pore width (4V/A): 67.409 Å

**Freundlich**

Qm·C: 0.00146 ± 0.00007 mmol/g

m: 2.5752 ± 0.1566

**Temkin**

q·alpha/Qm: 6.839438 ± 0.921086 kJ/mol·(mmol/g)

A: 0.1349 ± 0.0919 mmHg

**DFT Pore Size**

Volume in Pores	<	12.69 Å	:	0.00000 cm <sup>3</sup> /g
Total Volume in Pores	<=	1,172.33 Å	:	0.02517 cm <sup>3</sup> /g
Area in Pores	>	1,172.33 Å	:	2.635 m <sup>2</sup> /g
Total Area in Pores	>=	12.69 Å	:	9.758 m <sup>2</sup> /g

Total Area : 45.567 m<sup>2</sup>/g

**Nanoparticle Size:**

Average Particle Size 4,040.578 Å



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 3 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Horvath-Kawazoe**

Maximum pore volume at  $p/p^\circ = 0.177631812$ : 0.006280 cm<sup>3</sup>/g

Median pore width: 7.912 Å

**Dubinín-Astakhov**

Micropore surface area: 14.5891 m<sup>2</sup>/g

Limiting micropore volume: 0.008134 cm<sup>3</sup>/g

**MP-Method**

Cumulative surface area of pores between  
6.9452 Å and 19.0000 Å hydraulic radius: 0.9559 m<sup>2</sup>/g

Cumulative pore volume of pores between  
6.9452 Å and 19.0000 Å hydraulic radius: 0.000668 cm<sup>3</sup>/g

Average pore hydraulic radius (V/A): 6.9883 Å



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 4 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
			00:25	760.251526
0.003963025	3.018313	0.07122	00:53	761.618469
0.005068616	3.860230	0.07522	00:58	761.594543
0.006454485	4.915252	0.07953	01:02	761.524963
0.007847142	5.976118	0.08227	01:06	761.566101
0.009117676	6.943783	0.08626	01:12	761.573792
0.010441269	7.953136	0.08832	01:19	761.702026
0.015998735	12.187099	0.09582	01:27	761.753906
0.020680579	15.753960	0.10115	01:33	761.775574
0.029035638	22.120550	0.10979	01:39	761.841370
0.032078221	24.438408	0.11167	01:45	761.838013
0.038420848	29.275019	0.11493	01:52	761.956604
0.042453196	32.347980	0.11959	01:58	761.968079
0.047581370	36.259510	0.12252	02:04	762.052673
0.054973051	41.895676	0.12835	02:09	762.112976
0.057465176	43.801186	0.12896	02:16	762.221375
0.061162581	46.621876	0.13227	02:21	762.261414
0.068703645	52.371979	0.13345	02:27	762.288208
0.075550365	57.592831	0.13680	02:31	762.310425
0.082166505	62.634518	0.14032	02:36	762.287720
0.088615660	67.555443	0.14288	02:41	762.342041
0.094774573	72.250237	0.14545	02:46	762.337769
0.101607395	77.466721	0.14875	02:51	762.412231
0.107781274	82.180412	0.15152	02:55	762.473938
0.113950399	86.881310	0.15180	03:00	762.448486
0.125839090	95.941246	0.15588	03:04	762.412109
0.139434423	106.312126	0.16307	03:08	762.452515
0.145747931	111.130280	0.16607	03:12	762.482727
0.159124136	121.328667	0.17207	03:17	762.478088
0.177631812	135.441589	0.18068	03:20	762.484985
0.191317927	145.878845	0.18608	03:24	762.494385
0.204145573	155.668015	0.19084	03:28	762.534363
0.216473012	165.081772	0.19638	03:31	762.597473
0.229488328	175.024307	0.19957	03:35	762.671936
0.247832772	189.023087	0.20708	03:37	762.704163
0.262565355	200.268295	0.21502	03:40	762.736938



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 5 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (p/p°)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.275111286	209.866119	0.22205	03:43	762.840820
0.293807105	224.132751	0.22855	03:46	762.856812
0.333352881	254.309570	0.24781	03:49	762.883972
0.373542015	284.942108	0.27261	03:52	762.811401
0.441016104	336.394562	0.30968	03:55	762.771606
0.482484316	368.008728	0.33304	03:58	762.737183
0.554584381	422.987946	0.37328	04:01	762.711609
0.591003318	450.804230	0.39148	04:04	762.777832
0.663201281	505.951416	0.43211	04:07	762.892700
0.699801706	533.846619	0.45486	04:10	762.854126
0.802711556	612.412231	0.53840	04:12	762.929382
0.881152329	672.281311	0.64188	04:16	762.956970
0.954124020	727.890930	0.82417	04:19	762.889221
0.989311290	754.723145	0.98913	04:21	762.877319
0.878521743	670.222168	0.70581	04:25	762.897644
0.861776973	657.433105	0.67023	04:28	762.880798
0.815699471	622.267822	0.60111	04:33	762.864075
0.773677589	590.289368	0.54902	04:36	762.965576
0.732013544	558.498901	0.50659	04:39	762.962524
0.690168990	526.566040	0.47349	04:42	762.952332
0.648081116	494.439453	0.44240	04:45	762.928345
0.606304114	462.535583	0.41333	04:48	762.877197
0.563242161	429.675629	0.38359	04:52	762.861267
0.521306312	397.679016	0.35756	04:55	762.850952
0.479585749	365.845215	0.32674	04:58	762.835876
0.437658880	333.875946	0.29685	05:01	762.867981
0.394770404	301.152496	0.27449	05:04	762.854797
0.352786027	269.123199	0.25276	05:08	762.851074
0.310999688	237.230881	0.23186	05:11	762.801025
0.268909224	205.126694	0.21253	05:15	762.810181
0.226600817	172.856079	0.19239	05:18	762.821960
0.184417152	140.678467	0.17202	05:23	762.827454
0.142212128	108.462379	0.15479	05:28	762.680237
0.102375407	78.072533	0.14025	05:34	762.610229



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 6 of 51

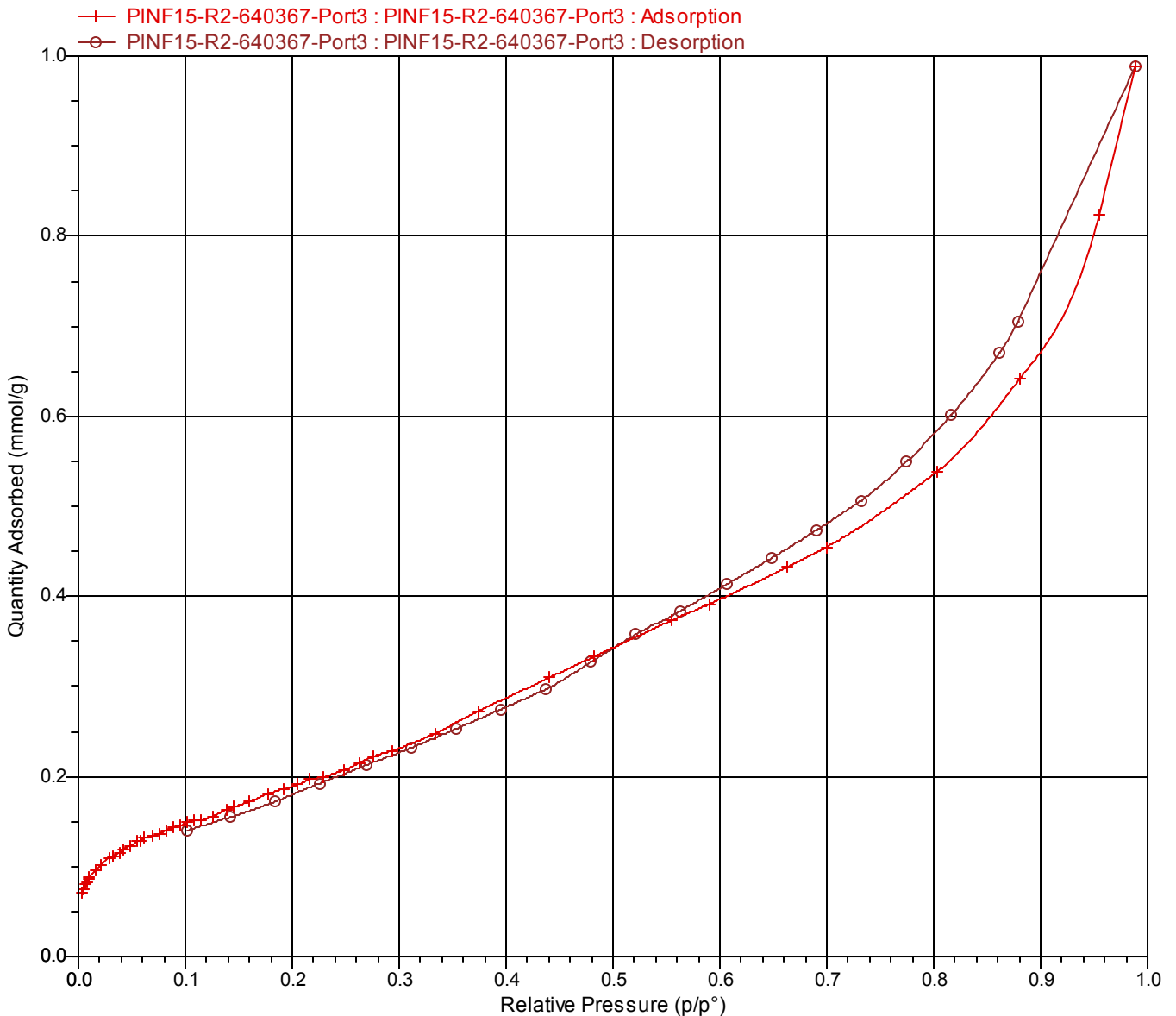
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Linear Plot





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 7 of 51

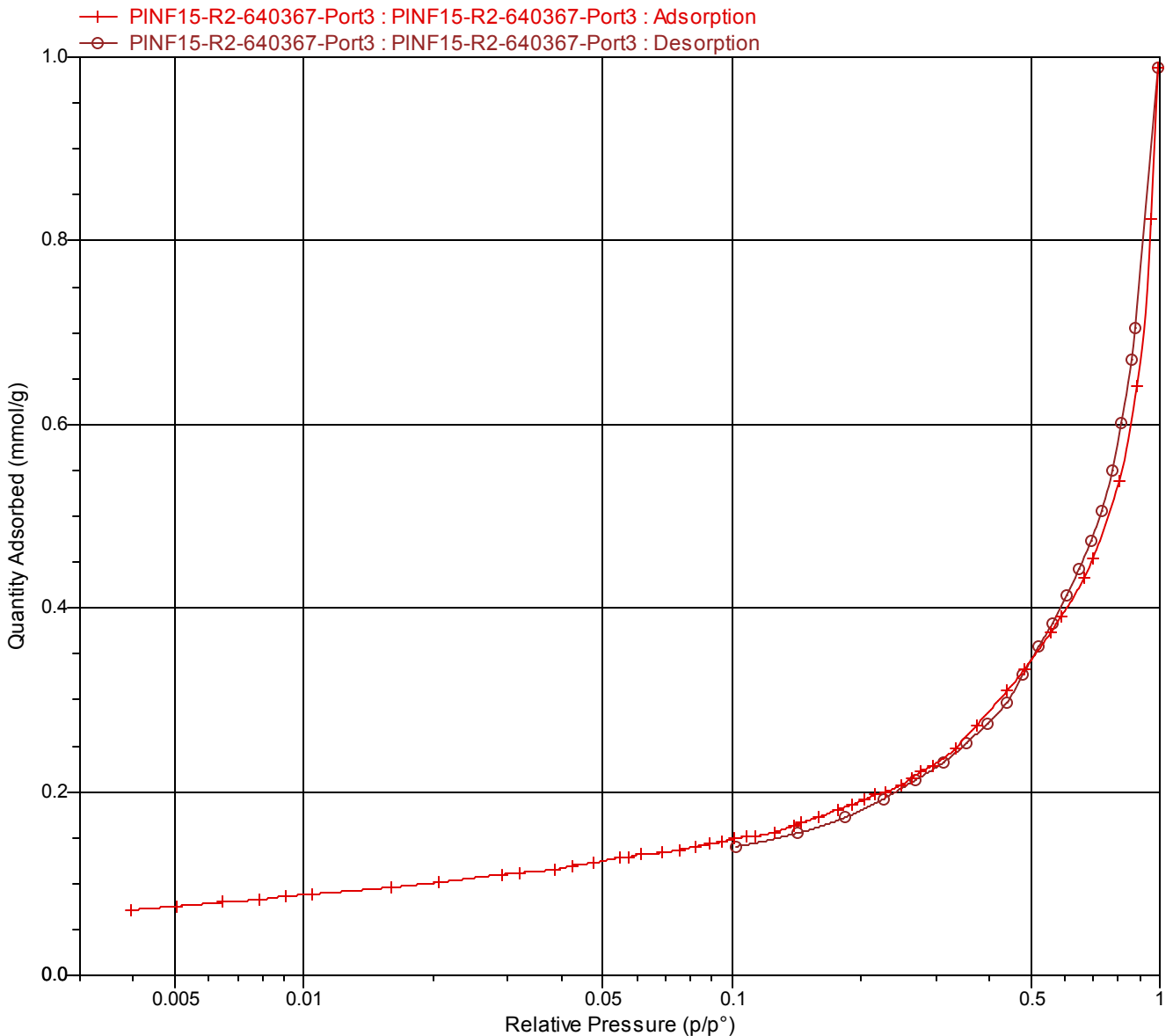
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Log Plot





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 8 of 51

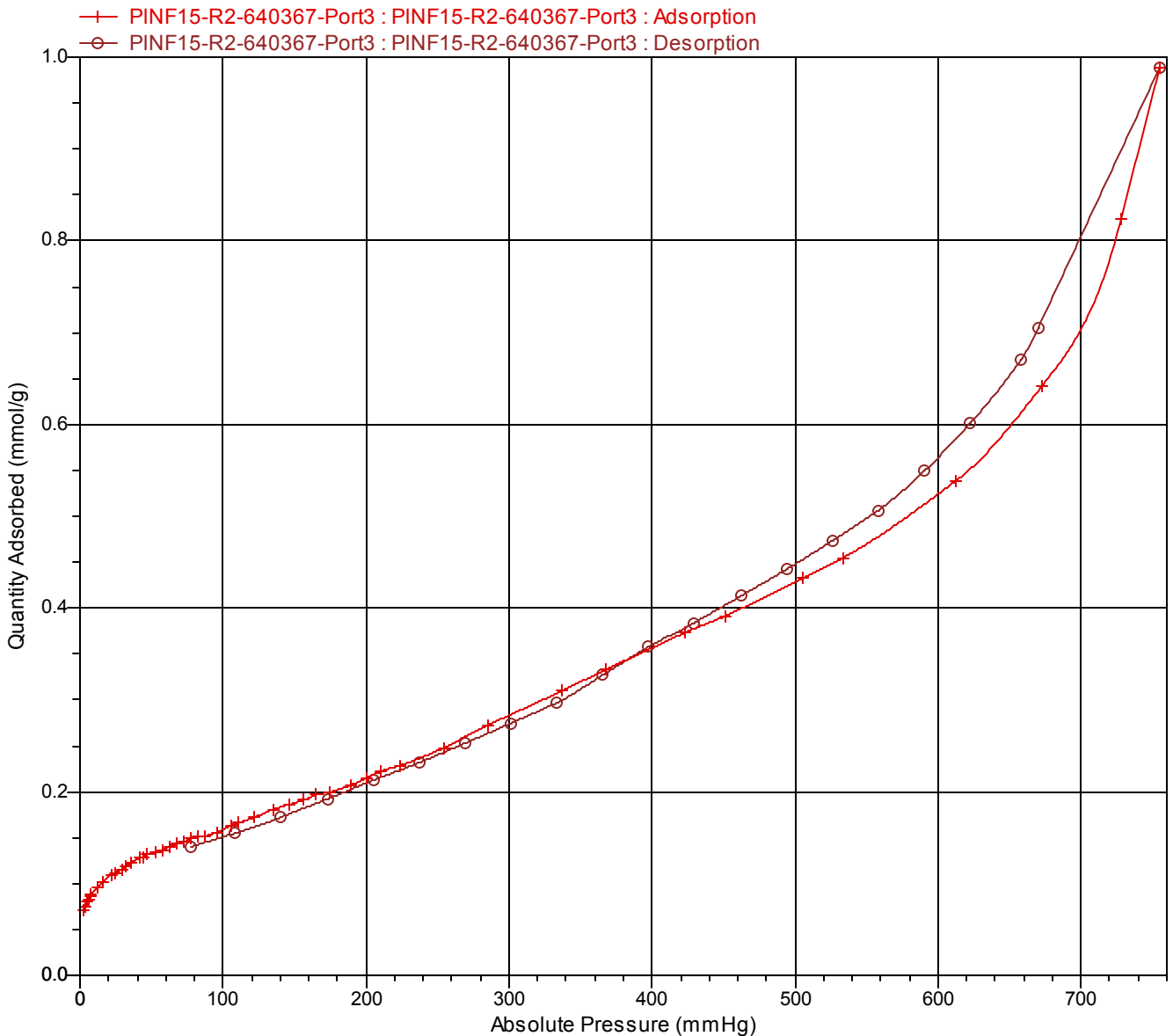
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Linear Absolute Plot





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 9 of 51

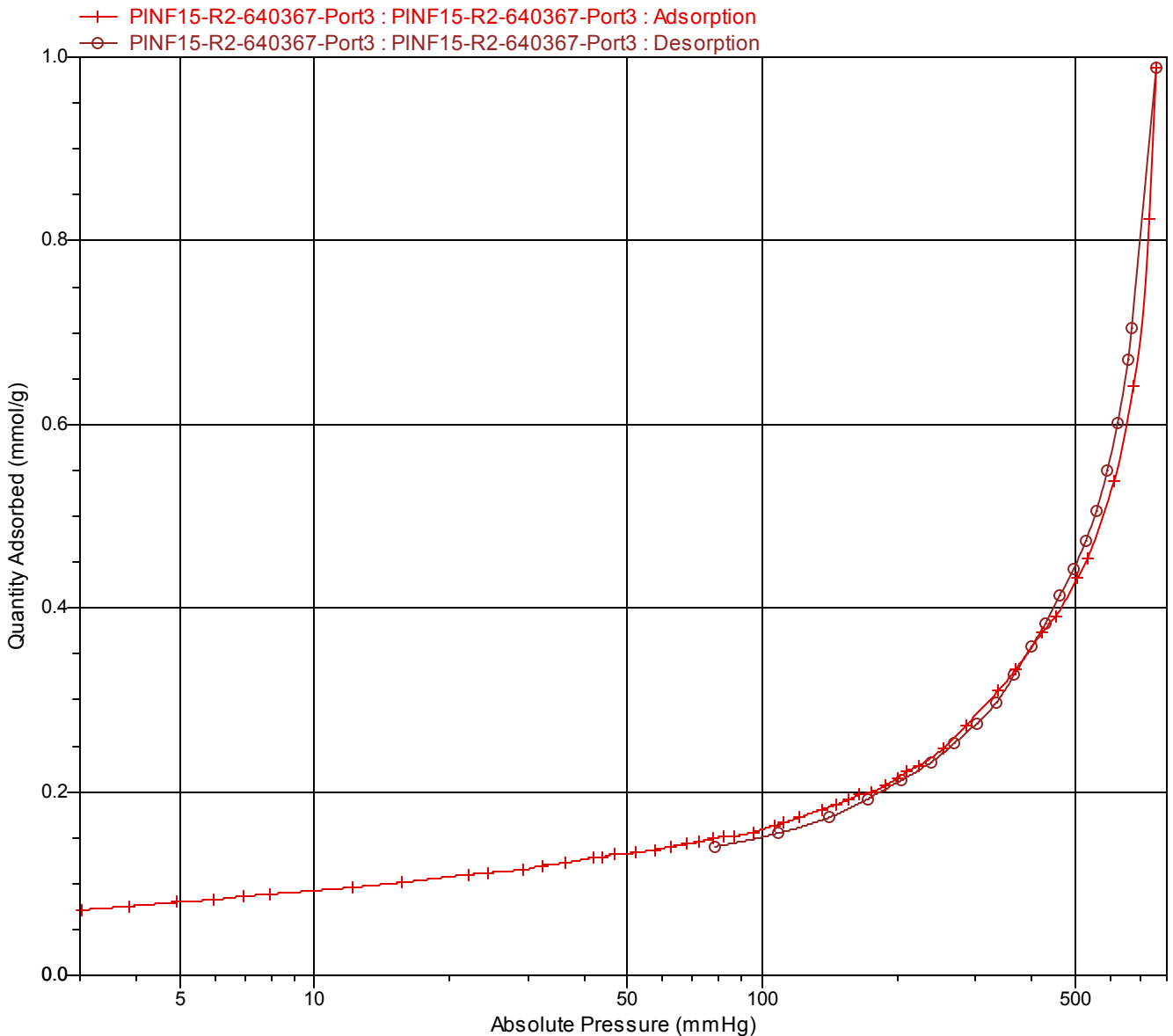
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Log Absolute Plot





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 10 of 51

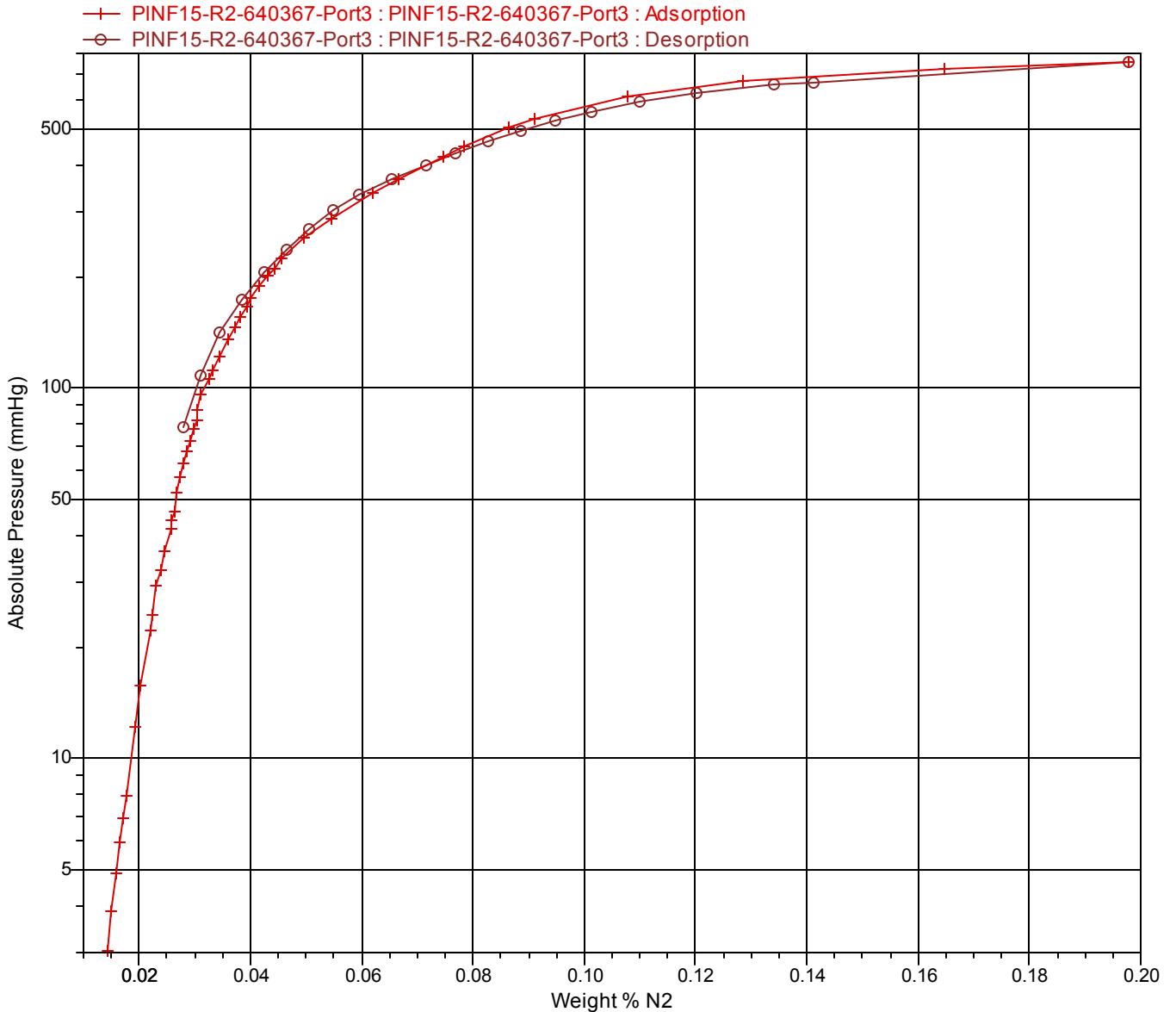
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□C □□min

Isotherm Pressure Composition





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 11 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                         Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**BET Report**

BET surface area: 14.8494 ± 0.2037 m<sup>2</sup>/g  
Slope: 6.49211 ± 0.08973 g/mmol  
Y-intercept: 0.07781 ± 0.00851 g/mmol  
C: 84.433773  
Qm: 0.15221 mmol/g  
Correlation coefficient: 0.9972418  
Molecular cross-sectional area: 0.1620 nm<sup>2</sup>

