



การพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟและการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
ในอากาศ

Development of the Passive Sampler and Analytical Method for
Volatile Organic Compound in Air

บุษกร เกลี้ยงเกล้า
Bussakorn kleangklaol

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟและการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
ในอากาศ

Development of the Passive Sampler and Analytical Method for
Volatile Organic Compound in Air

บุษกร เกลียงเกลา

Bussakorn kleangkao

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟและการตรวจวัดสารอินทรีย์ ระเหยง่ายในอากาศ
ผู้เขียน	นางสาวบุษกร เกลี้ยงเกลา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา ภูระหงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรวัติ ลิ้มสกุล)

.....กรรมการ
(ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการ
จัดการสิ่งแวดล้อม

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างูสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวบุษกร เกลี้ยงเกลา)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวบุษกร เกลี้ยงเกลา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟและการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ
ผู้เขียน	นางสาวบุษกร เกลี้ยงเกล้า
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาอุปกรณ์ชนิดแพสซีฟสำหรับเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายจำพวกสไตรีนที่ปนเปื้อนในอากาศ โดยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างถูกพัฒนาขึ้นให้อยู่ในรูปวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์จากขี้เถ้า ผสมกับแกรฟีนออกไซด์ ซึ่งเป็นการพัฒนาจากวัสดุธรรมชาติ หารได้ง่ายตามท้องตลาด ต้นทุนต่ำ สามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดังกล่าว สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดเชิงปริมาณโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับคือ ปริมาณผงขี้เถ้า 3 กรัม ผสมกับปริมาณแกรฟีนออกไซด์ 200 มิลลิกรัม ต่อน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนและกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันและนำไปขึ้นรูปในหลอดพลาสติกและแช่แข็งค้างคืน จากนั้นนำมาละลายน้ำแข็งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งวัสดุดูดซับซีโรเจล (xerogel) ที่ได้ จะมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ จากการวิเคราะห์สารสไตรีนด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) พบว่า มีสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ดังนี้ อุณหภูมิส่วนนำเข้าสู่สาร 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม 1 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิสุดท้าย 120 องศาเซลเซียส และคงที่ไว้ 1 นาที ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะให้กราฟมาตรฐานที่มีช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear range) ในระหว่าง 0.01 ถึง 200 ppm และ 0.005 ถึง 200 ppm_v สำหรับการวิเคราะห์สารสไตรีนรูปของเหลวและแก๊สตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มากกว่า 0.99 และให้ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณในรูปของเหลวต่ำสุดเท่ากับ 0.01 ± 0.00 และ 0.02 ± 0.00 ppm และในรูปของแก๊สต่ำสุดเท่ากับ 0.001 ± 0.000 และ 0.003 ± 0.000 ppm_v และมีความแม่นยำ (Accuracy) ของระบบที่พัฒนาขึ้นสูง โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error) มีค่าน้อยกว่า 10 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากการนำอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการเก็บตัวอย่างสไตรีนในพื้นที่โรงงานประกอบสระว่ายน้ำสำเร็จรูปและ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอุปกรณ์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ พบว่าการแขวนตัวอย่างจุดที่ความเข้มข้นของสไตรีนสูงจะใช้เวลาในการเก็บตัวอย่าง 3 วัน ขณะที่จุดที่มีความเข้มข้นต่ำจะใช้เวลา 7 วัน โดยสถานะในการคายการดูดซับด้วยความร้อนที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที โดยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างทั้งสองชนิดจะดูดซับสารสไตรีนได้แตกต่างกัน 2% และ 12.26% สำหรับพื้นที่เก็บตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำและสูงตามลำดับ สำหรับตัวแพสซีฟที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นมีต้นทุนในการวิเคราะห์ต่อหนึ่งครั้งเท่ากับ 145 บาท และสามารถเก็บรักษาไว้ภายในตู้ดูดความชื้น (desiccator) ได้ในระยะเวลา 3 สัปดาห์

คำสำคัญ: วัสดุดูดซับ สไตรีน แกรฟีนออกไซด์ แพสซีฟแซมเปิลอร์

Thesis Title	Development of the Passive Sampler and Analytical Method for Volatile Organic Compound in Air
Author	Miss Bussakorn Kleangklaio
Major Program	Technology and Environmental Management
Academic Year	2021

ABSTRACT

In this study, a passive sampler was successfully developed to trap styrene as volatile organic compounds (VOCs) contaminated in air. The adsorbent was produced from the mixture of graphene oxide and agar powder. The agar was introduced to the sampled as a support material, due to its advantages of naturally derived, biodegradable, low cost, and easy-to-find in the marketplace. The styrene was then analyzed by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). The experimental results showed that the optimum condition for the adsorbent synthesis was 3 g agar powder with 200 mg graphene oxide per 50 mL deionized water. The mixture was heated and stirred until the homogeneous solution was formed. It was then molded in the small plastic tube by freezing it overnight, before being thawed and dried in the hot air oven at 140 °C for 1.5 h. The adsorbent material was obtained as black solid xerogel. The following settings were found to be appropriate for styrene analysis using the gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technique: 120 °C injector temperature, helium gas flow rate of 1 mL min⁻¹, 50 °C initial column temperature for 1 min, 10 °C min⁻¹ ramp rate, and 120 °C final temperature for 1 min. The analytical performance showed a wide linear range of calibration graphs at 0.01 to 200 ppm and 0.005 to 200 ppm_v for styrene as liquid and gas state, respectively. The good correlation coefficient (R²) was greater than 0.99 throughout all experiments. The limit of detection and quantitation in liquid form was as low as 0.01±0.00 and 0.02±0.00 ppm, and in gas form as 0.001±0.000 and 0.003±0.000 ppm_v. The developed method presented great performances of accuracy with a relative error percentage in the acceptable range of less than 10. The performance of the designed passive devices was compared with commercially available devices by applying to the prefabricated swimming pool

factory. The samplers were suspended at the area for 3 days with high styrene concentration and 7 days at low ones. Styrene in collected samplers was then desorbed at 140 °C for 20 min and evaluated by using gas chromatography-mass spectrometry. The results showed that both types of sampling devices provided 2% and 12.26% differences for areas of low and high concentration, respectively. The cost of produced passive is 145 baht per analysis, and it can be stored in a desiccator for 3 weeks.

Keywords: adsorbent, styrene, graphene oxide, passive sampler

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล ที่ให้คำปรึกษา การวางแผนงาน แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ให้แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างมาก รวมทั้งการตรวจสอบข้อมูลและความถูกต้อง เพื่อให้การทำวิจัยครั้งนี้สมบูรณ์ที่สุด และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ รวมถึงชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา ภูระหงษ์ ดร.วิลาสินี ศรีพรหม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรวัติ ลิ้มสกุล คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลาในการมาสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีคุณภาพมากขึ้น

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย และสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่งานบัณฑิตศึกษา ที่คอยชี้แนะแนวทาง ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านการติดต่อประสานงานต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ให้บริการทดสอบตัวอย่างเป็นอย่างดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน ส่งเสริม และช่วยเหลือในทุกด้านจนสำเร็จการศึกษา ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ซึ่งผู้วิจัยอาจไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

บุษกร เกลี้ยงเกล้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	(5)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	(7)
กิตติกรรมประกาศ.....	(9)
สารบัญ.....	(10)
รายการตาราง.....	(13)
รายการรูป.....	(14)
สัญลักษณ์คำย่อ และตัวย่อ.....	(16)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วุ้น (Agar).....	5
2.1.1 โครงสร้างทางโมเลกุล.....	5
2.1.2 สมบัติของวุ้น.....	6
2.2 แกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide).....	7
2.2.1 โครงสร้างและสมบัติทั่วไป.....	7
2.2.2 ประโยชน์และการนำไปใช้.....	8
2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	9
2.3.1 ประเภทของ VOCs.....	9
2.4 สไตรีน (Styrene).....	10
2.4.1 คุณสมบัติทั่วไป.....	10
2.4.2 ประโยชน์และการนำไปใช้.....	11
2.4.3 ความเป็นพิษของสไตรีน.....	12
2.5 Passive sampling.....	12
2.5.1 การซึมผ่าน (Permeation).....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การแพร่ (Diffusion).....	13
2.6 ชนิดของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ	14
2.6.1 หลอด (tube)	14
2.6.2 แผ่นเหน็บ (badge)	15
2.6.3 แนวรัศมี (Radial).....	15
2.7 การดูดซับ	16
2.7.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)	16
2.7.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) หรือ Chemisorption	17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	21
3.1 วัสดุและสารเคมี	21
3.2 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์	22
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ	24
3.3.2 การศึกษาคุณลักษณะตัวดูดซับ.....	25
3.3.3 การวิเคราะห์สารสไตรีน.....	25
3.3.4 การศึกษาสภาวะในการคายการดูดซับที่เหมาะสม	29
3.3.5 การทดสอบตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในสภาพแวดล้อมจริง.....	29
3.3.6 การศึกษาความเสถียรของตัวดูดซับ (Stability)	31
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	32
4.1 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ.....	32
4.1.1 ปริมาณผงวุ้น	33
4.1.2 ปริมาณแกรฟีนออกไซด์.....	34
4.1.3 อุณหภูมิอบแห้ง	35
4.1.4 เวลาอบแห้ง	36
4.2 คุณลักษณะของวัสดุดูดซับ	37
4.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 หมู่ฟังก์ชัน.....	38
4.2.3 ความเสถียรภาพทางความร้อน.....	40
4.2.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจน	42
4.3 การวิเคราะห์สารสไตรีน	44
4.3.1 สภาวะของ GC-MS ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารสไตรีน	44
4.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารสไตรีน	51
4.3.3 สมรรถนะของระบบการวิเคราะห์.....	53
4.4 สภาวะในการคายการดูดซับ	55
4.5 การทดสอบวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในสภาพแวดล้อมจริง	56
4.5.1 การศึกษาระยะเวลาในการแขวนตัวอย่าง.....	56
4.5.2 การศึกษาผลของความสูง	58
4.5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์แพสซีฟที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ที่มีขาย ในเชิงพาณิชย์	59
4.6 การศึกษาความเสถียรของวัสดุดูดซับ (Stability).....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	84