Relative Pressure (p/p <sup>o</sup> )	Quantity Adsorbed (mmol/g)	1/[Q(p <sup>o</sup> /p - 1)]
0.003963025	0.07122	0.05586
0.005068616	0.07522	0.06773
0.006454485	0.07953	0.08168
0.007847142	0.08227	0.09614
0.009117676	0.08626	0.10667
0.010441269	0.08832	0.11946
0.015998735	0.09582	0.16968
0.020680579	0.10115	0.20878
0.029035638	0.10979	0.27237
0.032078221	0.11167	0.29678
0.038420848	0.11493	0.34764
0.042453196	0.11959	0.37071
0.047581370	0.12252	0.40777
0.054973051	0.12835	0.45323
0.057465176	0.12896	0.47277
0.061162581	0.13227	0.49252
0.068703645	0.13345	0.55280
0.075550365	0.13680	0.59741
0.082166505	0.14032	0.63800
0.088615660	0.14288	0.68051
0.094774573	0.14545	0.71980
0.101607395	0.14875	0.76030
0.107781274	0.15152	0.79724
0.113950399	0.15180	0.84720
0.125839090	0.15588	0.92347
0.139434423	0.16307	0.99360
0.145747931	0.16607	1.02738
0.159124136	0.17207	1.09977
0.177631812	0.18068	1.19546



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 12 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

Relative Pressure (p/p°)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	1/[Q(p°/p - 1)]
0.191317927	0.18608	1.27137
0.204145573	0.19084	1.34410



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 13 of 51

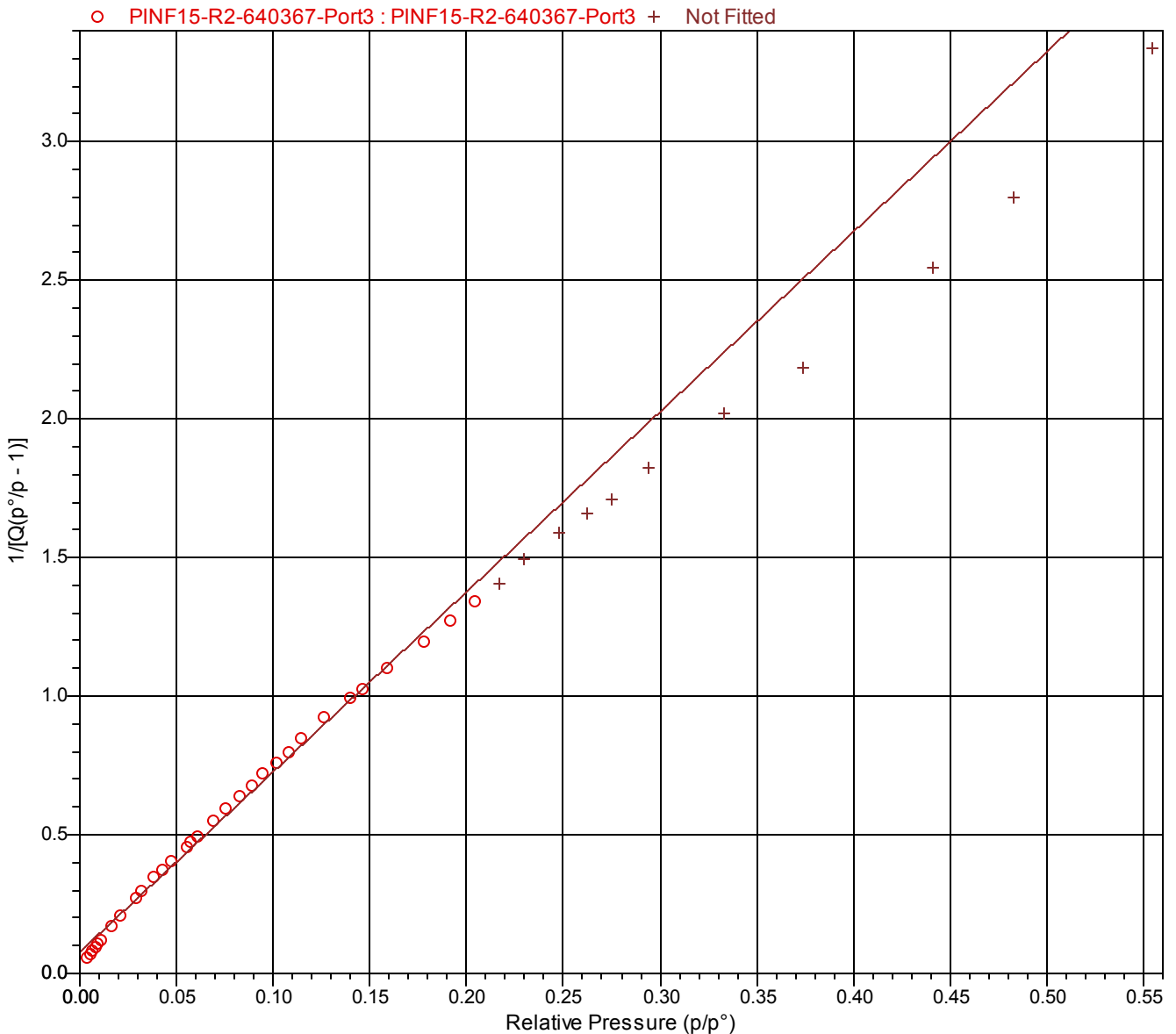
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

BET Surface Area Plot





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 14 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                         Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Langmuir Report

Langmuir surface area: 20.2712 ± 0.6127 m<sup>2</sup>/g  
Slope: 4.81269 ± 0.14547 g/mmol  
Y-intercept: 99.19 ± 12.62 g/mmol·mmHg  
b: 0.048520 1/mmHg  
Qm: 0.20778 mmol/g  
Correlation coefficient: 0.985694  
Molecular cross-sectional area: 0.1620 nm<sup>2</sup>

Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	p/Q (g/mmol·mmHg)
3.018313	0.07122	42.38
3.860230	0.07522	51.32
4.915252	0.07953	61.80
5.976118	0.08227	72.64
6.943783	0.08626	80.50
7.953136	0.08832	90.04
12.187099	0.09582	127.19
15.753960	0.10115	155.75
22.120550	0.10979	201.48
24.438408	0.11167	218.85
29.275019	0.11493	254.71
32.347980	0.11959	270.48
36.259510	0.12252	295.96
41.895676	0.12835	326.42
43.801186	0.12896	339.65
46.621876	0.13227	352.47
52.371979	0.13345	392.44
57.592831	0.13680	421.01
62.634518	0.14032	446.38
67.555443	0.14288	472.81
72.250237	0.14545	496.72
77.466721	0.14875	520.77
82.180412	0.15152	542.36
86.881310	0.15180	572.34
95.941246	0.15588	615.47
106.312126	0.16307	651.94
111.130280	0.16607	669.19
121.328667	0.17207	705.11
135.441589	0.18068	749.61



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 15 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	p/Q (g/mmol·mmHg)
145.878845	0.18608	783.94
155.668015	0.19084	815.69
165.081772	0.19638	840.60
175.024307	0.19957	877.01
189.023087	0.20708	912.81



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 16 of 51

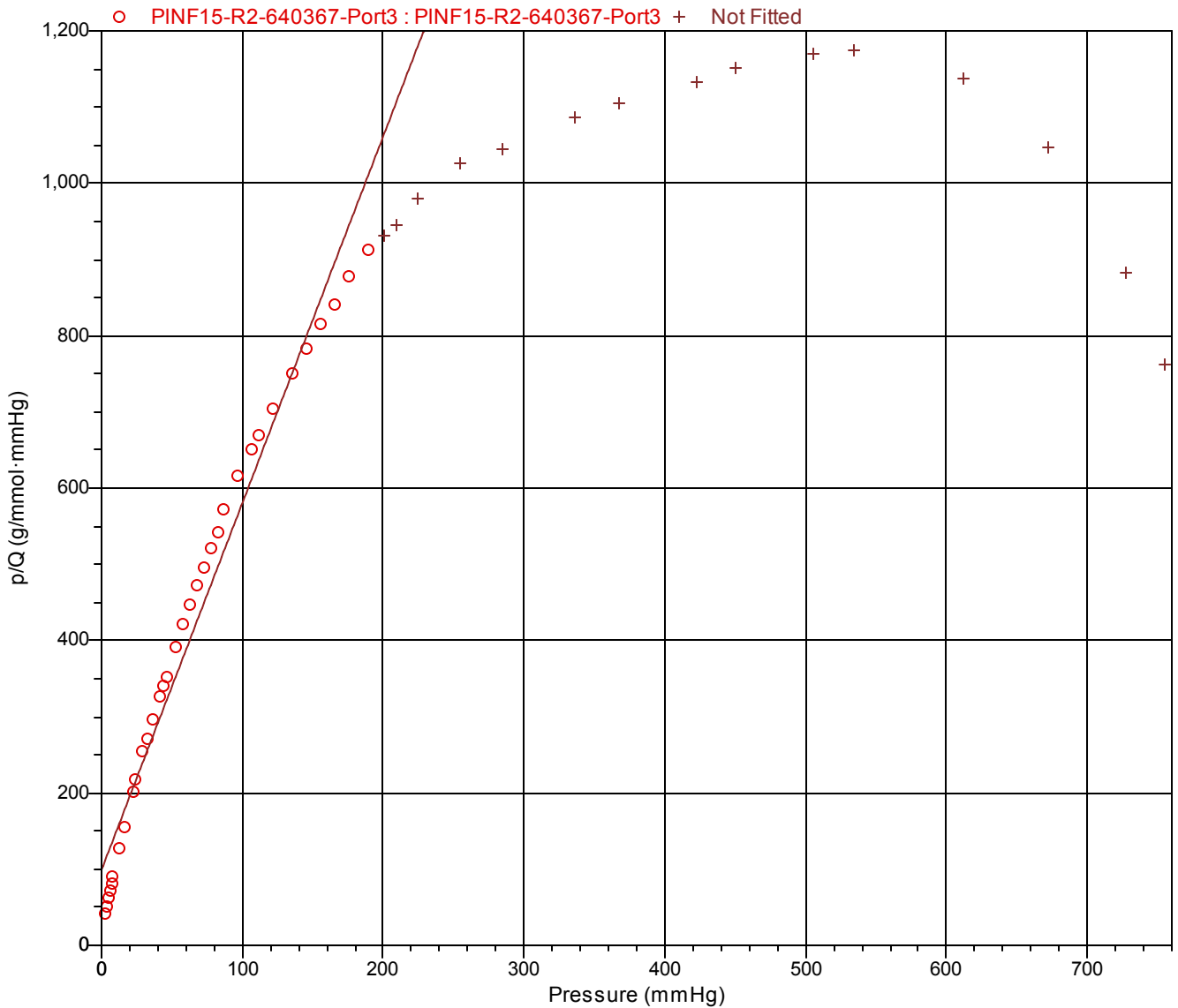
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing C min

Langmuir Surface Area Plot





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 17 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**t-Plot Report**

Micropore volume: -0.003132 cm<sup>3</sup>/g  
Micropore area: \*  
External surface area: 23.4734 m<sup>2</sup>/g  
Slope: 0.067534 ± 0.002260 mmol/g·Å  
Y-intercept: -0.090120 ± 0.005788 mmol/g  
Correlation coefficient: 0.997212  
Surface area correction factor: 1.000  
Density conversion factor: 0.0015507  
Total surface area (Langmuir): 20.2712 m<sup>2</sup>/g  
Thickness range: 2.2800 to 2.7958 Å  
Thickness equation: Harkins and Jura

**Thickness Curve**

$$t = [ 13.99 / ( 0.034 - \log(p/p^\circ) ) ] ^{0.5}$$

**t-Plot Report - Data**

Relative Pressure (p/p°)	Statistical Thickness (Å)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted
0.003963025	2.3965	0.07122	*
0.005068616	2.4508	0.07522	*
0.006454485	2.5080	0.07953	*
0.007847142	2.5573	0.08227	*
0.009117676	2.5971	0.08626	*
0.010441269	2.6348	0.08832	*
0.015998735	2.7650	0.09582	*
0.020680579	2.8533	0.10115	
0.029035638	2.9841	0.10979	
0.032078221	3.0261	0.11167	
0.038420848	3.1068	0.11493	
0.042453196	3.1543	0.11959	
0.047581370	3.2114	0.12252	
0.054973051	3.2883	0.12835	
0.057465176	3.3130	0.12896	
0.061162581	3.3488	0.13227	
0.068703645	3.4187	0.13345	
0.075550365	3.4792	0.13680	
0.082166505	3.5354	0.14032	
0.088615660	3.5884	0.14288	
0.094774573	3.6375	0.14545	



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 18 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

t-Plot Report - Data

Relative Pressure (p/p°)	Statistical Thickness (Å)	Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted
0.101607395	3.6907	0.14875	
0.107781274	3.7376	0.15152	
0.113950399	3.7835	0.15180	
0.125839090	3.8698	0.15588	
0.139434423	3.9656	0.16307	
0.145747931	4.0091	0.16607	
0.159124136	4.0999	0.17207	
0.177631812	4.2230	0.18068	
0.191317927	4.3125	0.18608	
0.204145573	4.3956	0.19084	
0.216473012	4.4750	0.19638	
0.229488328	4.5585	0.19957	
0.247832772	4.6760	0.20708	
0.262565355	4.7704	0.21502	
0.275111286	4.8511	0.22205	
0.293807105	4.9719	0.22855	
0.333352881	5.2319	0.24781	
0.373542015	5.5049	0.27261	
0.441016104	5.9928	0.30968	
0.482484316	6.3176	0.33304	
0.554584381	6.9452	0.37328	
0.591003318	7.3016	0.39148	
0.663201281	8.1167	0.43211	
0.699801706	8.6030	0.45486	

\* The micropore area is not reported because either the micropore volume is negative or the calculated external surface area is larger than the total surface area.



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

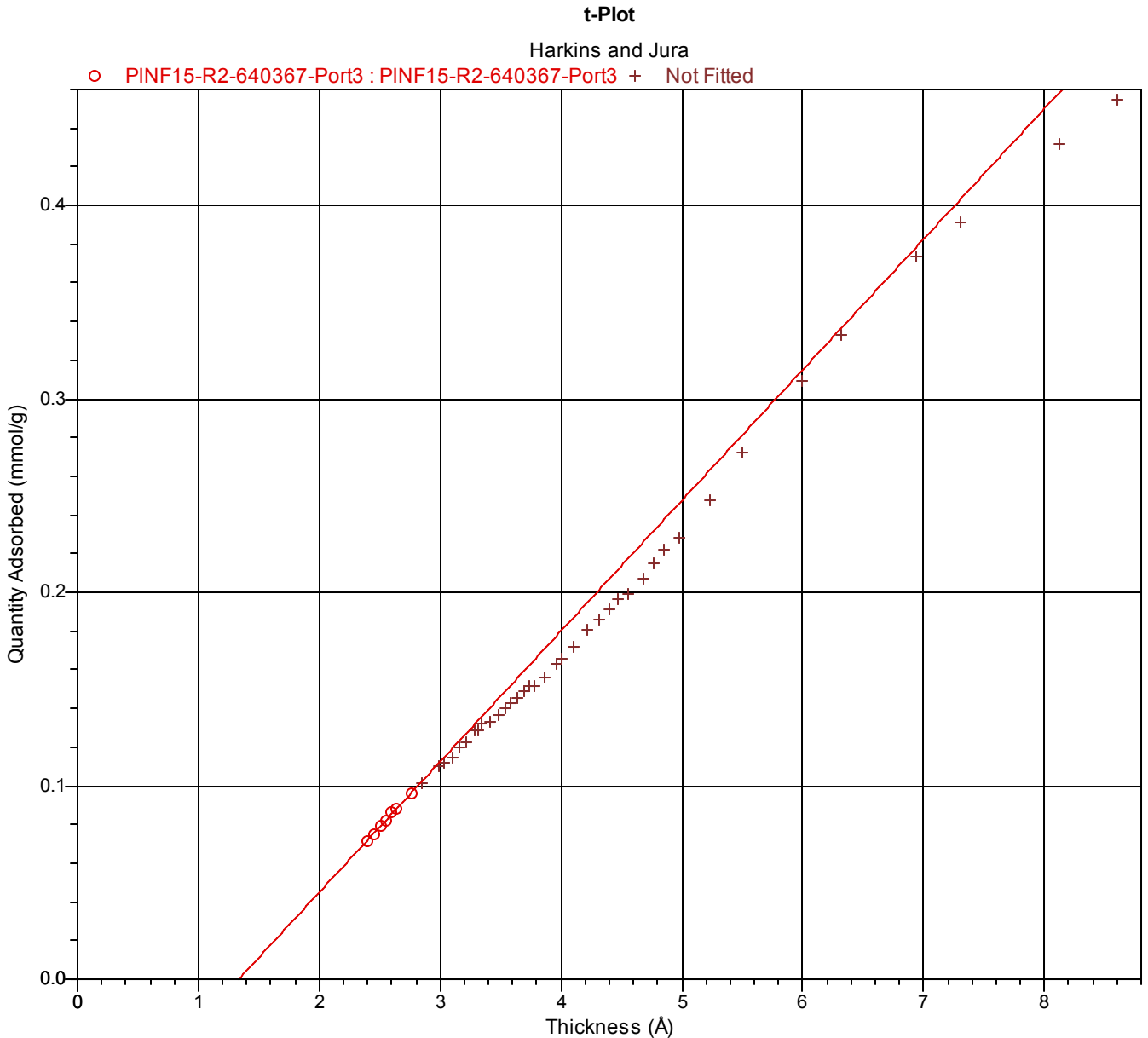
Page 19 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing C min





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 20 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                         Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**BJH Adsorption Pore Distribution Report**

Faas Correction

Harkins and Jura

$$t = [ 13.99 / ( 0.034 - \log(p/p^0) ) ] ^{0.5}$$

Width range: 17.000 to 3,000.000 Å

Adsorbate property factor: 9.53000 Å

Density conversion factor: 0.0015507

Fraction of pores open at both ends: 0.00

Pore Width Range (Å)	Average Width (Å)	Incremental Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Cumulative Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Incremental Pore Area (m <sup>2</sup> /g)	Cumulative Pore Area (m <sup>2</sup> /g)
1810.1 - 436.4	505.4	0.006495	0.006495	0.514	0.514
436.4 - 174.2	206.5	0.007854	0.014349	1.521	2.035
174.2 - 106.0	123.2	0.004493	0.018843	1.459	3.494
106.0 - 69.1	79.4	0.003633	0.022476	1.831	5.326
69.1 - 61.1	64.5	0.000945	0.023421	0.585	5.911
61.1 - 49.3	53.8	0.001726	0.025147	1.283	7.194
49.3 - 44.7	46.7	0.000759	0.025906	0.650	7.844
44.7 - 37.2	40.2	0.001855	0.027761	1.845	9.689
37.2 - 33.7	35.3	0.001099	0.028860	1.246	10.935
33.7 - 28.8	30.8	0.001745	0.030606	2.264	13.199
28.8 - 26.3	27.4	0.001238	0.031844	1.807	15.005
26.3 - 24.0	25.0	0.000793	0.032636	1.268	16.274
24.0 - 22.9	23.4	0.000154	0.032790	0.263	16.536
22.9 - 22.3	22.6	0.000325	0.033115	0.576	17.112
22.3 - 21.5	21.8	0.000349	0.033464	0.639	17.751
21.5 - 20.5	21.0	0.000223	0.033688	0.426	18.177
20.5 - 19.3	19.6	0.000188	0.033876	0.385	18.562
19.3 - 18.6	18.9	0.000100	0.033976	0.211	18.773
18.6 - 18.0	18.3	0.000129	0.034105	0.282	19.055
18.0 - 17.0	17.5	0.000278	0.034383	0.637	19.692



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 21 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

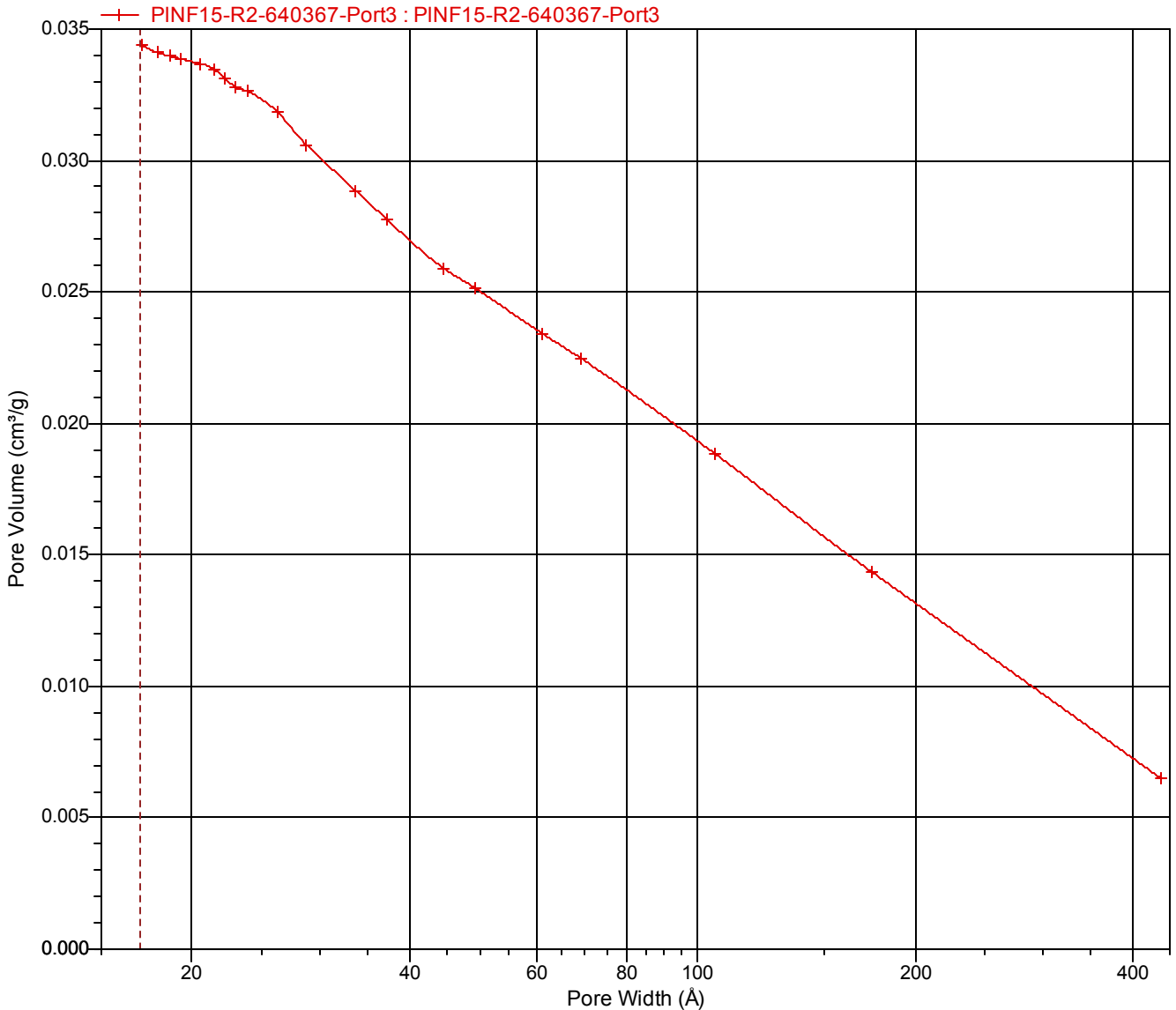
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

**BJH Adsorption Cumulative Pore Volume (Larger)**

Harkins and Jura : Faas Correction





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 22 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

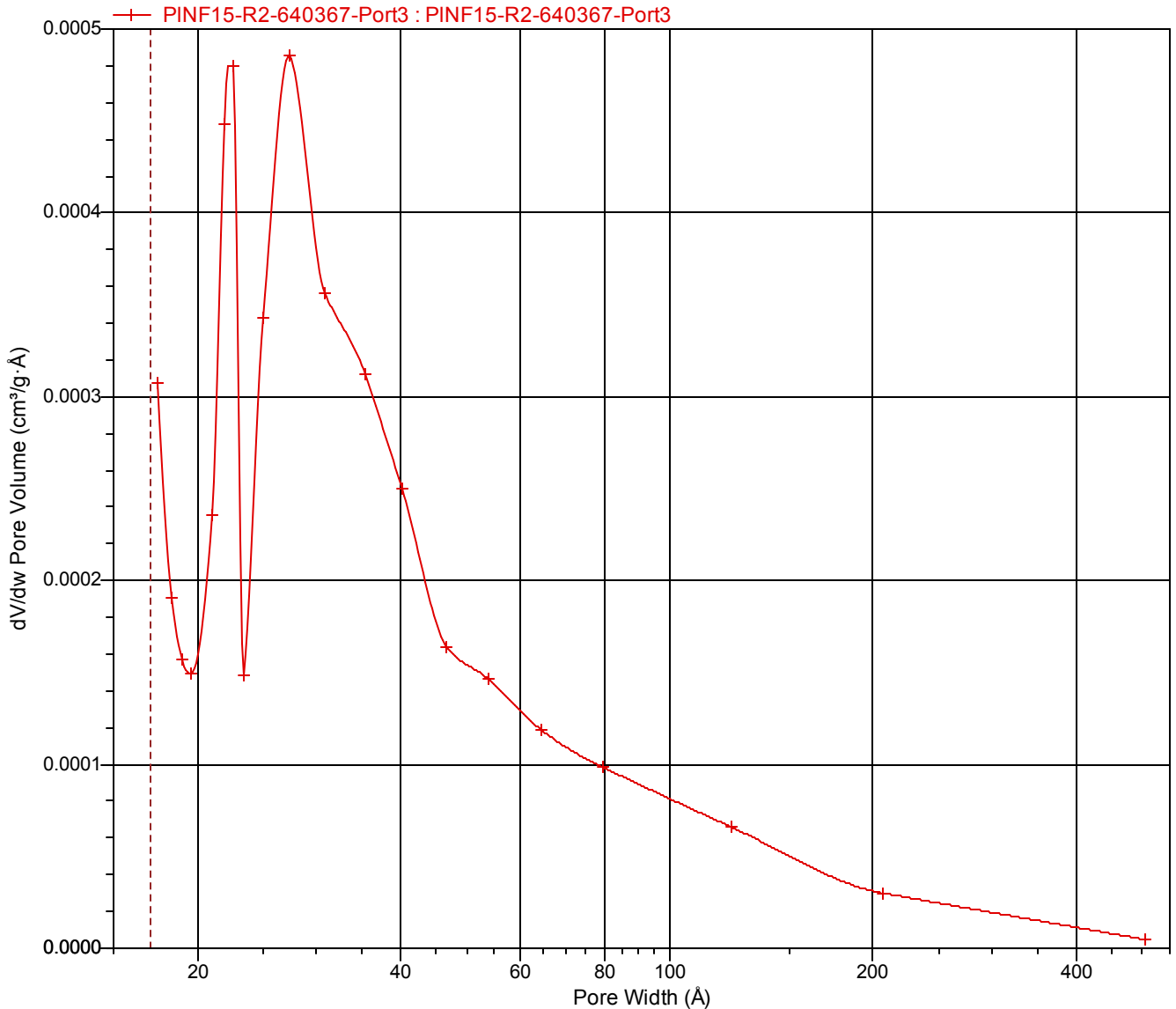
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing C min

BJH Adsorption dV/dw Pore Volume

Harkins and Jura : Faas Correction





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 23 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                         Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**BJH Desorption Pore Distribution Report**

Faas Correction

Harkins and Jura

$$t = [ 13.99 / ( 0.034 - \log(p/p^0) ) ] ^{0.5}$$

Width range: 17.000 to 3,000.000 Å

Adsorbate property factor: 9.53000 Å

Density conversion factor: 0.0015507

Fraction of pores open at both ends: 0.00

Pore Width Range (Å)	Average Width (Å)	Incremental Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Cumulative Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Incremental Pore Area (m <sup>2</sup> /g)	Cumulative Pore Area (m <sup>2</sup> /g)
1809.6 - 170.0	181.7	0.012881	0.012881	2.836	2.836
170.0 - 149.9	158.6	0.001481	0.014362	0.374	3.210
149.9 - 112.9	125.8	0.002867	0.017229	0.911	4.121
112.9 - 91.8	100.0	0.002189	0.019418	0.876	4.997
91.8 - 77.2	83.1	0.001776	0.021194	0.855	5.852
77.2 - 66.3	70.8	0.001332	0.022527	0.753	6.604
66.3 - 57.7	61.3	0.001278	0.023804	0.833	7.437
57.7 - 50.9	53.9	0.001213	0.025017	0.901	8.338
50.9 - 45.2	47.7	0.001280	0.026298	1.074	9.412
45.2 - 40.5	42.5	0.001092	0.027389	1.027	10.439
40.5 - 36.4	38.2	0.001438	0.028827	1.505	11.944
36.4 - 32.9	34.5	0.001383	0.030211	1.605	13.548
32.9 - 29.7	31.1	0.000843	0.031054	1.083	14.631
29.7 - 26.9	28.2	0.000822	0.031876	1.166	15.797
26.9 - 24.4	25.5	0.000761	0.032637	1.192	16.990
24.4 - 22.1	23.1	0.000619	0.033256	1.071	18.061
22.1 - 19.8	20.8	0.000651	0.033907	1.251	19.312
19.8 - 17.7	18.7	0.000617	0.034523	1.322	20.634



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 24 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

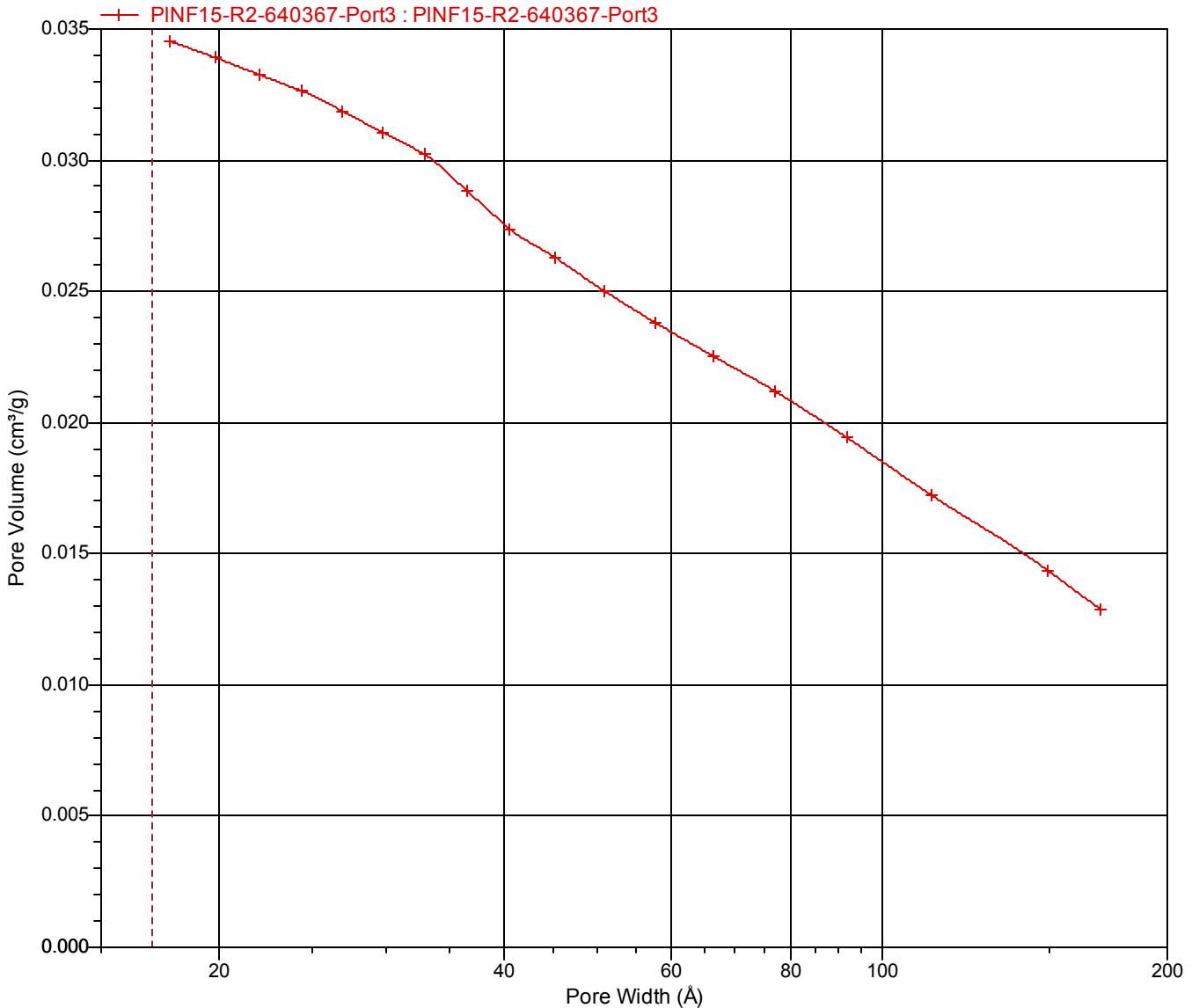
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing C min

**BJH Desorption Cumulative Pore Volume (Larger)**

Harkins and Jura : Faas Correction





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 25 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

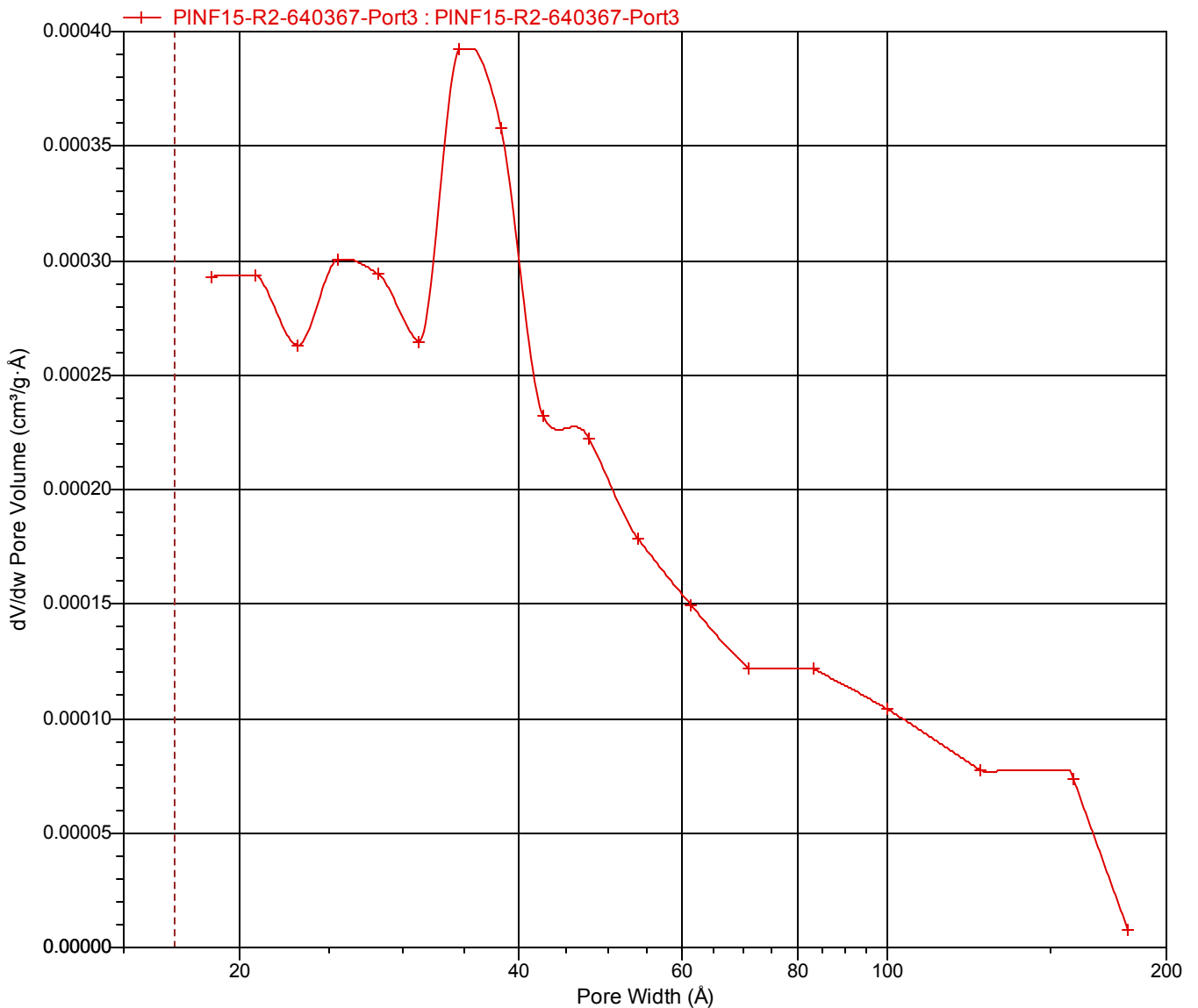
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing C min

**BJH Desorption dV/dw Pore Volume**

Harkins and Jura : Faas Correction





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 26 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Porosity Distribution by Invalid  
Model: N2 - DFT Model  
Method: Non-negative Regularization: 0.00000  
Standard Deviation of Fit: 0.003339 mmol/g

Volume in Pores < 12.69 Å : 0.00000 cm<sup>3</sup>/g  
Total Volume in Pores <= 1,172.33 Å : 0.02517 cm<sup>3</sup>/g  
Area in Pores > 1,172.33 Å : 2.635 m<sup>2</sup>/g  
Total Area in Pores >= 12.69 Å : 9.758 m<sup>2</sup>/g

**Pore Table**

Pore Width (Å)	Cumulative Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Incremental Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Cumulative Pore Area (m <sup>2</sup> /g)	Incremental Pore Area (m <sup>2</sup> /g)
12.69	0.00000	0.00000	0.000	0.000
13.58	0.00000	0.00000	0.000	0.000
14.83	0.00005	0.00005	0.065	0.065
15.91	0.00029	0.00024	0.371	0.306
17.16	0.00031	0.00001	0.387	0.016
18.59	0.00031	0.00000	0.387	0.000
20.02	0.00031	0.00000	0.387	0.000
21.62	0.00031	0.00000	0.387	0.000
23.41	0.00031	0.00000	0.387	0.000
25.20	0.00065	0.00035	0.662	0.275
27.34	0.00112	0.00046	1.002	0.339
29.49	0.00180	0.00069	1.469	0.467
31.81	0.00249	0.00068	1.897	0.429
34.31	0.00363	0.00114	2.565	0.667
36.99	0.00444	0.00081	3.000	0.435
40.03	0.00528	0.00085	3.424	0.424
43.25	0.00614	0.00085	3.818	0.394
46.64	0.00695	0.00081	4.165	0.347
50.40	0.00761	0.00067	4.429	0.264
54.33	0.00829	0.00068	4.679	0.250
58.80	0.00892	0.00063	4.894	0.215
63.44	0.00953	0.00061	5.086	0.193
68.45	0.01019	0.00065	5.277	0.191
73.99	0.01077	0.00059	5.436	0.159
79.88	0.01137	0.00060	5.585	0.149
86.32	0.01207	0.00070	5.748	0.163
93.11	0.01273	0.00065	5.888	0.140



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 27 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Pore Width (Å)	Pore Table			
	Cumulative Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Incremental Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Cumulative Pore Area (m <sup>2</sup> /g)	Incremental Pore Area (m <sup>2</sup> /g)
100.61	0.01332	0.00060	6.007	0.119
108.66	0.01397	0.00064	6.126	0.118
117.23	0.01461	0.00064	6.235	0.110
126.53	0.01523	0.00062	6.333	0.098
136.71	0.01581	0.00058	6.418	0.084
147.61	0.01632	0.00052	6.488	0.070
159.41	0.01680	0.00047	6.547	0.059
172.10	0.01726	0.00047	6.601	0.054
185.86	0.01775	0.00048	6.654	0.052
200.69	0.01826	0.00051	6.705	0.051
216.60	0.01881	0.00055	6.756	0.051
233.93	0.01941	0.00059	6.807	0.051
252.52	0.02003	0.00063	6.856	0.050
272.71	0.02068	0.00064	6.903	0.047
294.51	0.02116	0.00048	6.936	0.033
317.92	0.02164	0.00048	6.966	0.030
343.30	0.02222	0.00059	7.000	0.034
370.64	0.02274	0.00051	7.028	0.028
400.31	0.02319	0.00046	7.051	0.023
432.30	0.02350	0.00031	7.065	0.014
466.79	0.02378	0.00028	7.077	0.012
503.96	0.02411	0.00032	7.090	0.013
544.17	0.02437	0.00026	7.100	0.010
587.60	0.02454	0.00017	7.105	0.006
634.42	0.02467	0.00014	7.110	0.004
684.99	0.02484	0.00016	7.114	0.005
739.68	0.02494	0.00011	7.117	0.003
798.65	0.02503	0.00009	7.119	0.002
862.45	0.02511	0.00008	7.121	0.002
931.26	0.02515	0.00004	7.122	0.001
1005.60	0.02517	0.00001	7.122	0.000
1085.66	0.02517	0.00000	7.122	0.000
1172.33	0.02517	0.00000	7.122	0.000



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 28 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Porosity Distribution by Invalid  
Model: N2 - DFT Model  
Method: Non-negative Regularization: 0.00000  
Standard Deviation of Fit: 0.003339 mmol/g

Isotherm Table

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.004594232	0.07356	0.08507	-0.01151	-0.156514
0.005915212	0.07797	0.08746	-0.00949	-0.121710
0.007526182	0.08159	0.08972	-0.00813	-0.099629
0.009468212	0.08686	0.09191	-0.00504	-0.058063
0.011783670	0.09019	0.09406	-0.00387	-0.042959
0.014515520	0.09394	0.09624	-0.00230	-0.024453
0.017706521	0.09782	0.09903	-0.00120	-0.012299
0.021398440	0.10194	0.10138	0.00056	0.005468
0.025631230	0.10658	0.10392	0.00266	0.024923
0.030442240	0.11076	0.10943	0.00133	0.011988
0.035865448	0.11357	0.11242	0.00115	0.010106
0.041930798	0.11913	0.11589	0.00324	0.027215
0.048663601	0.12331	0.11956	0.00375	0.030414
0.056084011	0.12868	0.12370	0.00498	0.038730
0.064206667	0.13279	0.12839	0.00440	0.033132
0.073040441	0.13553	0.13363	0.00190	0.014006
0.082588248	0.14050	0.13931	0.00119	0.008477
0.092847057	0.14462	0.14519	-0.00057	-0.003934
0.103808001	0.14979	0.15102	-0.00123	-0.008188
0.115456402	0.15218	0.15659	-0.00440	-0.028930
0.127772301	0.15688	0.16182	-0.00494	-0.031491
0.140730694	0.16370	0.16670	-0.00301	-0.018372
0.154301897	0.16990	0.17129	-0.00138	-0.008143
0.168452203	0.17645	0.17563	0.00083	0.004682
0.183144197	0.18295	0.18460	-0.00165	-0.009015
0.198337302	0.18869	0.18858	0.00011	0.000596
0.213988706	0.19534	0.19246	0.00288	0.014741
0.230053306	0.19976	0.20306	-0.00329	-0.016491
0.246484801	0.20639	0.20686	-0.00047	-0.002270
0.263235897	0.21539	0.21069	0.00469	0.021781
0.280259013	0.22425	0.22485	-0.00059	-0.002652



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 29 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Isotherm Table**

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.297506303	0.23016	0.22879	0.00138	0.005978
0.314930797	0.23814	0.24339	-0.00525	-0.022058
0.332486212	0.24731	0.24755	-0.00023	-0.000945
0.350127310	0.25817	0.25191	0.00627	0.024270
0.367810607	0.26931	0.27438	-0.00507	-0.018837
0.385494202	0.27921	0.27886	0.00035	0.001245
0.403138310	0.28884	0.28346	0.00538	0.018639
0.420704991	0.29843	0.30080	-0.00238	-0.007967
0.438158900	0.30808	0.30522	0.00287	0.009302
0.455466807	0.31782	0.32329	-0.00547	-0.017221
0.472598106	0.32748	0.32731	0.00016	0.000502
0.489524394	0.33700	0.33119	0.00580	0.017224
0.506219923	0.34635	0.34903	-0.00268	-0.007727
0.522661209	0.35554	0.35253	0.00301	0.008461
0.538827300	0.36454	0.36971	-0.00517	-0.014186
0.554699600	0.37334	0.37294	0.00040	0.001060
0.570261598	0.38127	0.37614	0.00512	0.013432
0.585499227	0.38864	0.39091	-0.00227	-0.005837
0.600400090	0.39653	0.39403	0.00250	0.006309
0.614954293	0.40455	0.40929	-0.00474	-0.011717
0.629153311	0.41255	0.41240	0.00014	0.000344
0.642990828	0.42046	0.41559	0.00486	0.011567
0.656461716	0.42822	0.43033	-0.00211	-0.004919
0.669562697	0.43586	0.43358	0.00228	0.005225
0.682291925	0.44369	0.44823	-0.00454	-0.010239
0.694648683	0.45155	0.45147	0.00008	0.000182
0.706633508	0.45936	0.45469	0.00466	0.010148
0.718248010	0.46752	0.47017	-0.00265	-0.005667
0.729494929	0.47597	0.47319	0.00278	0.005837
0.740377605	0.48457	0.48744	-0.00287	-0.005930
0.750900388	0.49323	0.49024	0.00298	0.006050
0.761068285	0.50184	0.50473	-0.00289	-0.005753
0.770887017	0.51033	0.50735	0.00298	0.005845
0.780362606	0.51864	0.52406	-0.00542	-0.010457
0.789501607	0.52671	0.52658	0.00014	0.000257
0.798311174	0.53451	0.52910	0.00541	0.010114



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 30 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Isotherm Table

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.806798697	0.54214	0.54497	-0.00283	-0.005217
0.814971626	0.55040	0.54750	0.00290	0.005264
0.822837889	0.55924	0.56252	-0.00329	-0.005875
0.830405474	0.56847	0.56512	0.00335	0.005889
0.837682605	0.57792	0.58136	-0.00344	-0.005949
0.844677329	0.58748	0.58399	0.00349	0.005947
0.851397991	0.59702	0.60044	-0.00342	-0.005724
0.857852995	0.60646	0.60300	0.00347	0.005714
0.864050388	0.61573	0.61901	-0.00329	-0.005339
0.869998574	0.62475	0.62142	0.00333	0.005328
0.875705481	0.63350	0.63656	-0.00306	-0.004837
0.881179392	0.64192	0.63882	0.00310	0.004827
0.886428118	0.64994	0.65267	-0.00273	-0.004208
0.891459525	0.65762	0.65485	0.00276	0.004203
0.896281302	0.66513	0.66778	-0.00265	-0.003982
0.900900900	0.67262	0.66995	0.00267	0.003975
0.905325770	0.68019	0.68293	-0.00274	-0.004022
0.909563184	0.68792	0.68516	0.00276	0.004010
0.913620114	0.69585	0.69876	-0.00291	-0.004187
0.917503417	0.70402	0.70109	0.00293	0.004168
0.921219707	0.71245	0.71560	-0.00315	-0.004422
0.924775481	0.72113	0.71796	0.00317	0.004395
0.928177178	0.73006	0.73349	-0.00343	-0.004701
0.931430817	0.73923	0.73578	0.00345	0.004666
0.934542298	0.74861	0.75231	-0.00370	-0.004942
0.937517405	0.75819	0.75447	0.00371	0.004899
0.940361619	0.76793	0.77182	-0.00389	-0.005070
0.943080306	0.77780	0.77389	0.00391	0.005023
0.945678592	0.78778	0.79177	-0.00399	-0.005061
0.948161721	0.79783	0.79383	0.00400	0.005012
0.950534225	0.80793	0.80793	0.00000	0.000005
0.952800930	0.81805	0.82197	-0.00392	-0.004796
0.954966187	0.82811	0.82418	0.00393	0.004749
0.957034409	0.83781	0.84128	-0.00347	-0.004136
0.959009588	0.84707	0.84360	0.00347	0.004100
0.960896015	0.85592	0.85898	-0.00307	-0.003584



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 31 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Isotherm Table**

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.962697208	0.86436	0.86129	0.00307	0.003556
0.964416981	0.87242	0.87517	-0.00275	-0.003153
0.966058910	0.88012	0.87736	0.00276	0.003131
0.967626274	0.88747	0.88747	0.00000	0.000001
0.969122529	0.89448	0.89677	-0.00228	-0.002553
0.970550597	0.90118	0.89889	0.00229	0.002537
0.971913695	0.90757	0.90950	-0.00194	-0.002132
0.973214507	0.91367	0.91173	0.00194	0.002121
0.974455774	0.91949	0.92105	-0.00157	-0.001702
0.975640416	0.92504	0.92347	0.00157	0.001694
0.976770699	0.93034	0.93034	0.00000	0.000000
0.977849126	0.93539	0.93655	-0.00116	-0.001238
0.978878021	0.94022	0.93906	0.00116	0.001233
0.979859591	0.94482	0.94582	-0.00100	-0.001055
0.980795979	0.94921	0.94821	0.00100	0.001051
0.981689274	0.95340	0.95340	0.00000	0.000000
0.982541502	0.95739	0.95809	-0.00070	-0.000729
0.983354270	0.96120	0.96050	0.00070	0.000727
0.984129488	0.96484	0.96525	-0.00042	-0.000432
0.984869003	0.96830	0.96789	0.00042	0.000430
0.985574186	0.97161	0.97176	-0.00015	-0.000158
0.986246824	0.97476	0.97461	0.00015	0.000158
0.986888289	0.97777	0.97765	0.00012	0.000121
0.987500012	0.98064	0.98057	0.00007	0.000074
0.988083303	0.98337	0.98330	0.00008	0.000078
0.988639593	0.98598	0.98600	-0.00002	-0.000022
0.989170074	0.98847	0.98872	-0.00025	-0.000249