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของสไตรีน..... 11
4.1	สรุปการศึกษาสภาวะ GC-MS ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารสไตรีน..... 51
4.2	ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 1..... 57
4.3	ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 2..... 57
4.4	ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 3..... 58
4.5	ผลของระดับความสูงในการแขวนตัวอย่าง..... 59
4.6	ค่าความเข้มข้นของสารสไตรีนในตัวอย่างจริง..... 60

รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของ agarose.....	5
2.2	โครงสร้างของ agaropectin.....	6
2.3	กลไกการเกิดเจล.....	7
2.4	โครงสร้างทางเคมีของแกรฟีนออกไซด์.....	8
2.5	การสังเคราะห์สไตรีน.....	10
2.6	สูตรโครงสร้างของสไตรีน.....	11
2.7	อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟชนิดหลอด (tube).....	14
2.8	อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟชนิดแผ่นเหน็บ (badge).....	15
2.9	อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟแบบแนวรัศมี (Radial).....	16
3.1	ถุงตาข่ายที่บรรจุด้วยตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้น.....	21
3.2	อุปกรณ์ป้องกันน้ำและฝุ่นสำหรับแขนงตัวดูดซับ.....	22
3.3	แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน.....	23
3.4	กระบวนการสังเคราะห์ตัวดูดซับ.....	24
3.5	กระบวนการขั้นตอนการเตรียมกราฟมาตรฐานแสดงความเข้มข้นของสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊ส.....	27
3.6	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ.....	30
4.1	ลักษณะของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้.....	32
4.2	ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์โดยใช้ผงวุ้นปราศจากแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	33
4.3	ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศ โดยใช้ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	35
4.4	ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ.....	36
4.5	ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศที่เวลาอบแห้งต่าง ๆ.....	37
4.6	ลักษณะพื้นผิวของ (a) วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และ (b) วัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO).....	38
4.7	สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และวัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO).....	40

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	TGA (a) และ ΔTG (b) ของวัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และวัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO)..... 41
4.9	ไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของ (a) วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ และ (b) วัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์..... 43
4.10	การกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของ (a) วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ และ (b) วัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์..... 43
4.11	ผลของอุณหภูมิหัวฉีดสารต่อพื้นที่ได้กราฟ..... 44
4.12	ผลการศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นต่อพื้นที่ได้กราฟ 45
4.13	ผลของระยะเวลาของอุณหภูมิเริ่มต้นต่อพื้นที่ได้กราฟ..... 46
4.14	ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อพื้นที่ได้กราฟ..... 47
4.15	ผลของอุณหภูมิสุดท้ายต่อพื้นที่ได้กราฟ..... 48
4.16	ผลการศึกษาระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้ายต่อพื้นที่ได้กราฟ..... 49
4.17	ผลของอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมต่อค่าความกว้างของเพลาทางทฤษฎี 50
4.18	โครมาโตแกรมของสารสไตรีนที่ความเข้มข้น 200 ppm _v 51
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลวกับพื้นที่ได้กราฟ 52
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊สกับพื้นที่ได้กราฟ..... 52
4.21	กราฟแสดงช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลวกับพื้นที่ได้กราฟ 54
4.22	กราฟแสดงช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊สกับพื้นที่ได้กราฟ..... 54
4.23	ผลของอุณหภูมิในการคายการดูดซับ..... 55
4.24	ผลของเวลาในการคายการดูดซับ..... 56
4.25	ผลของความเสถียรของวัสดุดูดซับ (Stability)..... 61

สัญลักษณ์คำย่อ และตัวย่อ

BET	The Brunauer–Emmett–Teller
cm ³ /g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
DTG	Derivative Thermogravimetric
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
GC-MS	Gas Chromatography Mass Spectrometry
GO	Graphene Oxide
LDR	Linear Dynamic Range
LOD	Limit of Detection
LOQ	Limit of Quantitation
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม
ppm	mg/L (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ppm _v	mL/m ³ (มิลลิลิตรต่อลูกบาศก์เมตร)
%RSD	Relative Standard Deviation Percentage
SD	Standard Deviation
SEM	Scanning Electron Microscope
TGA	Thermogravimetric Analysis
VOCs	Volatile Organic Compounds

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีความดันไอสูง มีค่ามากกว่า 0.14 มิลลิเมตรปรอท สามารถระเหยกลายเป็นไอหรือก๊าซได้ง่าย ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งสาร VOCs นั้นเกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งอีกแหล่งกำเนิดที่สำคัญของ VOCs เกิดจากการปล่อยออกมาจากการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งจากรถยนต์ และแหล่งกำจัดขยะ เป็นต้น โดยอุตสาหกรรมที่มีการปลดปล่อยของสาร VOCs เช่น อุตสาหกรรมการผลิตตัวทำละลายที่มี VOCs เป็นองค์ประกอบหลัก อุตสาหกรรมผลิตทินเนอร์ น้ำยาดับกลิ่น แลคเกอร์ และสารเคลือบผิว ดังนั้น VOCs จึงมีมากตามเมืองใหญ่ ๆ ซึ่งสาร VOCs เป็นมลสารที่สามารถก่อให้เกิดผลเสียรุนแรงต่อสุขภาพเรื้อรังในระยะยาวของมนุษย์และคุณภาพอากาศ โดยไอสารระเหยของสาร VOCs หลายชนิดที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ และถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ด้วย (สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2555)

สไตรีน (styrene) จัดอยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตสี ยางรถยนต์ โฟม พลาสติก พอลิเมอร์และการเคลือบผิวไฟเบอร์กลาส เป็นต้น และยังสามารถพบได้จากท่อไอเสียรถยนต์ ควันบุหรี่ และร้านถ่ายเอกสารทั่วไป โดยสารสไตรีนสามารถระเหยสู่อากาศได้ในปริมาณที่สูงมากถึง 10% จากกระบวนการสเปรย์หรือการเคลือบผิววัสดุ (Prado, *et al.*, 1997) ทำให้สามารถรับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงานได้ง่ายผ่านระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง การได้รับสไตรีนเพียงปริมาณเล็กน้อย ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบประสาท (neurotoxic) ความผิดปกติของระบบเลือด (hematological) ความผิดปกติทางพันธุกรรม (cytogenetic) และการเกิดโรคมะเร็ง (carcinogenic) ในมนุษย์ (Rene, *et al.*, 2011) ซึ่งระดับของสไตรีนที่มาตรฐานสำนักงานบริหาร

ความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งชาติ ประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational Safety and Health Administration : OSHA) อนุญาตให้มีได้ คือ 100 ppm_v ต่อระยะเวลา 8 ชั่วโมงของการทำงาน (ATSDR, 2002) ดังนั้น การผลิตวัสดุสำหรับดูดซับสารสไตรีนจึงมีความสำคัญทั้งในแง่การใช้ประโยชน์ในการกำจัดสไตรีนที่ปนเปื้อนในอากาศหรือการใช้เพื่อเก็บตัวอย่างสไตรีนไปวิเคราะห์ปริมาณในห้องปฏิบัติการ