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 32 of 51

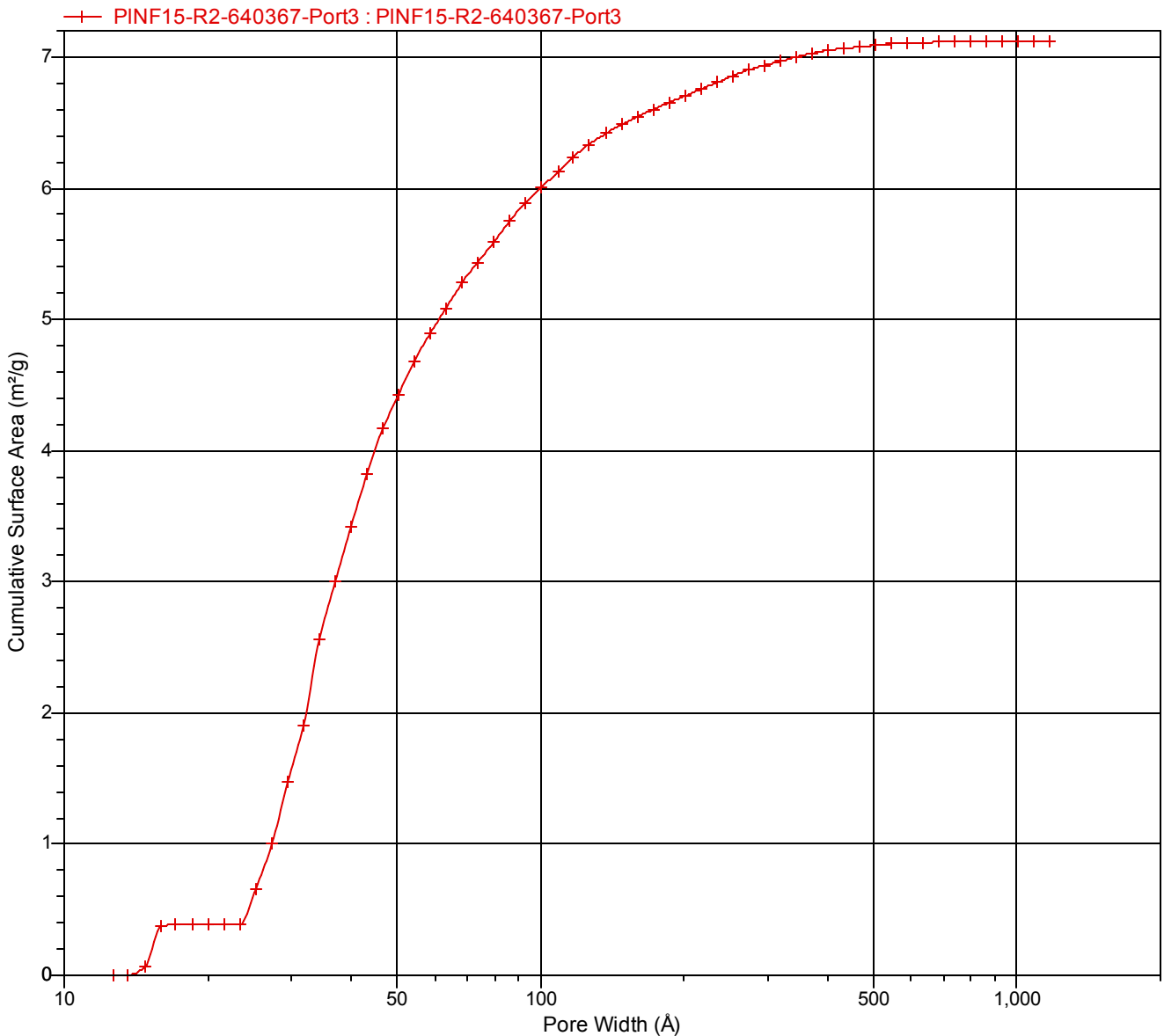
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Cumulative Surface Area vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 33 of 51

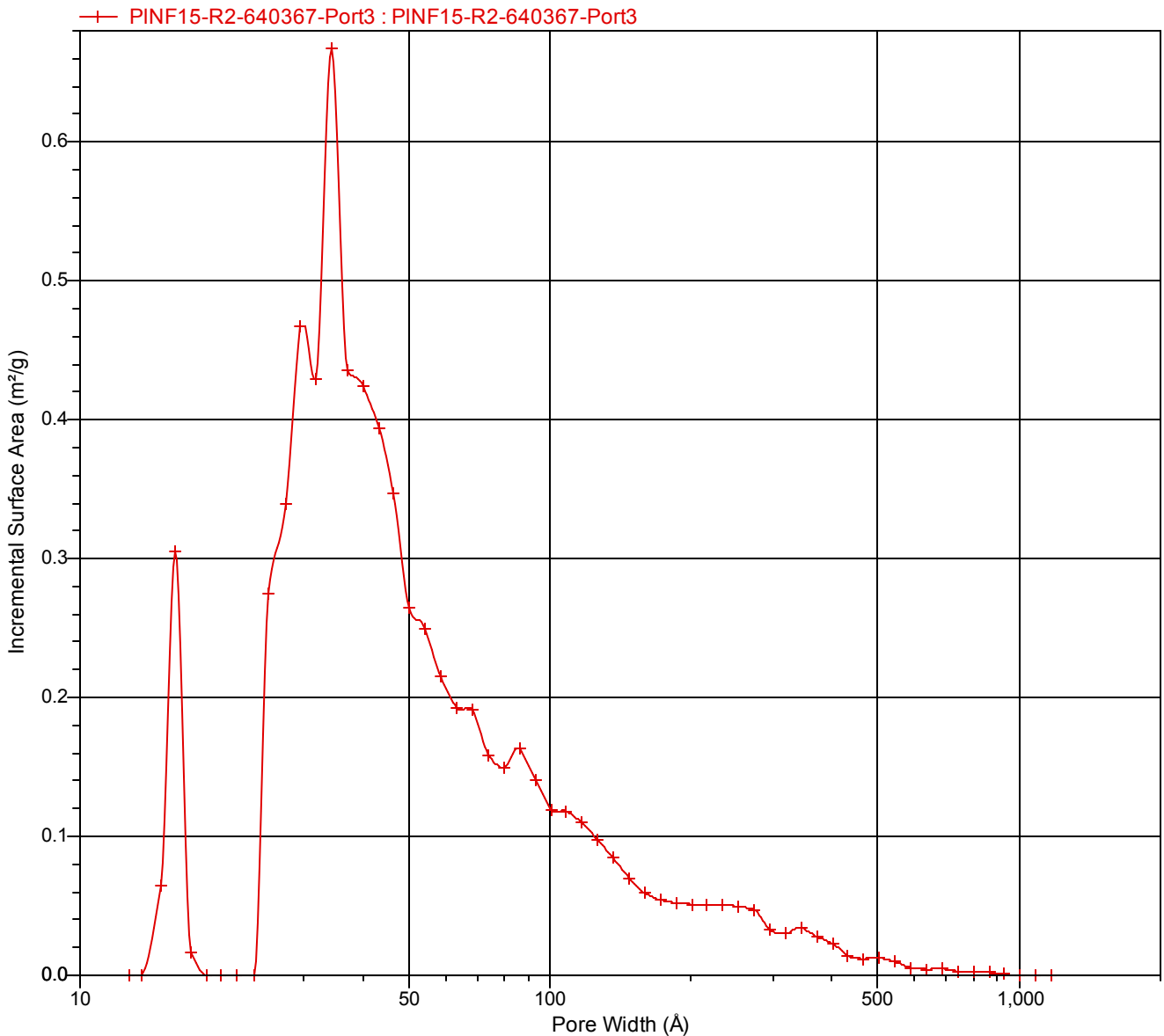
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Incremental Surface Area vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 34 of 51

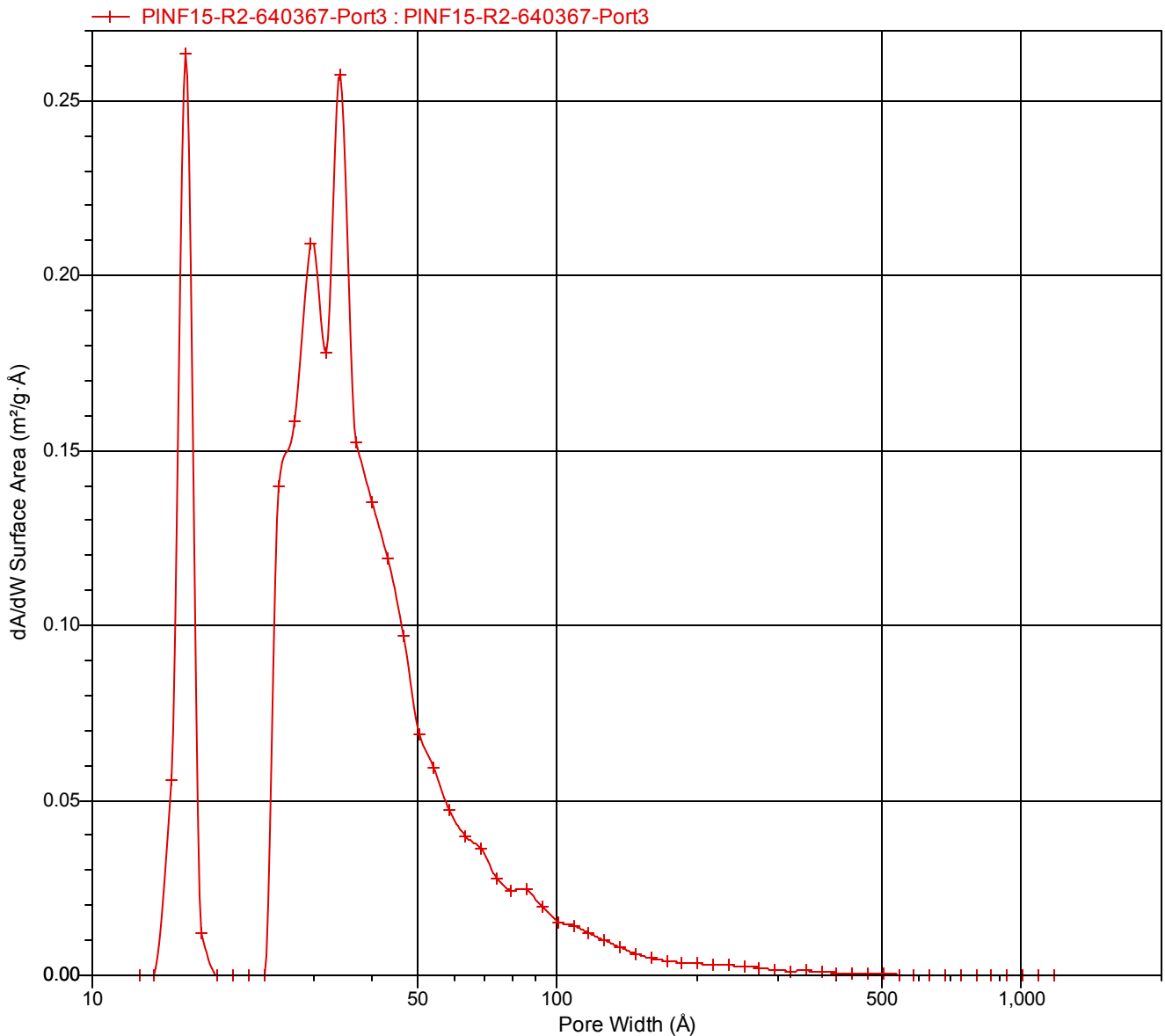
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

dA/dW Surface Area vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 35 of 51

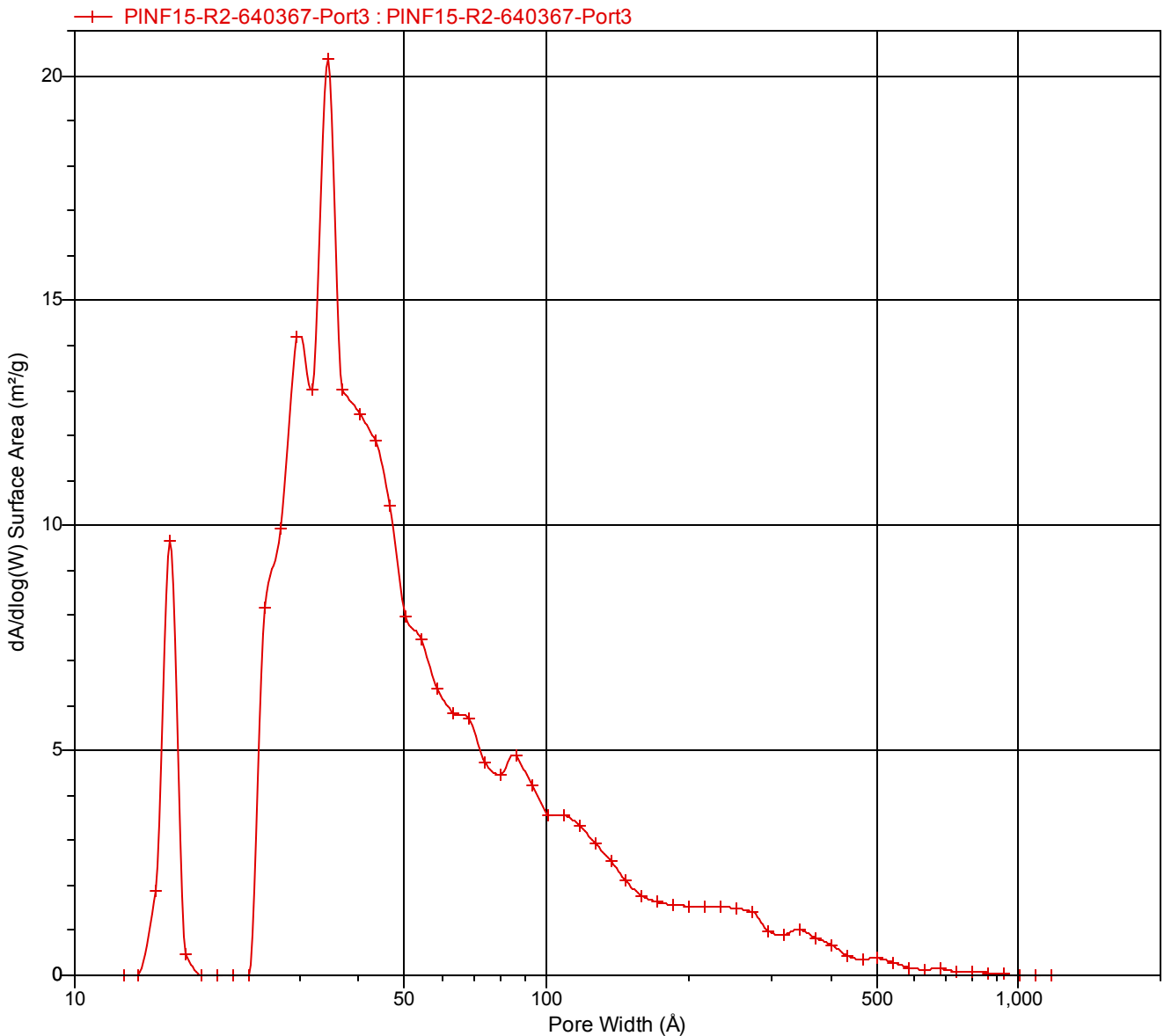
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

dA/dlog(W) Surface Area vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 36 of 51

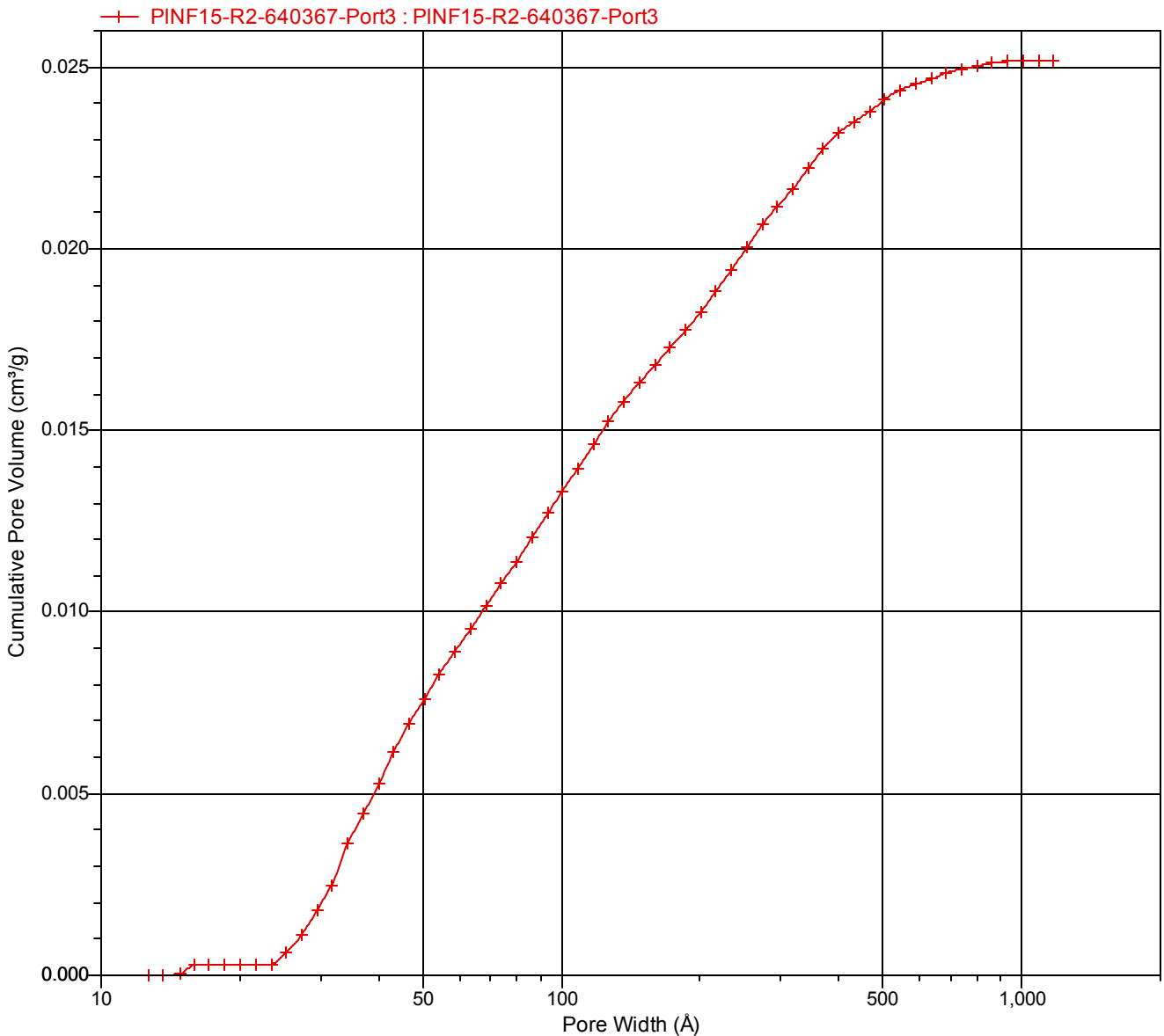
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Cumulative Pore Volume vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 37 of 51

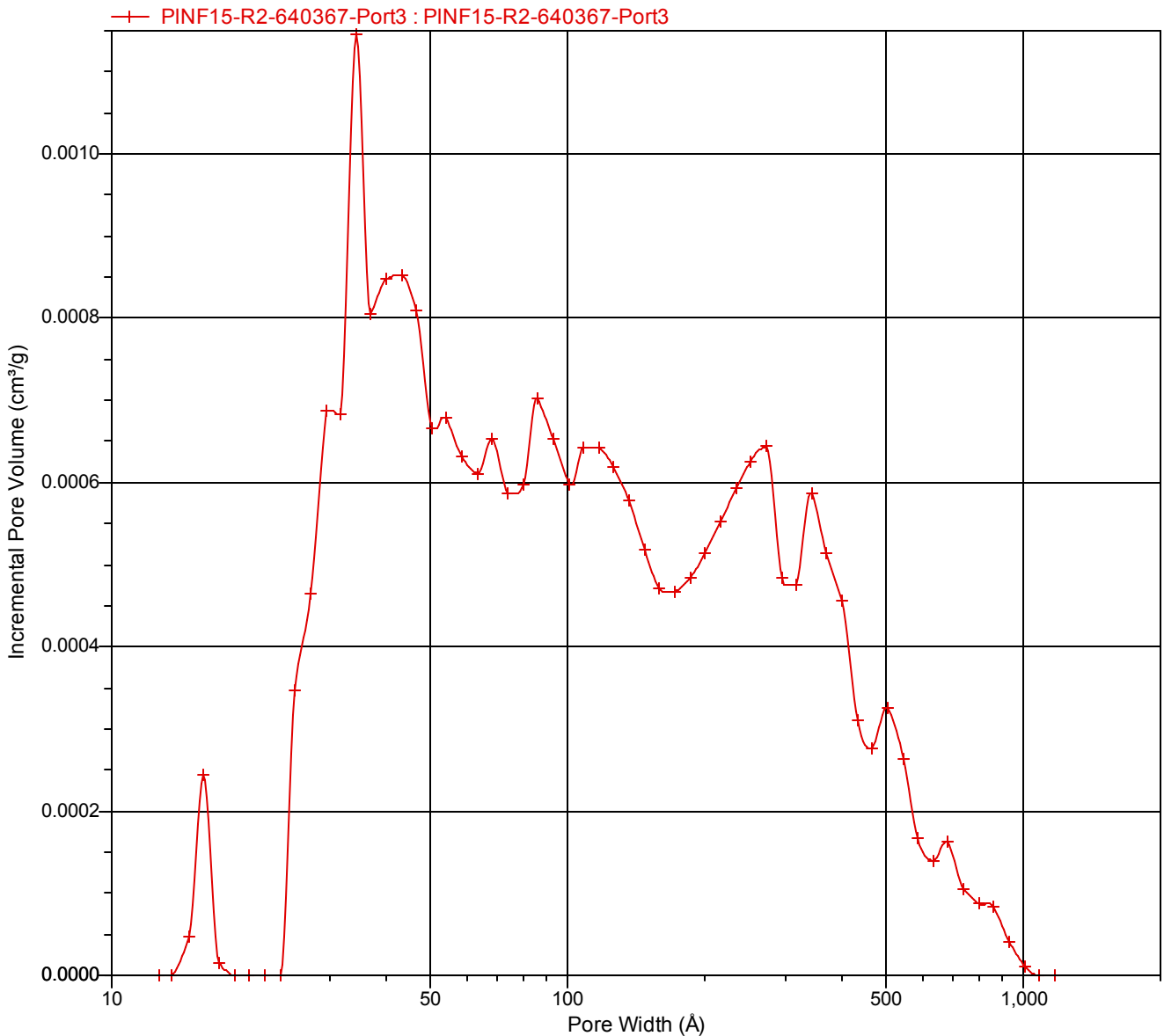
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Incremental Pore Volume vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 38 of 51

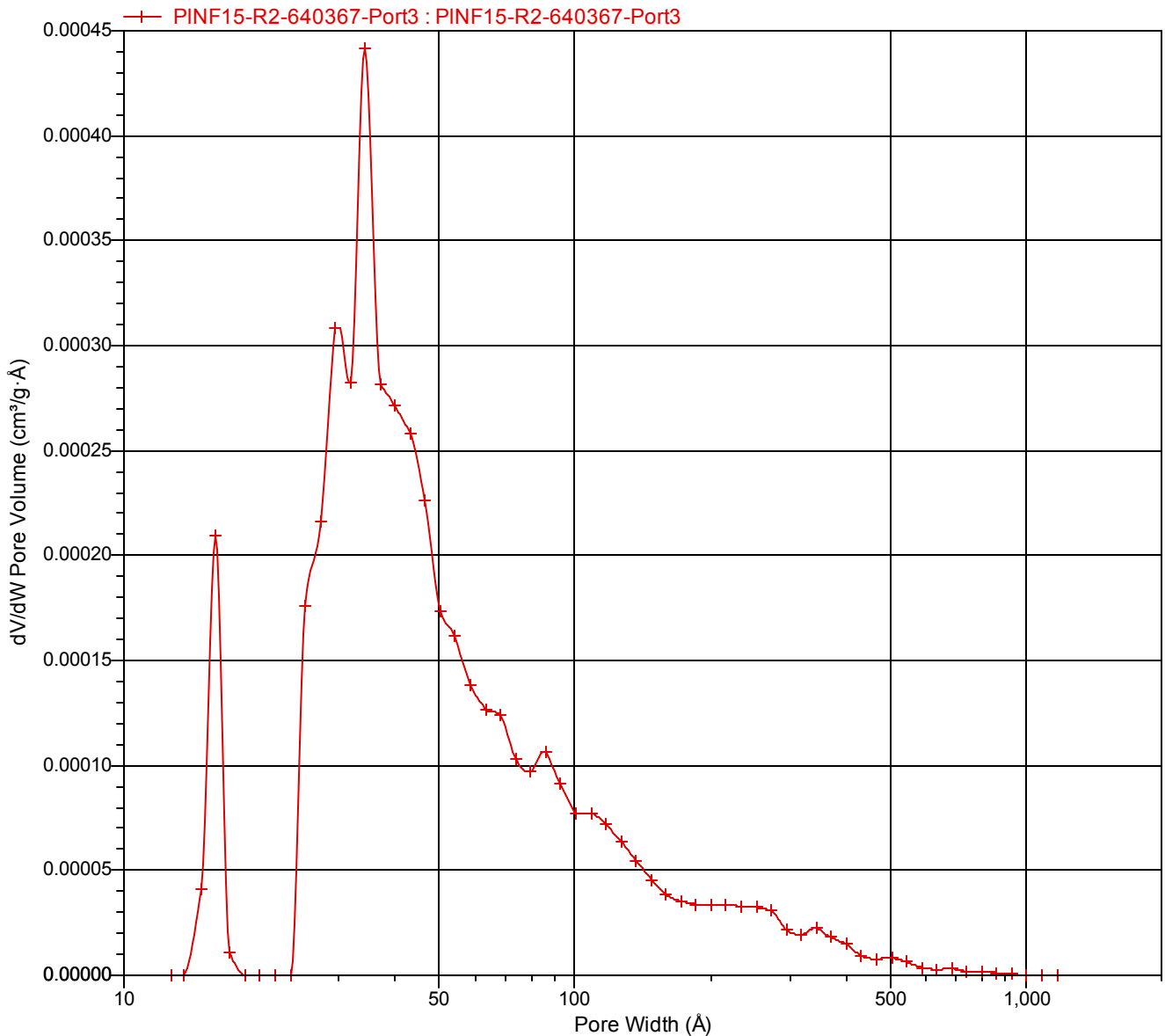
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

dV/dW Pore Volume vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 39 of 51

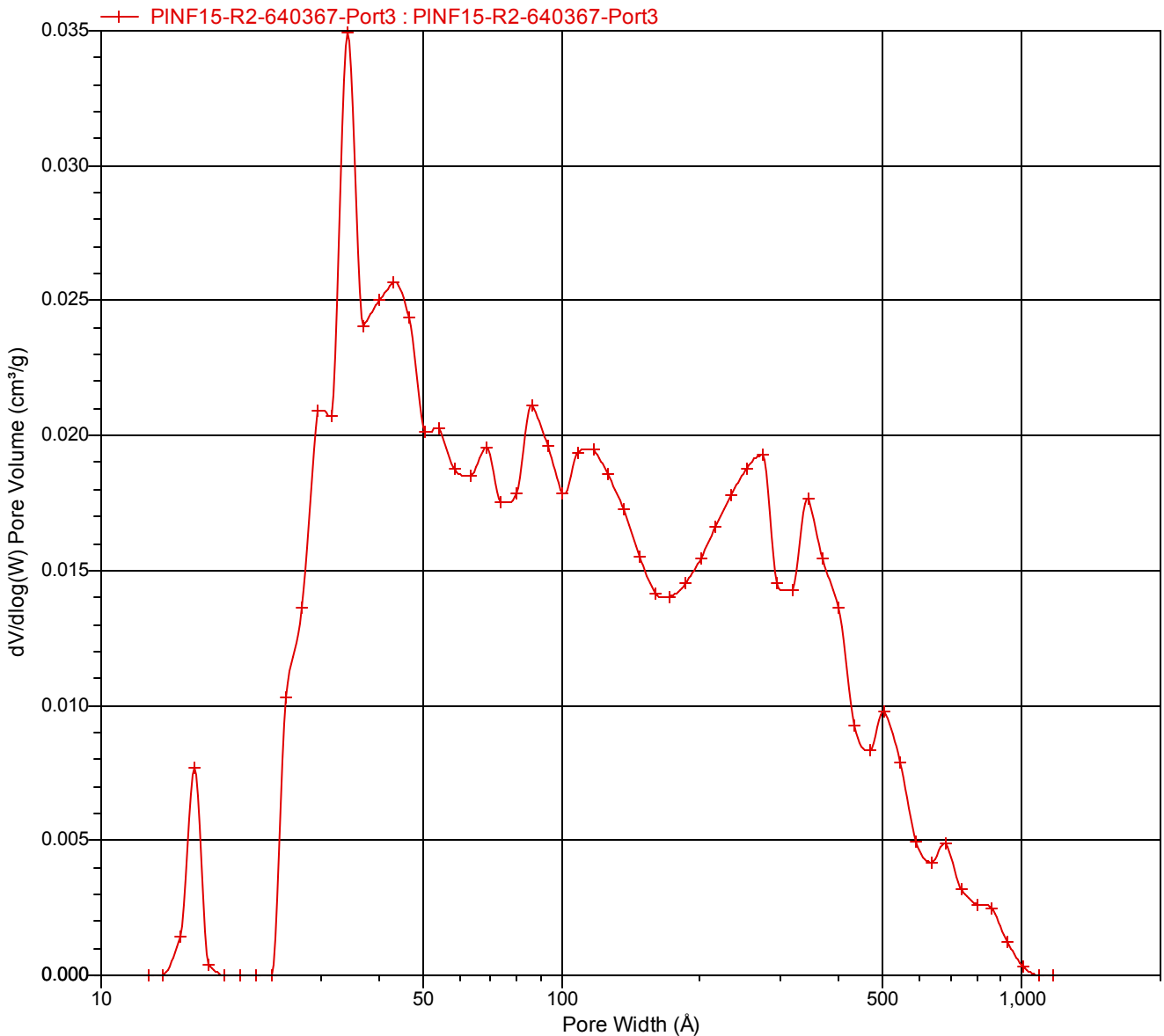
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□C □□min

dV/dlog(W) Pore Volume vs. Pore Width





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 40 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

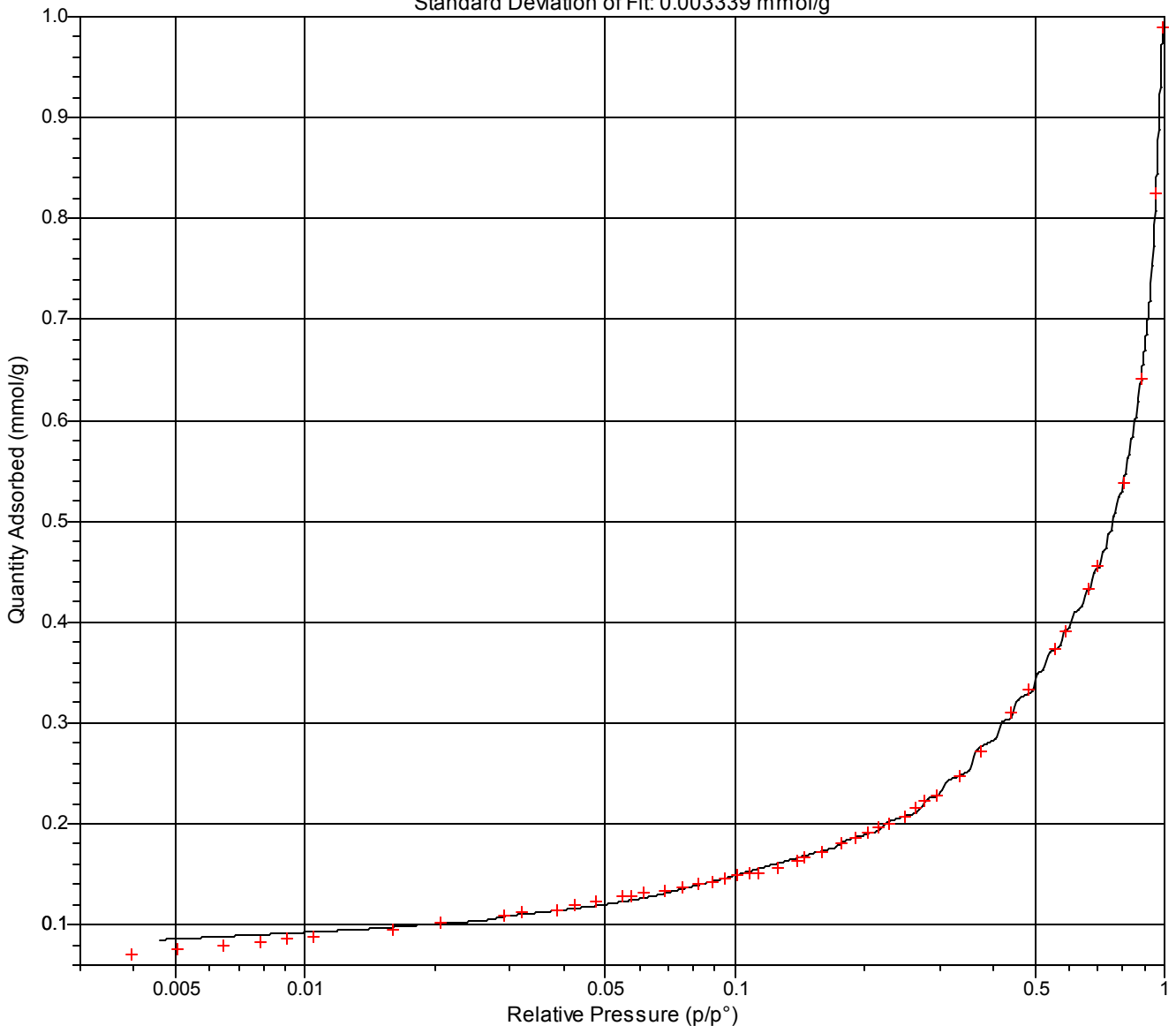
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Goodness of Fit

Standard Deviation of Fit: 0.003339 mmol/g





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 41 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

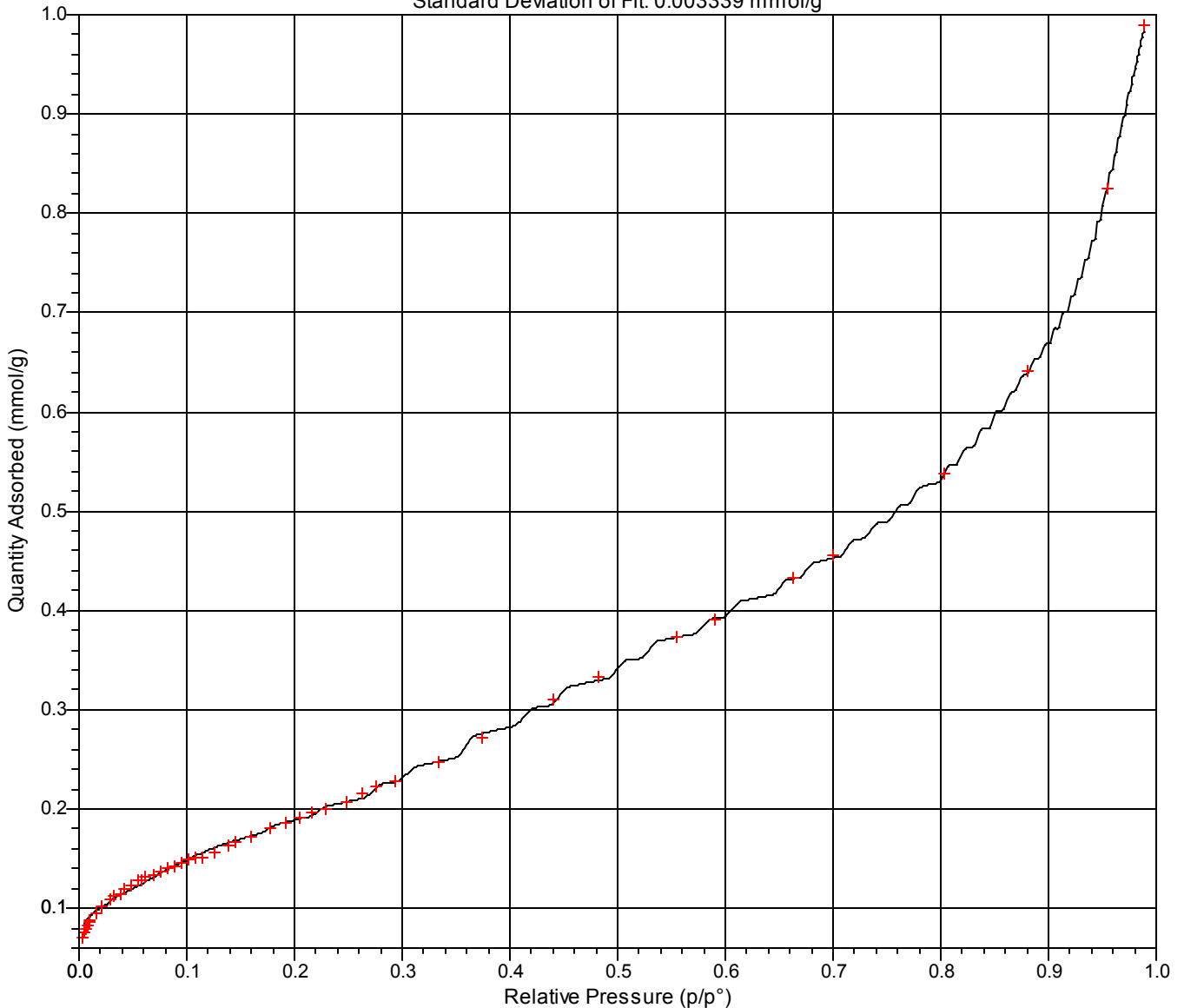
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Goodness of Fit

Standard Deviation of Fit: 0.003339 mmol/g





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 42 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

Surface Energy Distribution by Invalid  
Model: N2 - Modified Density Functional  
Method: Non-negative Regularization: 0.00000  
Standard Deviation of Fit: 0.000599 mmol/g

Total Area : 45.567 m<sup>2</sup>/g

Surface Energy Table

Energy (e/k)	Cumulative Area (m <sup>2</sup> /g)	Incremental Area (m <sup>2</sup> /g)
20.00	0.000	0.000
22.00	20.716	20.716
24.00	32.755	12.039
26.00	32.755	0.000
28.00	32.755	0.000
30.00	32.755	0.000
32.00	32.755	0.000
34.00	32.755	0.000
36.00	34.935	2.180
38.00	34.935	0.000
40.00	36.249	1.314
42.00	38.193	1.944
44.00	38.193	0.000
46.00	38.193	0.000
48.00	38.193	0.000
50.00	38.193	0.000
52.00	41.643	3.450
54.00	41.643	0.000
56.00	41.643	0.000
58.00	41.643	0.000
60.00	41.643	0.000
62.00	41.643	0.000
64.00	41.643	0.000
66.00	41.643	0.000
68.00	41.643	0.000
70.00	43.629	1.987
72.00	44.039	0.409
74.00	44.039	0.000
76.00	44.039	0.000
78.00	44.039	0.000



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 43 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/6/2564 0:25:42	Analysis bath temp.: 77.383 K
Report time: 9/6/2564 11:50:13	Thermal correction: No
Sample mass: 0.0343 g	Ambient free space: 18.8324 cm <sup>3</sup> Measured
Analysis free space: 62.8409 cm <sup>3</sup>	Equilibration interval: 5 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic degas: No	

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Surface Energy Table**

Energy (e/k)	Cumulative Area (m <sup>2</sup> /g)	Incremental Area (m <sup>2</sup> /g)
80.00	44.039	0.000
82.00	44.039	0.000
84.00	44.039	0.000
86.00	44.039	0.000
88.00	44.039	0.000
90.00	44.039	0.000
92.00	44.039	0.000
94.00	44.909	0.870
96.00	45.567	0.658
98.00	45.567	0.000
100.00	45.567	0.000



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 44 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                            Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

Surface Energy Distribution by Invalid  
Model: N2 - Modified Density Functional  
Method: Non-negative Regularization: 0.00000  
Standard Deviation of Fit: 0.000599 mmol/g

**Isotherm Table**

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.003981072	0.07129	0.07153	-0.00023	-0.003271
0.004216965	0.07218	0.07233	-0.00015	-0.002022
0.004466836	0.07310	0.07318	-0.00008	-0.001085
0.004731513	0.07404	0.07407	-0.00003	-0.000349
0.005011872	0.07502	0.07500	0.00003	0.000351
0.005308844	0.07604	0.07595	0.00008	0.001074
0.005623413	0.07706	0.07694	0.00012	0.001612
0.005956621	0.07809	0.07794	0.00015	0.001983
0.006309573	0.07913	0.07895	0.00017	0.002182
0.006683439	0.08010	0.07998	0.00012	0.001443
0.007079458	0.08084	0.08102	-0.00018	-0.002210
0.007498942	0.08154	0.08206	-0.00052	-0.006360
0.007943282	0.08253	0.08311	-0.00059	-0.007089
0.008413951	0.08412	0.08416	-0.00005	-0.000540
0.008912509	0.08579	0.08522	0.00057	0.006654
0.009440609	0.08682	0.08627	0.00055	0.006347
0.010000000	0.08770	0.08731	0.00038	0.004381
0.010592537	0.08853	0.08835	0.00018	0.002049
0.011220185	0.08940	0.08939	0.00002	0.000178
0.011885022	0.09033	0.09042	-0.00009	-0.001005
0.012589254	0.09131	0.09146	-0.00015	-0.001599
0.013335214	0.09235	0.09251	-0.00016	-0.001734
0.014125375	0.09342	0.09357	-0.00015	-0.001575
0.014962357	0.09452	0.09465	-0.00012	-0.001321
0.015848932	0.09564	0.09575	-0.00012	-0.001216
0.016788040	0.09676	0.09689	-0.00013	-0.001360
0.017782794	0.09791	0.09806	-0.00015	-0.001538
0.018836491	0.09910	0.09927	-0.00017	-0.001684
0.019952623	0.10034	0.10051	-0.00017	-0.001684
0.021134890	0.10165	0.10179	-0.00014	-0.001344
0.022387211	0.10304	0.10308	-0.00004	-0.000391



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 45 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                           Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Isotherm Table**

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.023713737	0.10452	0.10440	0.00012	0.001101
0.025118864	0.10604	0.10573	0.00031	0.002909
0.026607251	0.10757	0.10707	0.00050	0.004692
0.028183829	0.10906	0.10841	0.00065	0.005969
0.029853826	0.11039	0.10976	0.00063	0.005698
0.031622777	0.11141	0.11114	0.00027	0.002446
0.033496544	0.11243	0.11255	-0.00012	-0.001059
0.035481339	0.11339	0.11400	-0.00062	-0.005433
0.037583740	0.11445	0.11552	-0.00108	-0.009399
0.039810717	0.11635	0.11714	-0.00079	-0.006803
0.042169650	0.11936	0.11888	0.00049	0.004076
0.044668359	0.12090	0.12072	0.00018	0.001478
0.047315126	0.12234	0.12264	-0.00030	-0.002458
0.050118723	0.12448	0.12457	-0.00009	-0.000707
0.053088444	0.12697	0.12646	0.00051	0.003990
0.056234133	0.12870	0.12830	0.00040	0.003092
0.059566214	0.13095	0.13009	0.00085	0.006528
0.063095734	0.13273	0.13187	0.00086	0.006489
0.066834392	0.13291	0.13363	-0.00072	-0.005413
0.070794578	0.13444	0.13541	-0.00097	-0.007234
0.074989421	0.13651	0.13722	-0.00071	-0.005218
0.079432823	0.13894	0.13907	-0.00013	-0.000912
0.084139514	0.14114	0.14097	0.00017	0.001172
0.089125094	0.14309	0.14294	0.00015	0.001023
0.094406088	0.14529	0.14500	0.00029	0.001975
0.100000000	0.14797	0.14717	0.00080	0.005406
0.105925373	0.15074	0.14947	0.00128	0.008463
0.112201845	0.15167	0.15192	-0.00025	-0.001652
0.118850223	0.15314	0.15456	-0.00142	-0.009283
0.125892541	0.15591	0.15743	-0.00152	-0.009756
0.133352143	0.15990	0.16057	-0.00067	-0.004189
0.141253754	0.16395	0.16400	-0.00005	-0.000298
0.149623566	0.16782	0.16769	0.00012	0.000744
0.158489319	0.17178	0.17159	0.00019	0.001130
0.167880402	0.17618	0.17563	0.00055	0.003144
0.177827941	0.18077	0.17978	0.00099	0.005454



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 46 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02                      Analysis adsorptive: N2  
Completed: 6/6/2564 0:25:42                    Analysis bath temp.: 77.383 K  
Report time: 9/6/2564 11:50:13                Thermal correction: No  
Sample mass: 0.0343 g                            Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>                Equilibration interval: 5 s  
Low pressure dose: None                            Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>  
Automatic degas: No

Comments: Degassing □□□C □□□min

**Isotherm Table**

Relative Pressure (p/p°)	Experimental Quantity Adsorbed (mmol/g)	Fitted Quantity Adsorbed (mmol/g)	Absolute Residual (mmol/g)	Relative Residual
0.188364909	0.18496	0.18408	0.00088	0.004733
0.199526231	0.18913	0.18858	0.00055	0.002911
0.211348904	0.19411	0.19332	0.00079	0.004080
0.223872114	0.19820	0.19837	-0.00017	-0.000853
0.237137371	0.20232	0.20381	-0.00149	-0.007378
0.251188643	0.20885	0.20973	-0.00087	-0.004188
0.266072506	0.21698	0.21620	0.00078	0.003588
0.281838293	0.22476	0.22335	0.00142	0.006298
0.298538262	0.23062	0.23129	-0.00068	-0.002932
0.316227766	0.23877	0.24016	-0.00140	-0.005861
0.334965439	0.24875	0.25008	-0.00133	-0.005366
0.354813389	0.26118	0.26109	0.00010	0.000380
0.375837404	0.27389	0.27307	0.00082	0.003007
0.398107171	0.28610	0.28577	0.00033	0.001150
0.421696503	0.29897	0.29903	-0.00006	-0.000214
0.446683592	0.31287	0.31287	-0.00000	-0.000004
0.473151259	0.32779	0.32747	0.00031	0.000959
0.501187234	0.34354	0.34307	0.00047	0.001358
0.530884444	0.36012	0.35988	0.00024	0.000663
0.562341325	0.37737	0.37800	-0.00063	-0.001675



TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 47 of 51

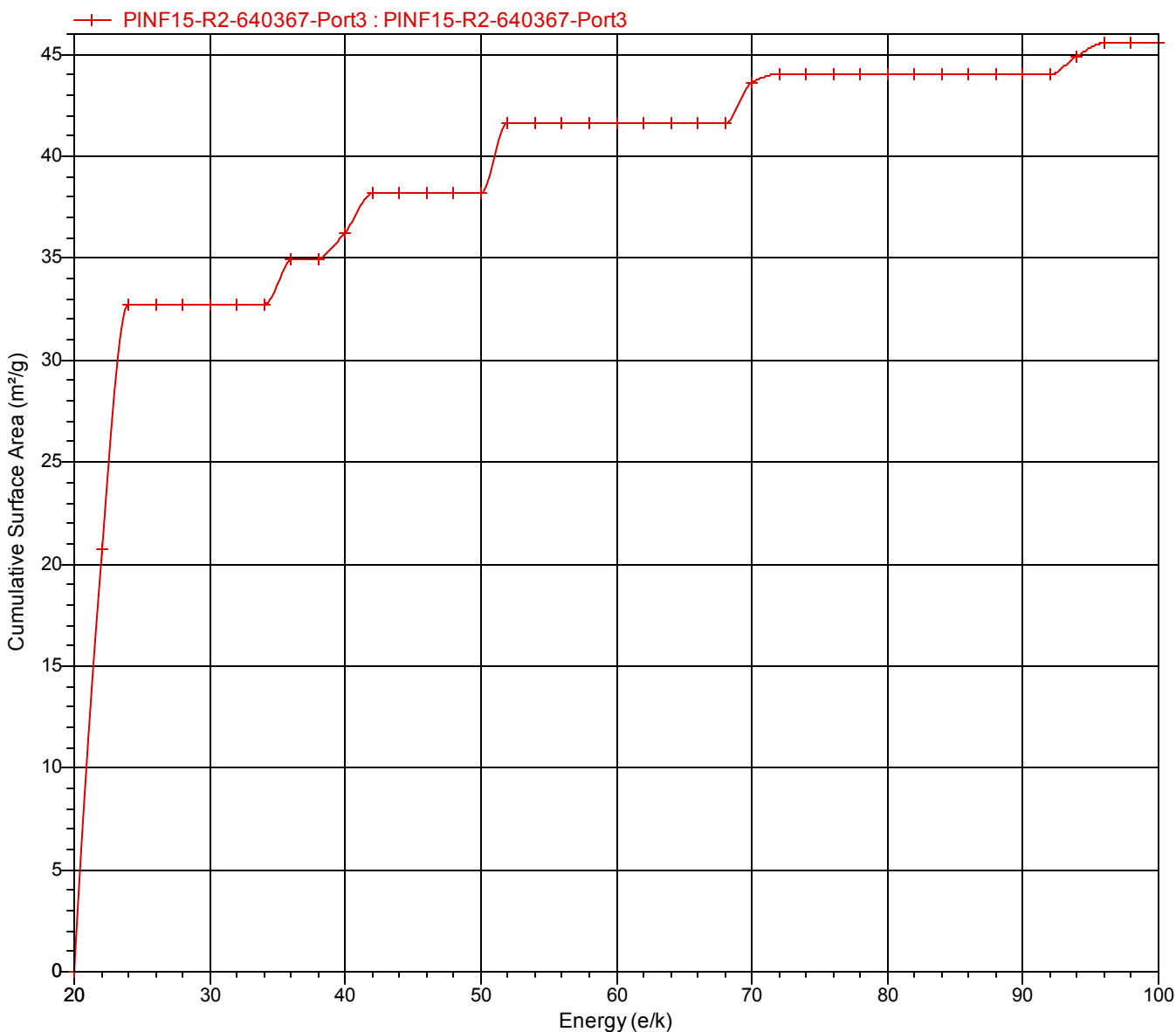
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Cumulative Surface Area vs. Energy





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 48 of 51

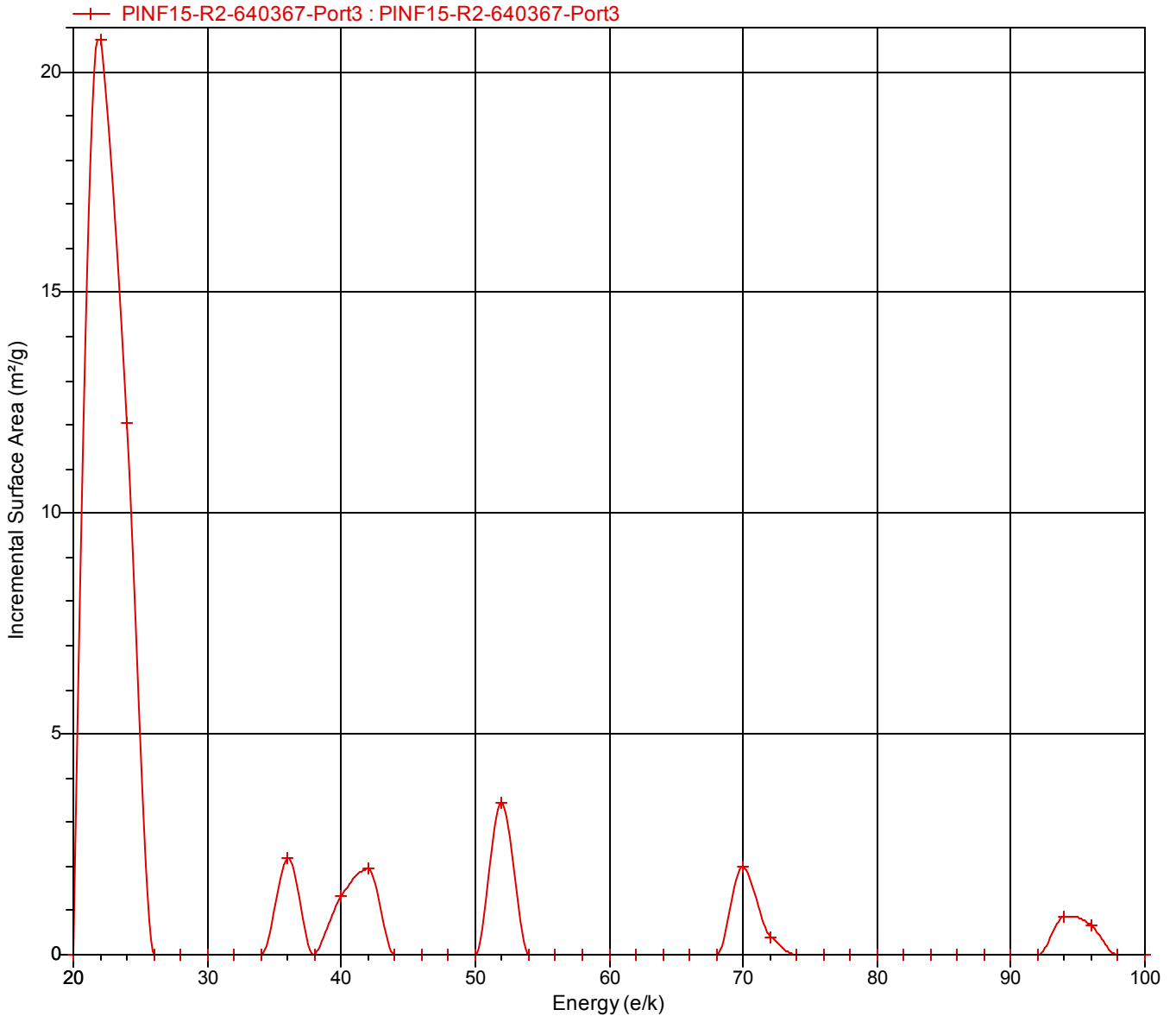
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Incremental Surface Area vs. Energy





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 49 of 51

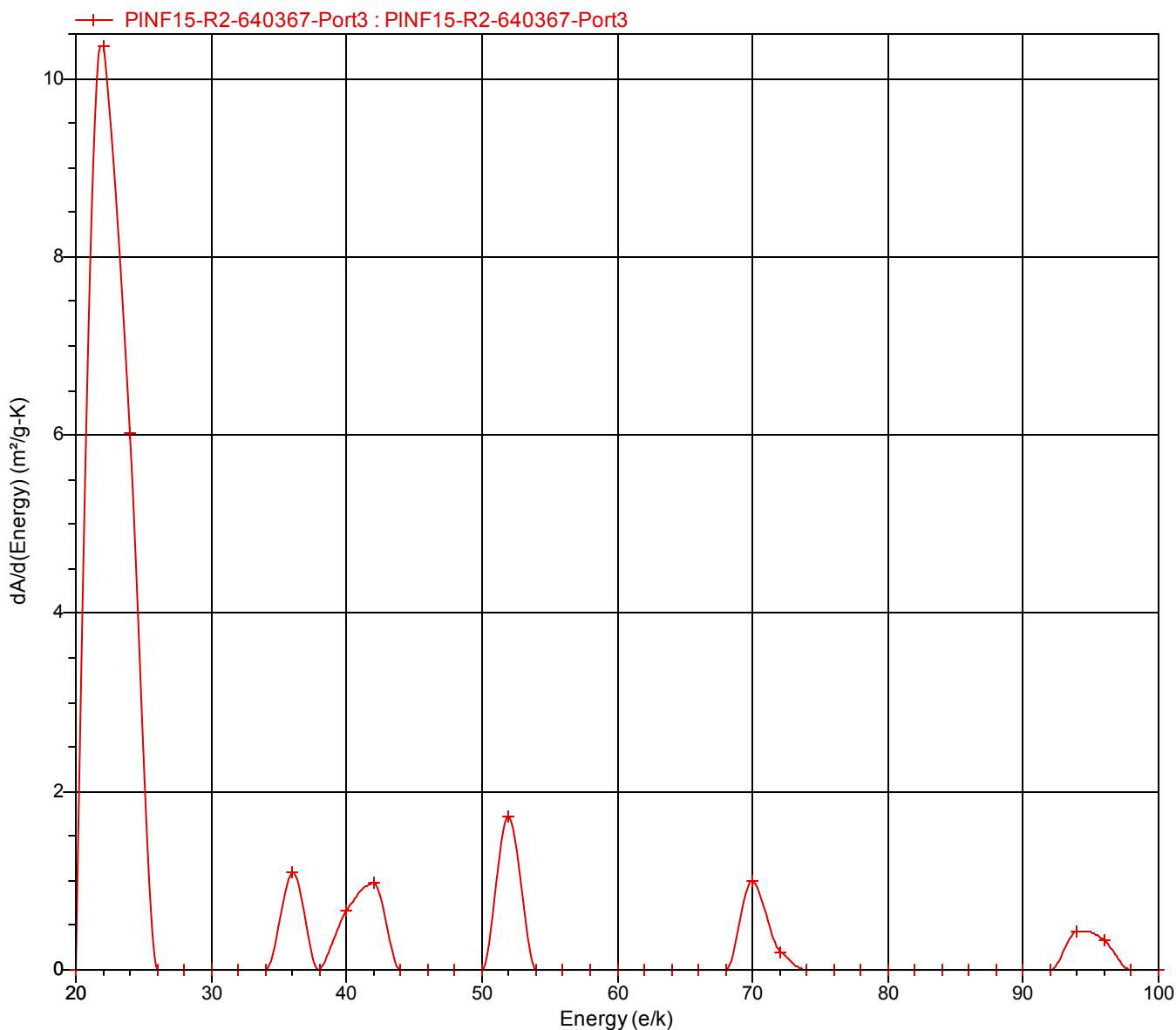
Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing C min

dA/d(Energy) vs. Energy





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 50 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

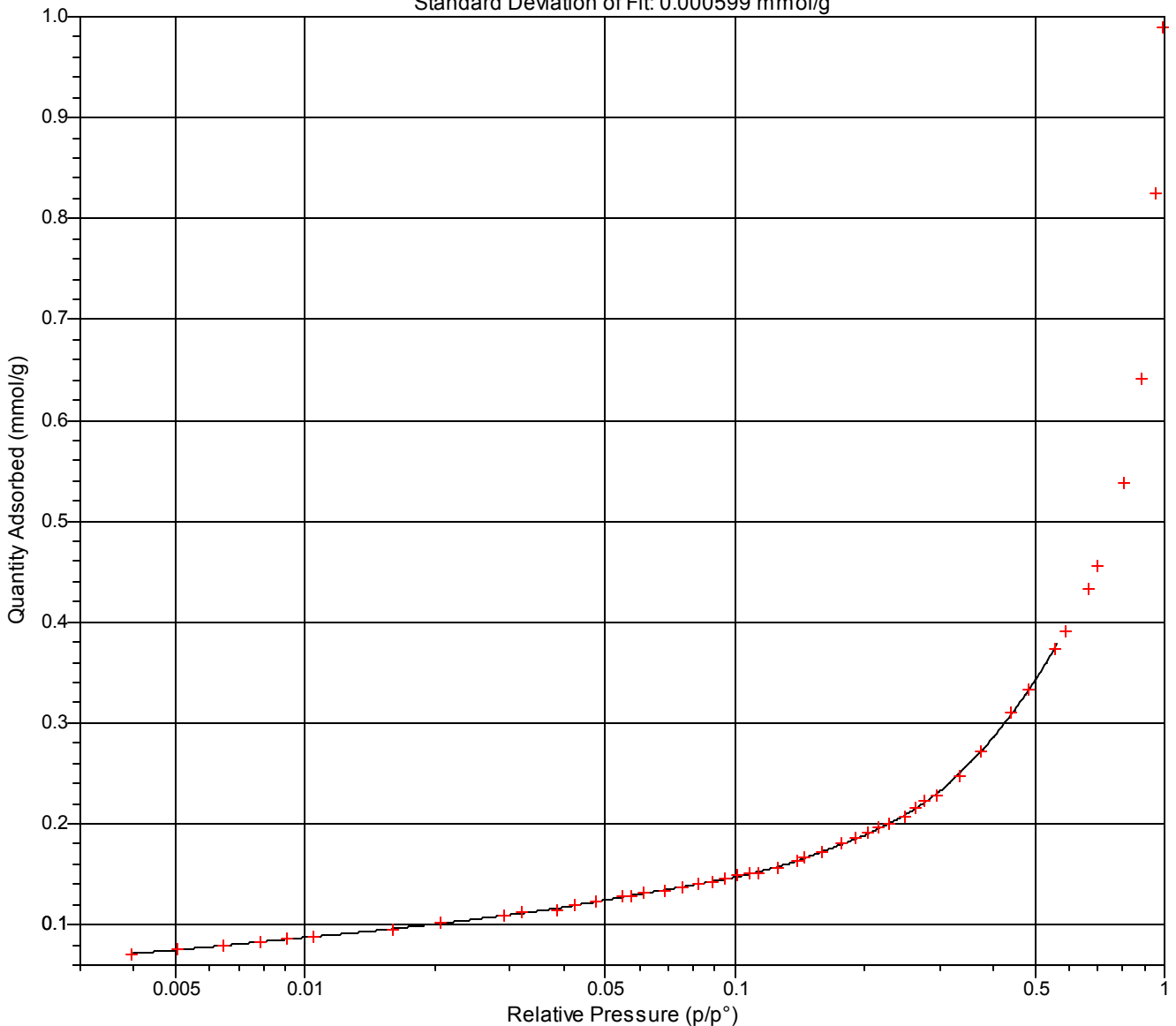
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Goodness of Fit

Standard Deviation of Fit: 0.000599 mmol/g





TUCSEAR THAMMASAT UNIVERSITY

3Flex 5.02

3Flex Version 5.02  
Serial # 623 Unit 1 Port 3

Page 51 of 51

Sample: PINF15-R2-640367-Port3  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter: TU-CSEAR  
File: C:\3Flex\data\R2-640367\PINF15-R2-640367-Port3.SMP

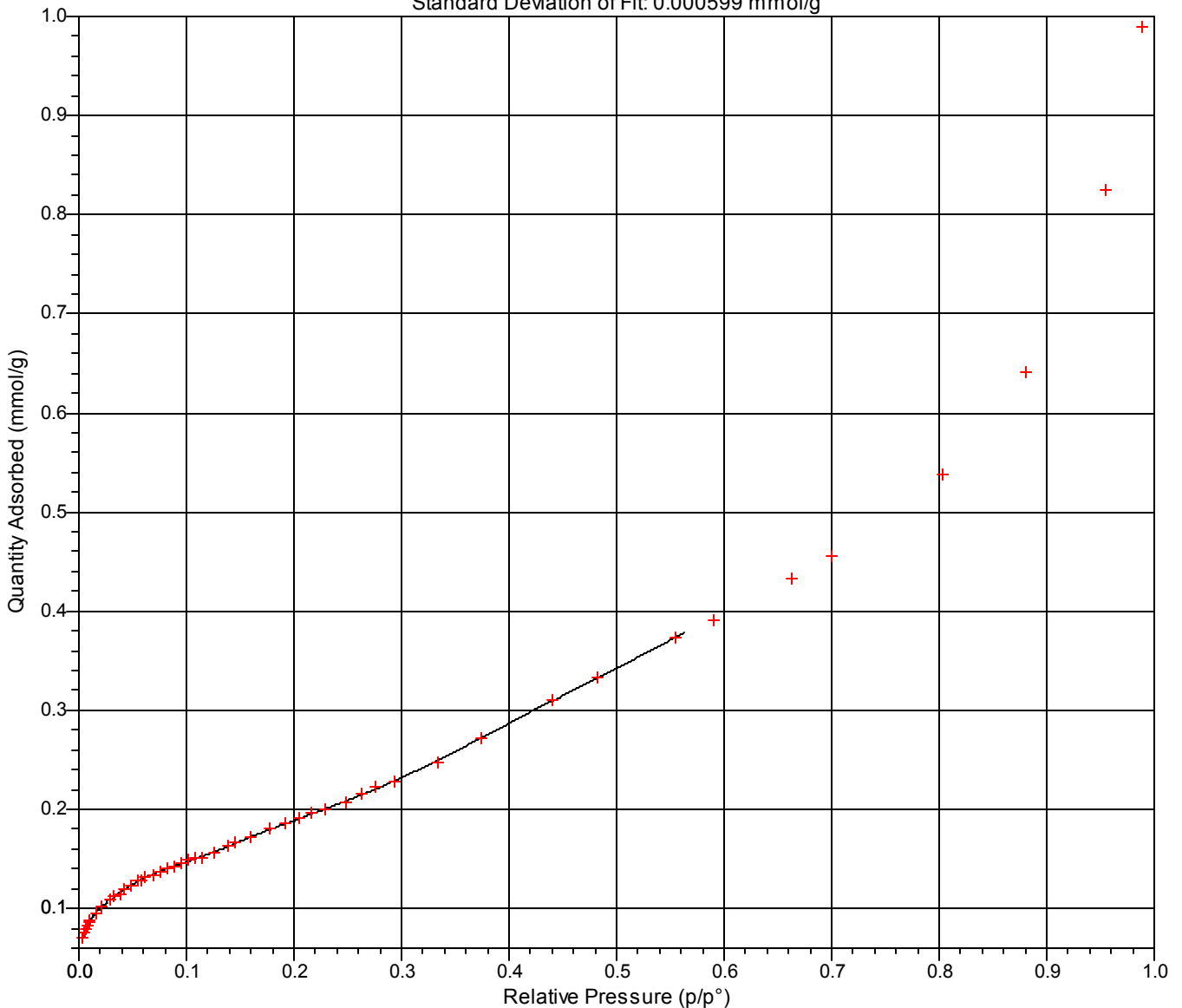
Started: 5/6/2564 17:38:02  
Completed: 6/6/2564 0:25:42  
Report time: 9/6/2564 11:50:13  
Sample mass: 0.0343 g  
Analysis free space: 62.8409 cm<sup>3</sup>  
Low pressure dose: None  
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N2  
Analysis bath temp.: 77.383 K  
Thermal correction: No  
Ambient free space: 18.8324 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration interval: 5 s  
Sample density: 1.000 g/cm<sup>3</sup>

Comments: Degassing □□□C □□□min

Goodness of Fit

Standard Deviation of Fit: 0.000599 mmol/g



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

### Summary Report

#### Intrusion Data Summary

Total intrusion volume at 59,960.94 psia: 17.3318 mL/g  
Total pore area at 59,960.94 psia: 5.849 m<sup>2</sup>/g  
Median pore diameter (volume) at 1.49 psia and 8.666 mL/g: 121.11264 µm  
Median pore diameter (area) at 291.15 psia and 2.924 m<sup>2</sup>/g: 0.62120 µm  
Average pore diameter (4V/A): 11.85292 µm  
Bulk density at 0.51 psia: 0.0557 g/mL  
Apparent (skeletal) density at 59,960.94 psia: 1.6425 g/mL  
Porosity: 96.6065 %

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

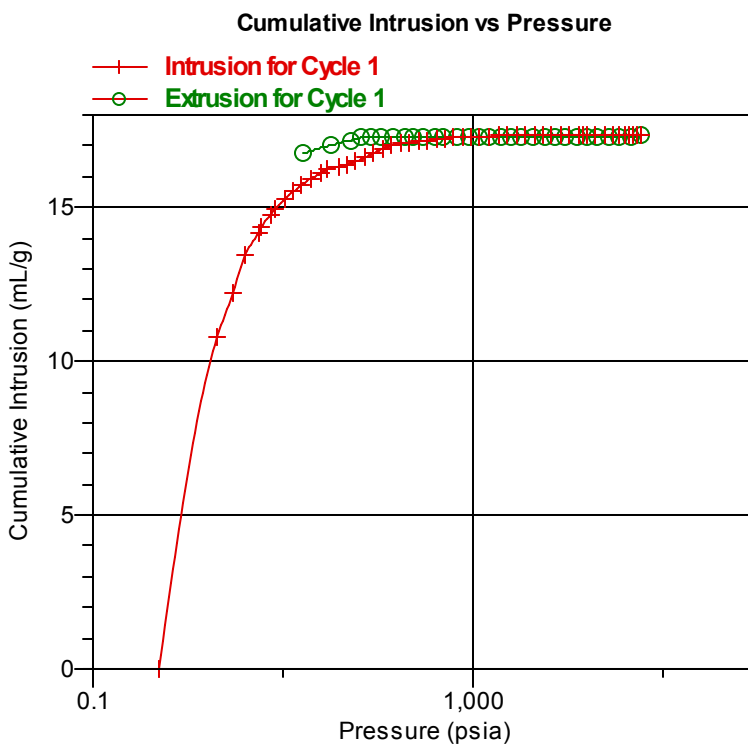
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



**MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION**

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 3 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Pressure**

Pressure (psia)	Mean Diameter (µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)	Incremental Pore Area (m²/g)
0.51	358.08908	0.0000	0.0000	0.000	0.000

**Pore Size**

Pressure (psia)	Mean Diameter (µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)	Incremental Pore Area (m²/g)
59960.94	0.00302	17.3318	0.0000	5.849	0.000

**Percent Intrusion**

Pressure (psia)	Mean Diameter (µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)	Incremental Pore Area (m²/g)
0.51	358.08908	0.0000	0.0000	0.000	0.000

**Pore Structure Summary**

Permeability: 257.4139 mdarcy  
 Threshold pressure: 71.39 psia (Calculated)  
 Characteristic length: 2.53342 µm  
 Conductivity formation factor: 9.064 (Calculated)  
 Tortuosity factor: -0.006

**MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION**

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 4 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Pore Structure Summary**

Tortuosity: 22.3142  
Percolation fractal dimension: 3.000  
Backbone fractal dimension: 2.977

**Physical Properties**

Interstitial porosity: 25.9500 %  
Breakthrough pressure ratio: 8.3200  
Linear coefficient: 3.4551e-308 1/psia  
Quadratic coefficient: 8.3811e-315 1/psia<sup>2</sup>

**Peak Parameters**

Minimum valley depth to separate peaks: 0.0000 %  
Minimum percent of distribution to report: 0.0000 %

**Peak Table**

Number	Min Pore Diameter (µm)	Max Pore Diameter (µm)	Percent of Distribution	Median Diameter (µm)	Mode Diameter (µm)	Total Pore Volume (mL/g)
1	60.33413	358.08908	70.52	201.56551	90.57297	12.2218
2	7.24053	60.33413	22.44	33.17172	45.21208	3.8892
3	4.72186	7.24053	1.23	6.40775	6.03671	0.2133
4	2.05462	4.72186	2.42	2.87025	2.48191	0.4186
5	0.55153	2.05462	2.48	1.46515	1.60729	0.4291
6	0.34934	0.55153	0.37	0.46234	0.43275	0.0650
7	0.22677	0.34934	0.22	0.29518	0.28353	0.0374
8	0.05035	0.22677	0.33	0.15331	0.18311	0.0574

MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 5 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter:  
File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50                      Sample Mass: 0.0124 g  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44                      Stem Volume Used: 56 %  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39                              Show Neg. Int: No  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia                      Correction Type: None  
Adv. Contact Angle: 130.000 °                              Mercury Temperature: 21.21 °C  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Tabular Report

Pressure (psia)	Pore Diameter (µm)	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)
0.51	358.08908	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.0000	0.0000
2.00	90.57297	1.802 x 10 <sup>1</sup>	4.021 x 10 <sup>-2</sup>	10.7576	10.7576
3.00	60.33413	8.299 x 10 <sup>0</sup>	4.842 x 10 <sup>-2</sup>	12.2218	1.4642
4.00	45.21208	9.644 x 10 <sup>0</sup>	7.992 x 10 <sup>-2</sup>	13.4303	1.2085
5.50	32.91285	5.459 x 10 <sup>0</sup>	6.120 x 10 <sup>-2</sup>	14.1831	0.7527
5.99	30.17583	4.717 x 10 <sup>0</sup>	6.498 x 10 <sup>-2</sup>	14.3609	0.1779
7.49	24.15049	4.154 x 10 <sup>0</sup>	6.668 x 10 <sup>-2</sup>	14.7627	0.4018
8.49	21.30175	3.496 x 10 <sup>0</sup>	6.690 x 10 <sup>-2</sup>	14.9533	0.1906
10.48	17.25903	3.249 x 10 <sup>0</sup>	7.346 x 10 <sup>-2</sup>	15.2503	0.2970
12.97	13.94085	2.723 x 10 <sup>0</sup>	7.610 x 10 <sup>-2</sup>	15.5028	0.2525
15.96	11.33106	2.399 x 10 <sup>0</sup>	8.276 x 10 <sup>-2</sup>	15.7187	0.2160
19.99	9.04797	2.178 x 10 <sup>0</sup>	9.321 x 10 <sup>-2</sup>	15.9315	0.2128
24.98	7.24053	1.854 x 10 <sup>0</sup>	9.929 x 10 <sup>-2</sup>	16.1110	0.1795
29.96	6.03671	1.870 x 10 <sup>0</sup>	1.227 x 10 <sup>-1</sup>	16.2587	0.1477
38.30	4.72186	6.154 x 10 <sup>-1</sup>	4.994 x 10 <sup>-2</sup>	16.3243	0.0657
48.23	3.75036	7.766 x 10 <sup>-1</sup>	7.997 x 10 <sup>-2</sup>	16.4020	0.0777
58.02	3.11717	9.290 x 10 <sup>-1</sup>	1.178 x 10 <sup>-1</sup>	16.4766	0.0746

MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 6 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

Tabular Report

Pressure (psia)	Pore Diameter (µm)	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)
72.87	2.48191	1.553 x 10 <sup>0</sup>	2.419 x 10 <sup>-1</sup>	16.6303	0.1537
88.03	2.05462	1.372 x 10 <sup>0</sup>	2.636 x 10 <sup>-1</sup>	16.7429	0.1126
112.53	1.60729	1.505 x 10 <sup>0</sup>	3.587 x 10 <sup>-1</sup>	16.9034	0.1605
137.51	1.31528	1.155 x 10 <sup>0</sup>	3.446 x 10 <sup>-1</sup>	17.0040	0.1006
172.83	1.04650	5.601 x 10 <sup>-1</sup>	2.069 x 10 <sup>-1</sup>	17.0596	0.0556
217.89	0.83007	4.361 x 10 <sup>-1</sup>	2.027 x 10 <sup>-1</sup>	17.1035	0.0439
267.40	0.67637	4.353 x 10 <sup>-1</sup>	2.519 x 10 <sup>-1</sup>	17.1422	0.0387
327.93	0.55153	3.363 x 10 <sup>-1</sup>	2.387 x 10 <sup>-1</sup>	17.1720	0.0298
417.94	0.43275	4.041 x 10 <sup>-1</sup>	3.583 x 10 <sup>-1</sup>	17.2146	0.0426
517.73	0.34934	2.408 x 10 <sup>-1</sup>	2.685 x 10 <sup>-1</sup>	17.2370	0.0224
637.91	0.28353	2.469 x 10 <sup>-1</sup>	3.401 x 10 <sup>-1</sup>	17.2593	0.0224
797.56	0.22677	1.544 x 10 <sup>-1</sup>	2.640 x 10 <sup>-1</sup>	17.2743	0.0150
987.75	0.18311	1.688 x 10 <sup>-1</sup>	3.592 x 10 <sup>-1</sup>	17.2900	0.0157
1197.55	0.15103	1.654 x 10 <sup>-1</sup>	4.313 x 10 <sup>-1</sup>	17.3038	0.0138
1496.87	0.12083	1.042 x 10 <sup>-1</sup>	3.343 x 10 <sup>-1</sup>	17.3139	0.0101
1896.22	0.09538	8.337 x 10 <sup>-2</sup>	3.365 x 10 <sup>-1</sup>	17.3225	0.0086
2345.74	0.07710	6.311 x 10 <sup>-2</sup>	3.190 x 10 <sup>-1</sup>	17.3283	0.0058
2894.29	0.06249	3.772 x 10 <sup>-2</sup>	2.356 x 10 <sup>-1</sup>	17.3318	0.0034

MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 7 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

Tabular Report

Pressure (psia)	Pore Diameter (µm)	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)
3591.92	0.05035	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
4490.06	0.04028	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
5581.51	0.03240	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
6871.23	0.02632	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
8572.47	0.02110	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
10572.93	0.01711	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
13162.69	0.01374	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
14772.22	0.01224	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
16372.73	0.01105	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
19968.54	0.00906	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
24992.19	0.00724	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
29994.86	0.00603	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
34995.48	0.00517	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
39995.89	0.00452	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
44993.75	0.00402	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
49965.13	0.00362	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
54964.71	0.00329	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000
59960.94	0.00302	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.3318	0.0000

MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 8 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2  
Operator: TUCSEAR01  
Submitter:  
File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50      Sample Mass: 0.0124 g  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44      Stem Volume Used: 56 %  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39          Show Neg. Int: No  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia      Correction Type: None  
Adv. Contact Angle: 130.000 °            Mercury Temperature: 21.21 °C  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Tabular Report

Pressure (psia)	Pore Diameter (µm)	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)
46101.02	0.00392	3.336 x 10 <sup>-1</sup>	4.200 x 10 <sup>1</sup>	17.2937	-0.0381
35502.24	0.00509	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
27307.31	0.00662	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
21012.94	0.00861	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
16014.12	0.01129	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
12413.84	0.01457	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
9625.51	0.01879	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
7328.02	0.02468	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
5713.38	0.03166	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
4303.03	0.04203	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
3303.49	0.05475	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
2603.27	0.06948	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
2002.20	0.09033	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
1501.54	0.12045	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
1201.14	0.15058	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
901.53	0.20062	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
701.55	0.25780	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
501.44	0.36069	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000

MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 9 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

Tabular Report

Pressure (psia)	Pore Diameter (µm)	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/µm)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)
401.28	0.45072	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
301.26	0.60036	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
241.13	0.75008	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
191.26	0.94564	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
146.18	1.23728	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
111.23	1.62604	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
85.94	2.10465	0.000 x 10 <sup>0</sup>	0.000 x 10 <sup>0</sup>	17.2937	0.0000
66.65	2.71352	3.206 x 10 <sup>-1</sup>	5.810 x 10 <sup>-2</sup>	17.2583	-0.0354
51.26	3.52839	6.409 x 10 <sup>-1</sup>	8.969 x 10 <sup>-2</sup>	17.1852	-0.0731
31.75	5.69723	7.823 x 10 <sup>-1</sup>	7.505 x 10 <sup>-2</sup>	17.0224	-0.1628
16.65	10.86234	9.903 x 10 <sup>-1</sup>	5.374 x 10 <sup>-2</sup>	16.7449	-0.2776

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

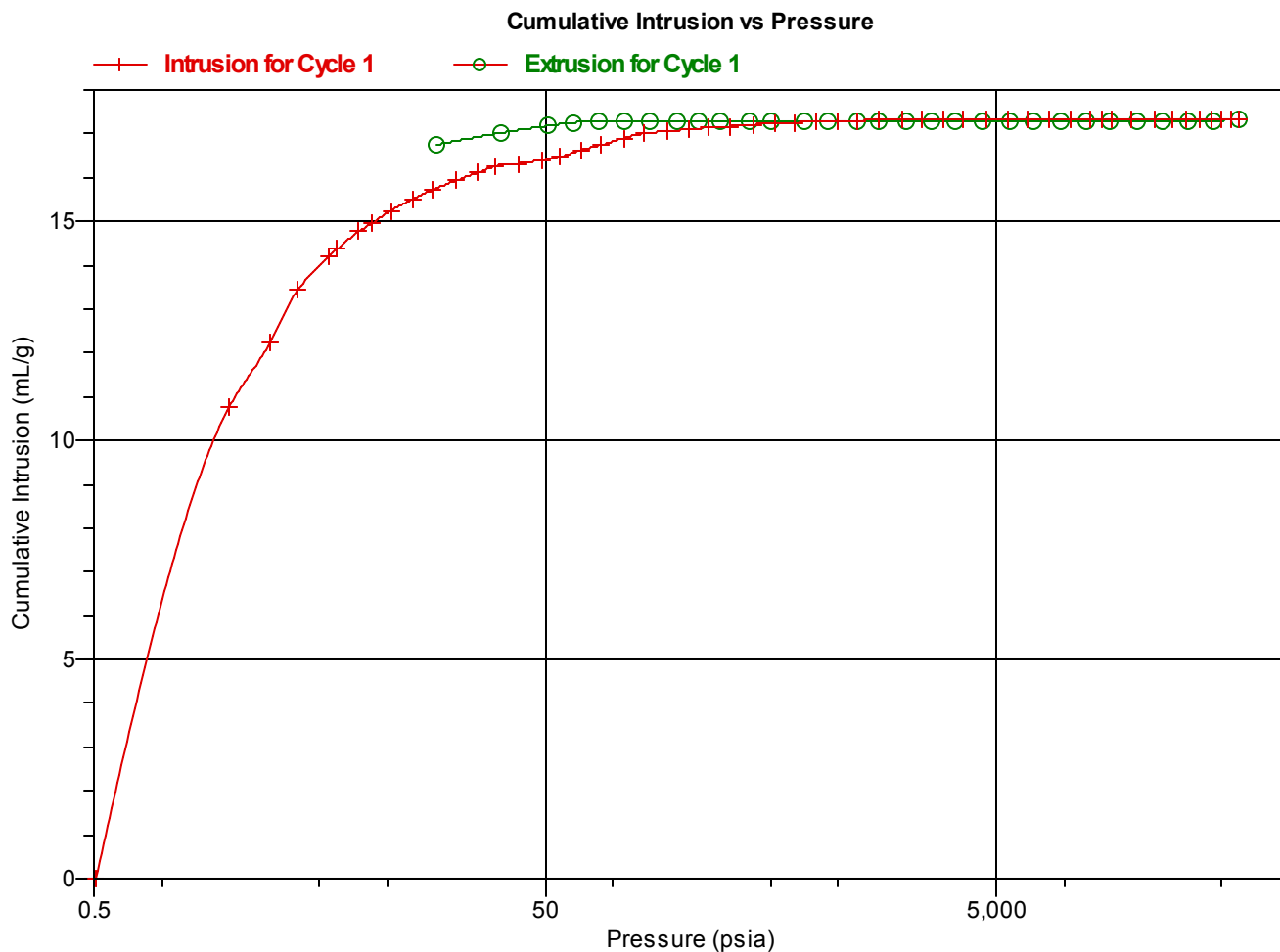
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

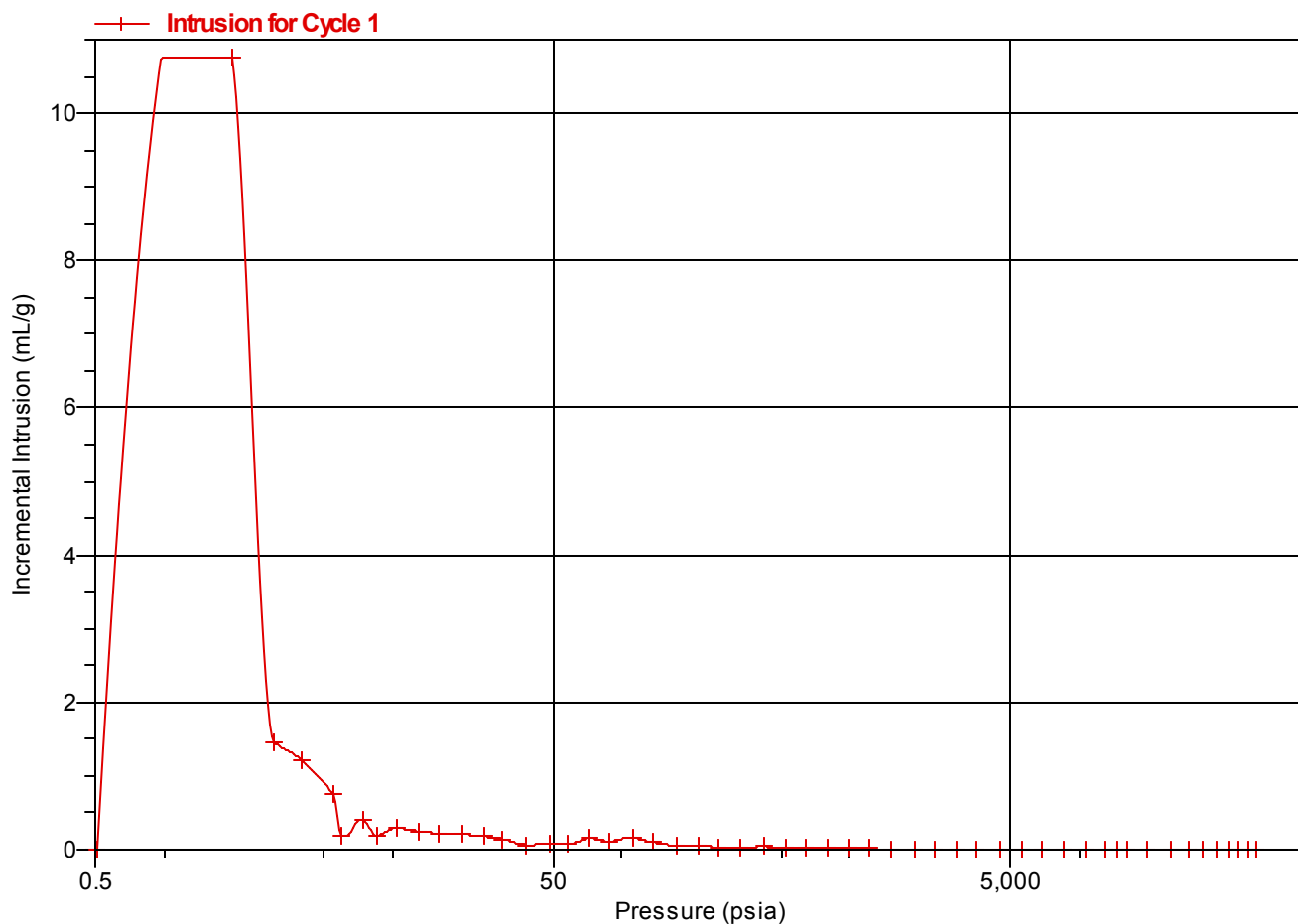
Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Incremental Intrusion vs Pressure**



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

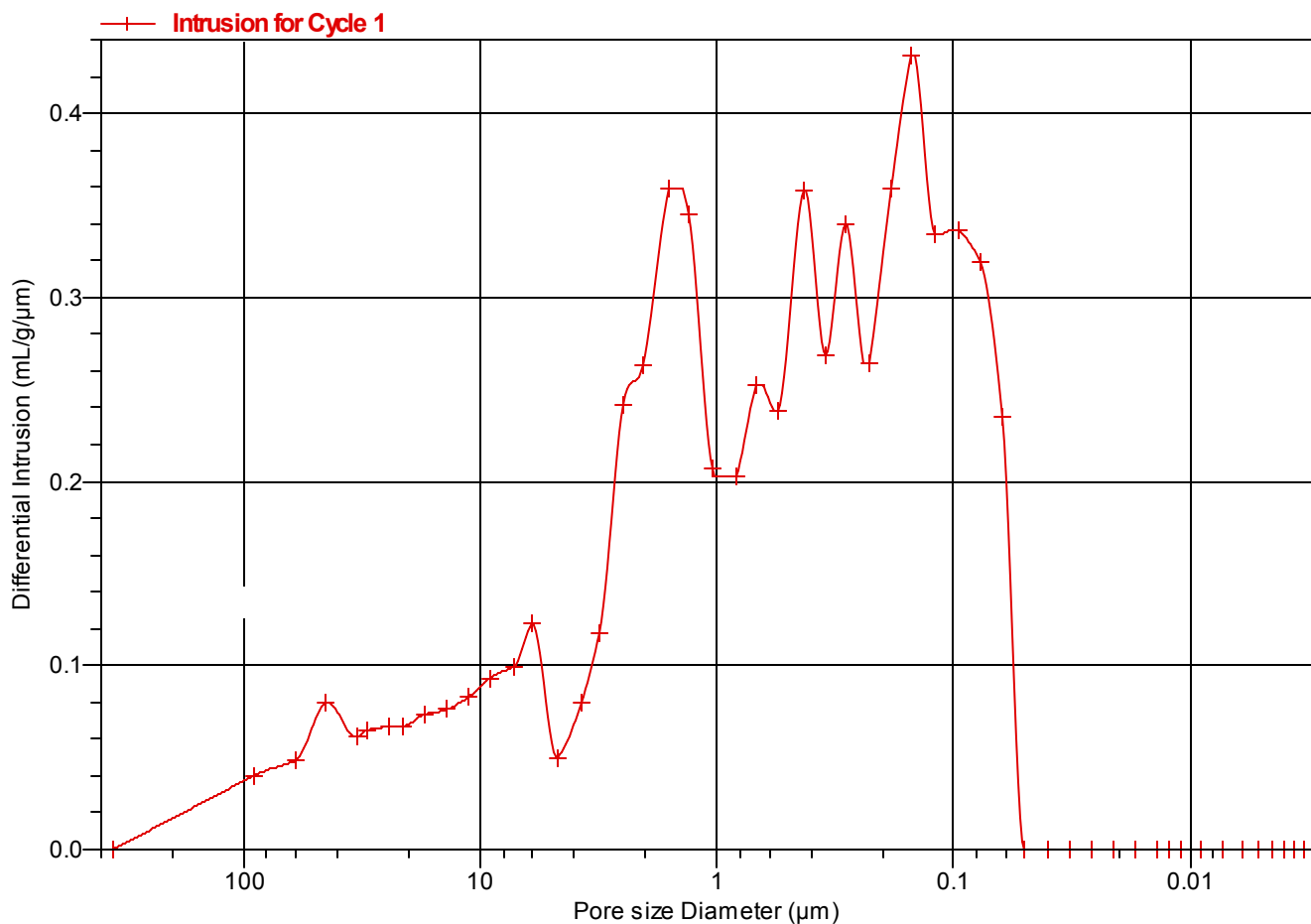
Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Differential Intrusion vs Pore size**



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

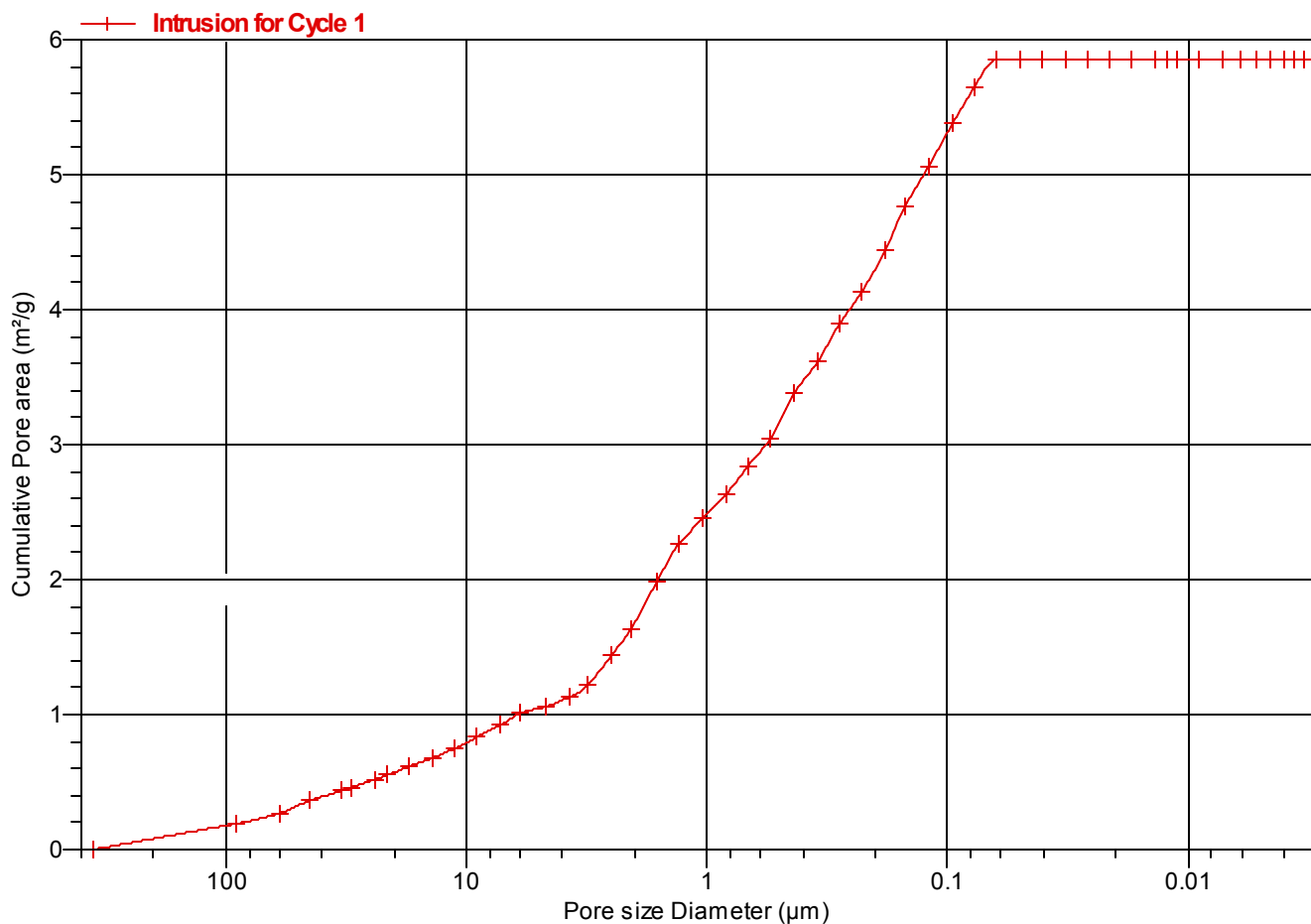
Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Cumulative Pore Area vs Pore size**



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

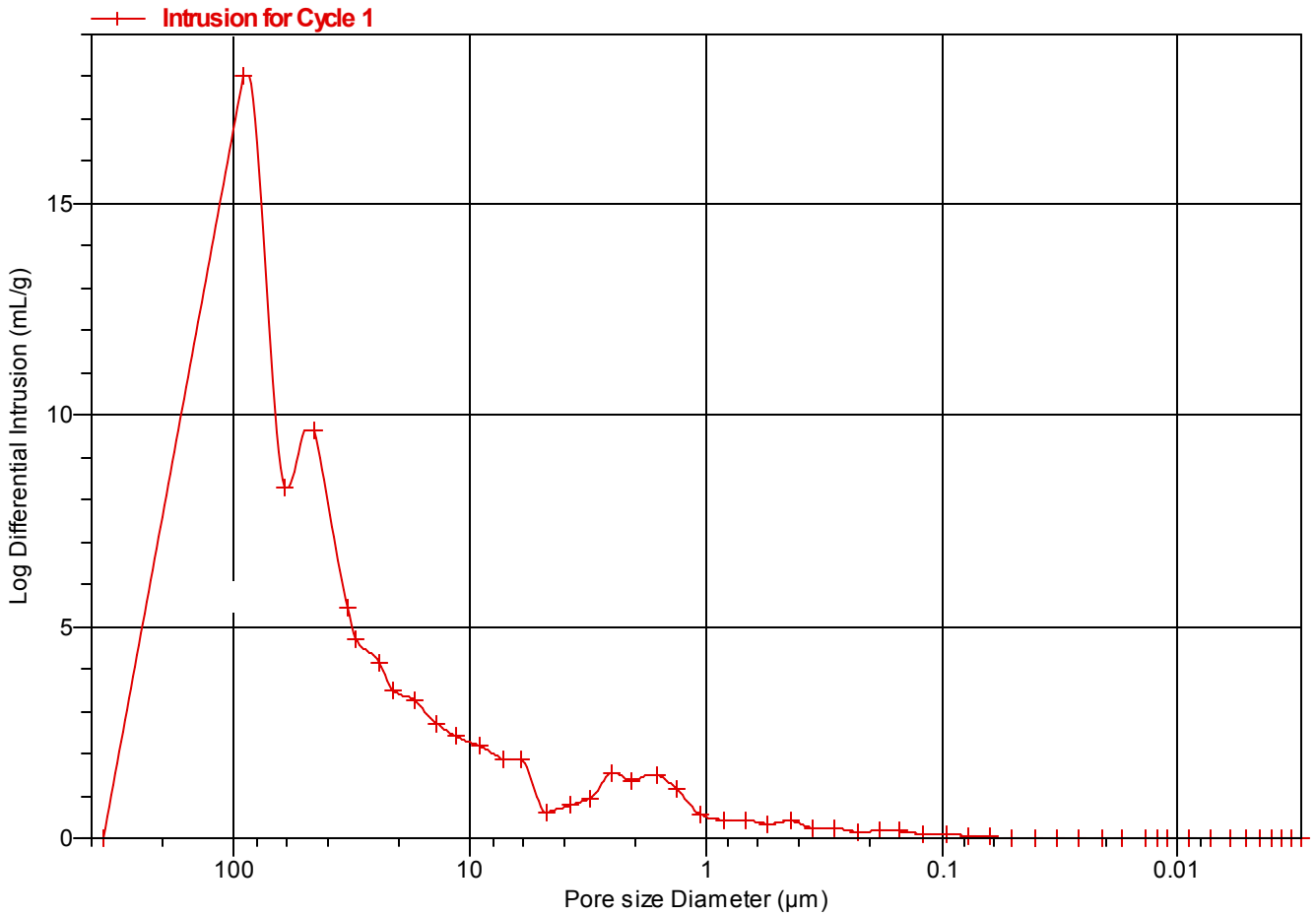
Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

Log Differential Intrusion vs Pore size



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

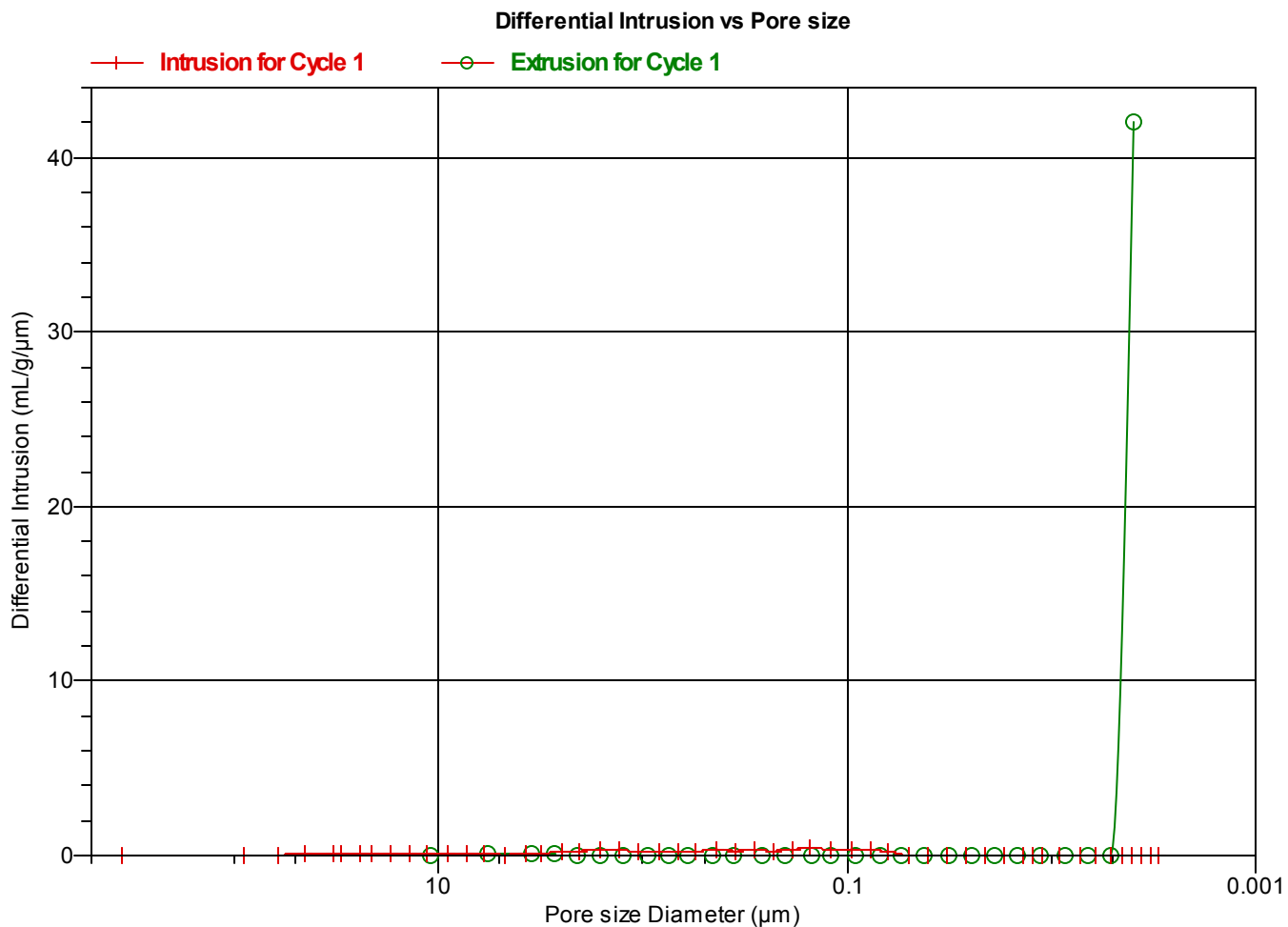
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

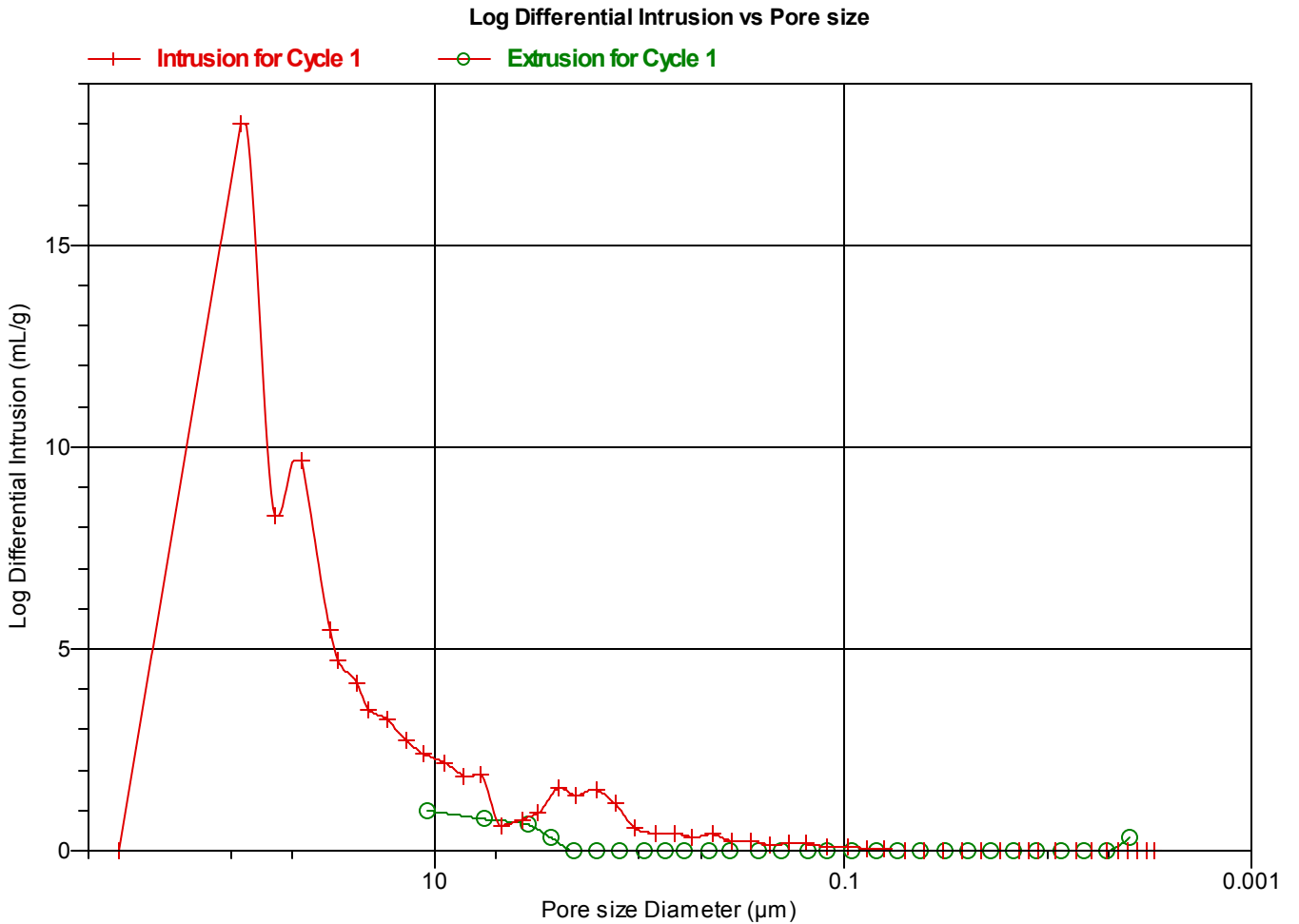
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Difference From Reference % Volume vs Pore size**



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Out Of Specification % Volume vs Pressure**



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

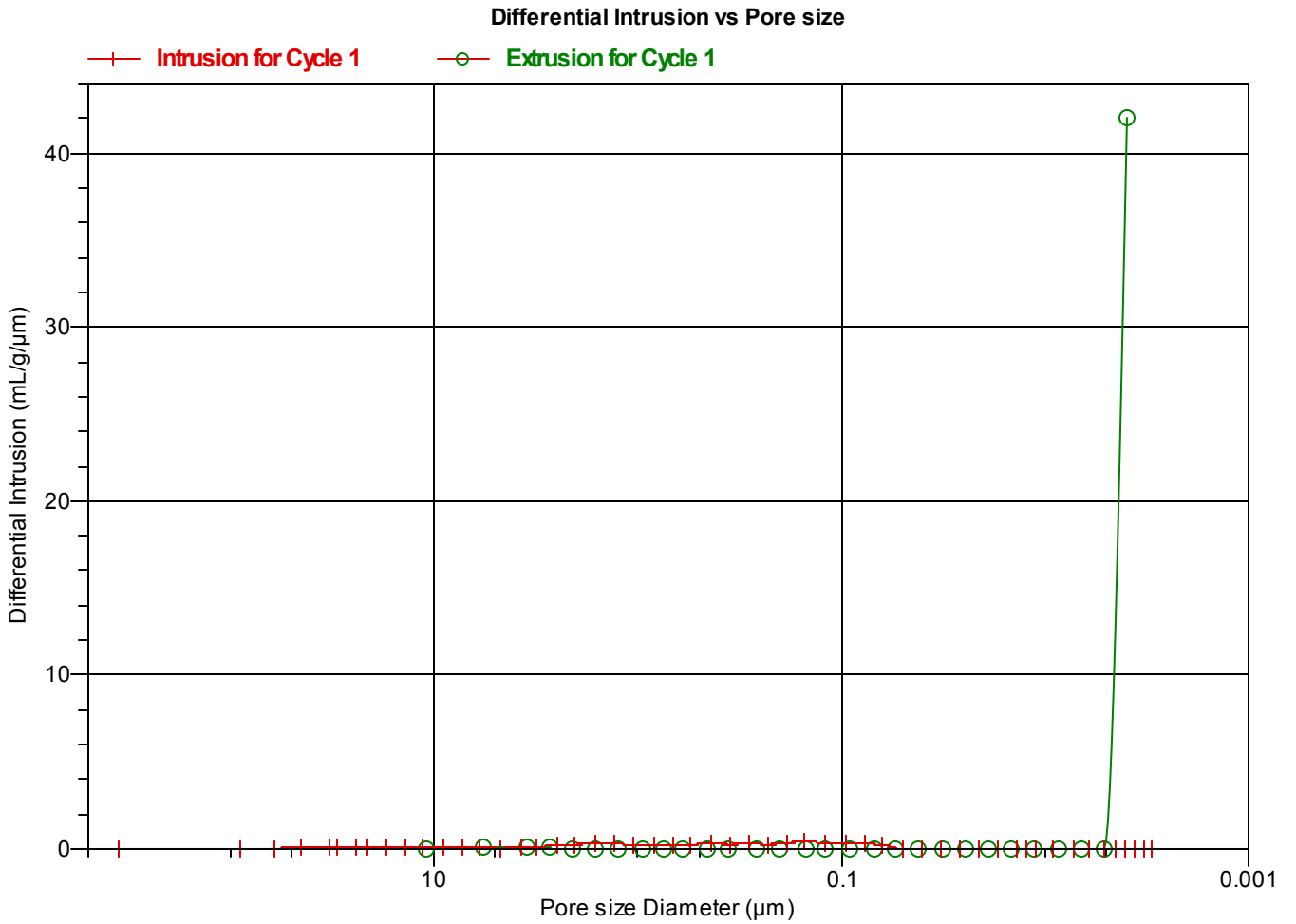
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Material Compressibility**

There were not enough data points in the selected pressure range to determine good compressibility results.

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Material Compressibility**

There were not enough data points in the selected pressure range to determine good compressibility results.

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

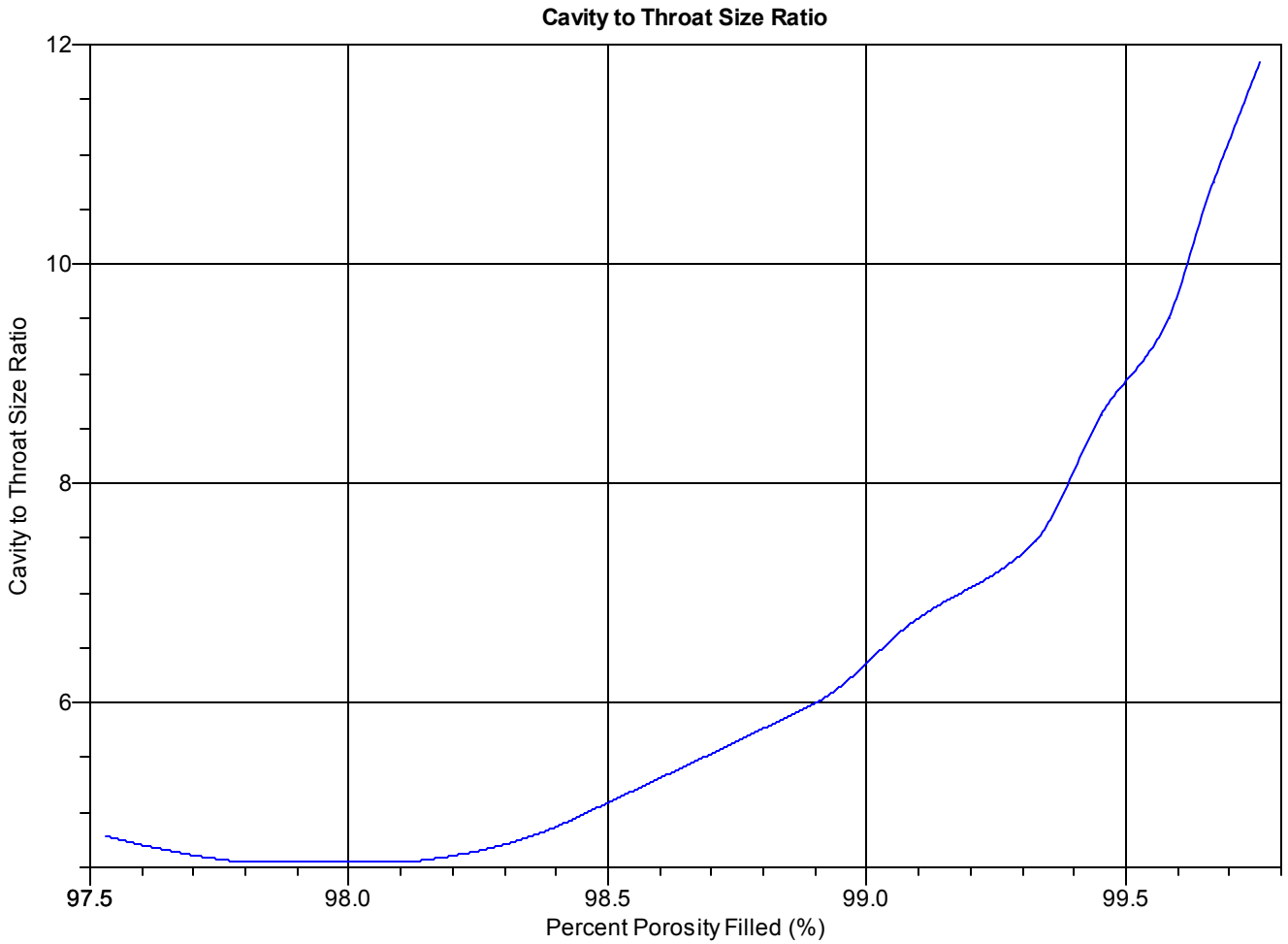
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 23 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Cavity to Throat Size Ratio**

Percent Porosity Filled (%)	Cavity to Throat Size Ratio
97.5283	4.785
98.1089	4.544
98.4297	4.932
98.6828	5.500
98.9062	6.010
99.0782	6.693
99.3237	7.468
99.4529	8.620
99.5821	9.508
99.6685	10.750
99.7590	11.840

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

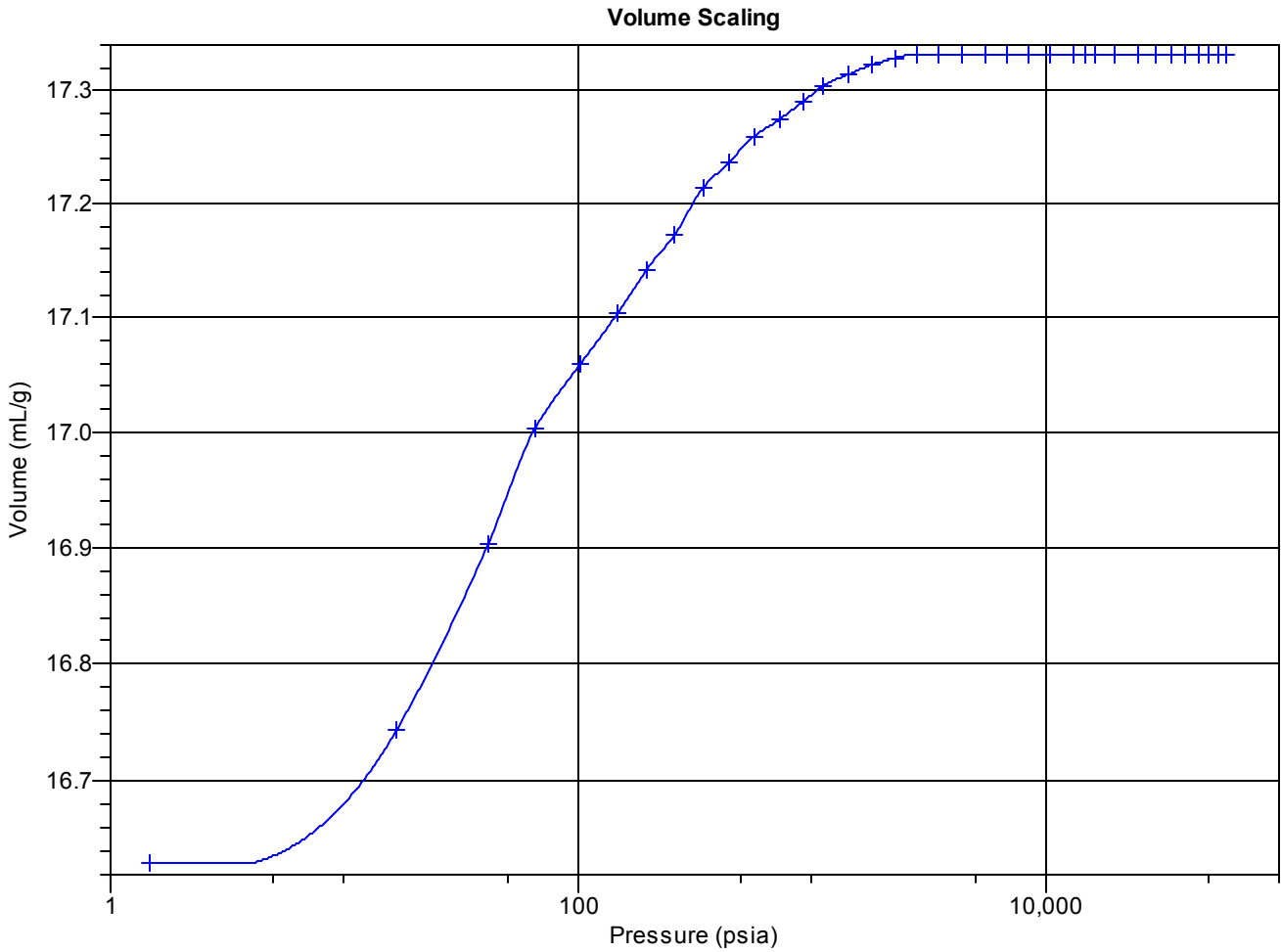
Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Fractal Dimension In Backbone Formation Summary**

Threshold Pressure: 71.39 psia (Calculated)

Pressure Range: 10.00 - 280.00 psia

Fractal Dimension: 2.977

RMS Error: 0.0464 mL/g

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

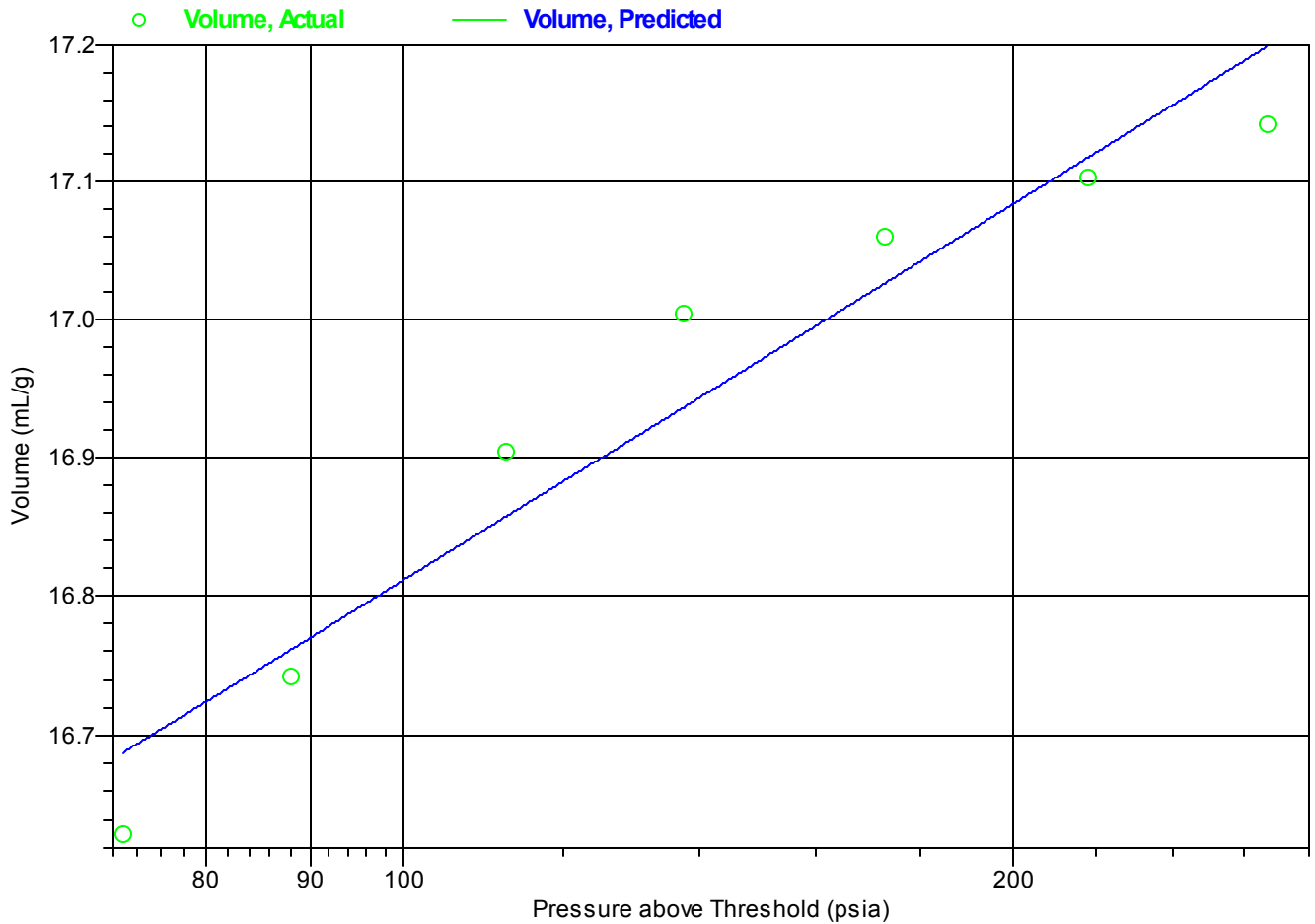
Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Fractal Dimension In Backbone Formation Region**



Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

**Fractal Dimension In Percolation Region Summary**

Threshold Pressure: 71.39 psia (Calculated)

Pressure Range: 2,500.00 - 10,000.00 psia

Fractal Dimension: 3.000

RMS Error: 0.0000 mL/g

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

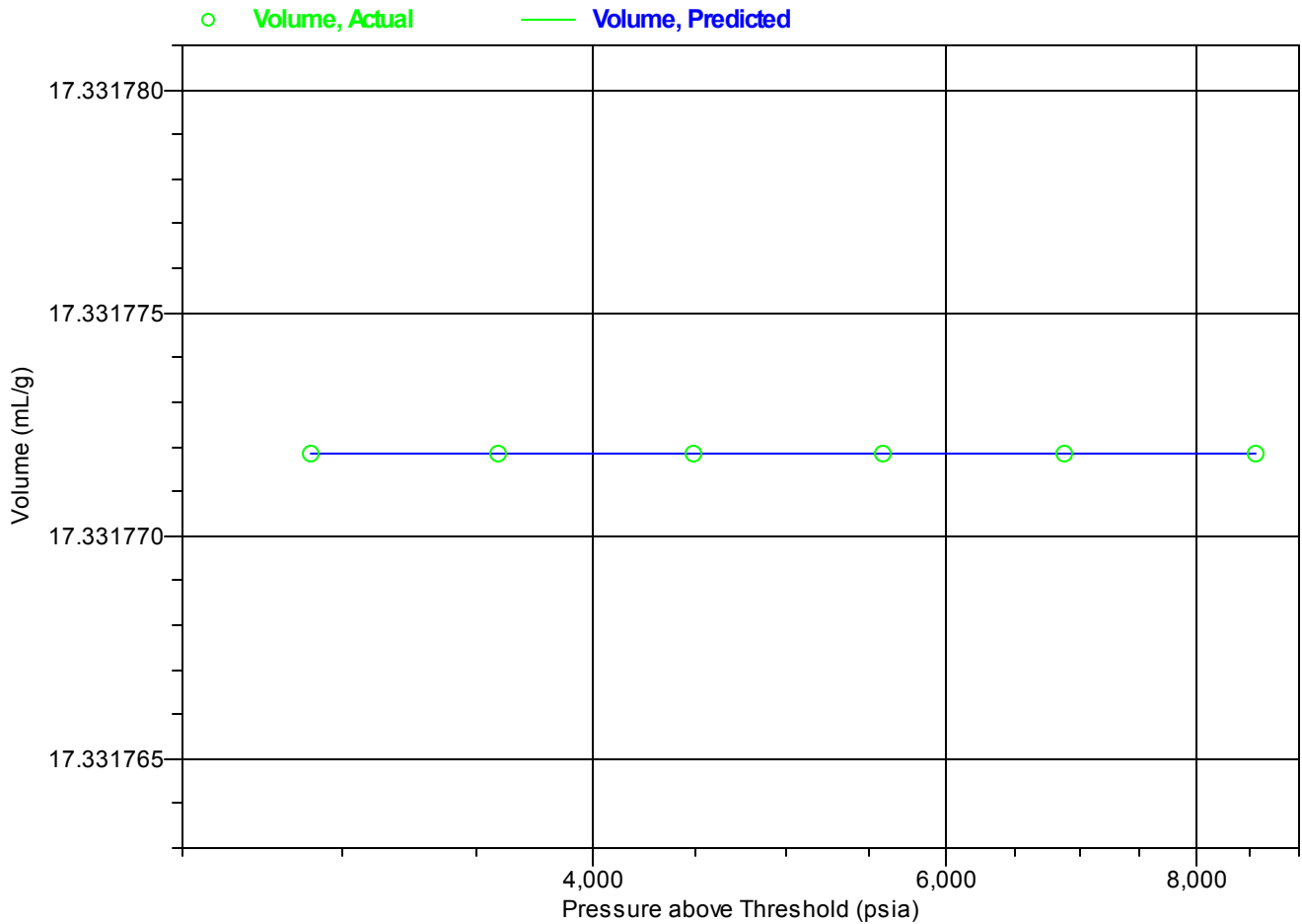
Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50  
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44  
Report Time: 9/6/2564 18:45:39  
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia  
Adv. Contact Angle: 130.000 °  
Rec. Contact Angle: 130.000 °

Sample Mass: 0.0124 g  
Stem Volume Used: 56 %  
Show Neg. Int: No  
Correction Type: None  
Mercury Temperature: 21.21 °C

**Fractal Dimension In Percolation Region**



MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

MicroActive AutoPore V 9600 1.03

MicroActive AutoPore V 9600 Version 1.03  
Serial # 130 Port 1/1

Page 29 of 29

Sample ID: PINF15-R2-640368-Port1-R2

Operator: TUCSEAR01

Submitter:

File: \\10.202.1.6\Report\_P...\PINF15-R2-640368-Port1-R2.SMP

LP Analysis Time: 25/5/2564 15:48:50	Sample Mass: 0.0124 g
HP Analysis Time: 25/5/2564 17:14:44	Stem Volume Used: 56 %
Report Time: 9/6/2564 18:45:39	Show Neg. Int: No
Report Range: 0.10 to 61,000.00 psia	Correction Type: None
Adv. Contact Angle: 130.000 °	Mercury Temperature: 21.21 °C
Rec. Contact Angle: 130.000 °	

Sample log

Date	Time	Log Message
25/5/2564	15:33:43	Starting low pressure analysis
25/5/2564	15:48:50	Finished low pressure analysis
25/5/2564	16:30:10	Starting high pressure analysis
25/5/2564	17:14:44	Finished high pressure analysis