โดยทั่วไปแล้ว การเก็บตัวอย่างอากาศ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ปนเปื้อนในบรรยากาศด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเก็บตัวอย่างอากาศแบบแอคทีฟ (active sampling) หรือการใช้ปั๊มดูดอากาศเข้าไปในถุงเก็บอากาศชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีข้อเสีย คือ ชุดเครื่องมือสำหรับการเก็บอากาศมีราคาสูง เนื่องจากส่วนประกอบของเครื่องมือต้องนำเข้าจากต่างประเทศและต้องใช้ไฟฟ้าในการเก็บตัวอย่าง ส่งผลให้ต้นทุนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีราคาสูง ส่วนอีกวิธีเรียกว่าการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟ (passive sampling) ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยหลักการแพร่ของสารเข้าไปยังสารดูดซับที่อยู่ในอุปกรณ์รูปแบบต่าง ๆ เช่น cartridge tube และ badge เป็นต้น (Wongniramaikul, 2012) โดยการแพร่ของโมเลกุลก๊าซเข้าสู่อุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะเป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิกส์ (Fick's law of distribution) ซึ่งอธิบายกลไกการแพร่ของโมเลกุลก๊าซจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ข้อดีของการเก็บอากาศแบบพาสซีฟ คือ เป็นวิธีที่ใช้ง่าย ไม่ซับซ้อน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และไม่มีกระแสไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้สะดวกต่อการนำไปติดตั้งเพื่อใช้ตรวจวัดคุณภาพอากาศได้ในสถานที่ต่าง ๆ ที่อุปกรณ์ชนิดแอคทีฟไม่สามารถนำไปติดตั้งได้ และยังสามารถใช้เก็บตัวอย่างอากาศหลาย ๆ สถานที่ในระยะเวลาเดียวกันได้ (วิญญู จิตสัมพันธเวช, และคณะ, 2550; วนิตา จินศาสตร์, 2551) นอกจากนี้ ยังมีความปลอดภัยในการใช้ติดตามตัวคน เพื่อตรวจสอบการสัมผัสสารพิษของผู้ปฏิบัติงานได้ ด้วยเหตุนี้ ในปัจจุบัน วิธีพาสซีฟจึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยนำมาใช้กับงานที่หลากหลาย เช่น การศึกษาความเข้มข้นของการปล่อยน้ำมันเบนซินและไอระเหยอื่น ๆ จากอู่ซ่อมรถ (Batterman, *et al.*, 2006) การตรวจสอบการเก็บตัวอย่างสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยวิธีการแพร่และการใช้ปั๊มดูดอากาศ (Martin, *et al.*, 2010) การประเมินการเก็บตัวอย่างด้วยพาสซีฟสองชนิดในการตรวจวัดสาร 1,3-บิวทาไดอิน และเบนซินในอากาศ (Strandberg, *et al.*, 2005) และการตรวจสอบสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่ไม่ใช่ที่พักอาศัย (Bruno, *et al.*, 2008)

แกรฟีนออกไซด์ เป็นวัสดุเชิงโลหะที่มีชั้นอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรง และเป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลเกี่ยวกับ

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนี้ ยังสามารถเป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดี (Zhu, *et al.*, 2010) อีกด้วย และเนื่องจากสมบัติที่ดีเหล่านี้ ทำให้ในปัจจุบัน แกรฟีนออกไซด์เป็นที่นิยมนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น ระบบนำส่งยา (Drug delivery) (Yang, *et al.*, 2013) และ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) (Li, *et al.*, 2010) เป็นต้น นอกจากนี้ ในปัจจุบัน ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำแกรฟีนออกไซด์มาผสมกับพอลิเมอร์ และสารประกอบทางเคมี เพื่อที่จะนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับสำหรับงานประเภทต่าง ๆ (Yao, *et al.*, 2020; Segovia-Sandoval, *et al.*, 2020; Yu, *et al.*, 2018; Chullasat, *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม การนำสารเคมีมาใช้เป็นวัสดุผสมในการสังเคราะห์ตัวดูดซับนั้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาของเสียอันตรายขึ้นหลังการใช้งานตัวดูดซับได้

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ชนิดแพสซีฟสำหรับเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายจำพวกสไตรีนที่ปนเปื้อนในอากาศ และอาศัยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) โดยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะพัฒนาให้อยู่ในรูปวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุผสมแกรฟีนออกไซด์ เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุธรรมชาติ ซึ่งหาได้ง่ายตามท้องตลาด ต้นทุนต่ำ สามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างและวิธีการตรวจสอบสารสไตรีนในอากาศจากวัสดุธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์สารสไตรีนด้วยเครื่อง GC-MS ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม อุณหภูมินำเข้าสู่สาร และอุณหภูมิของคอลัมน์

1.3.2 สภาวะในการสังเคราะห์ตัวดูดซับของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณผงฝุ่น ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ และอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับ

1.3.3 การเตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS จะใช้เทคนิค Thermal desorption โดยสภาวะที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน

1.3.4 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับ อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟที่มีขายในเชิงพาณิชย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับอุปกรณ์เก็บตัวอย่างสารสไตรีนในอากาศที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ ที่มี ประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

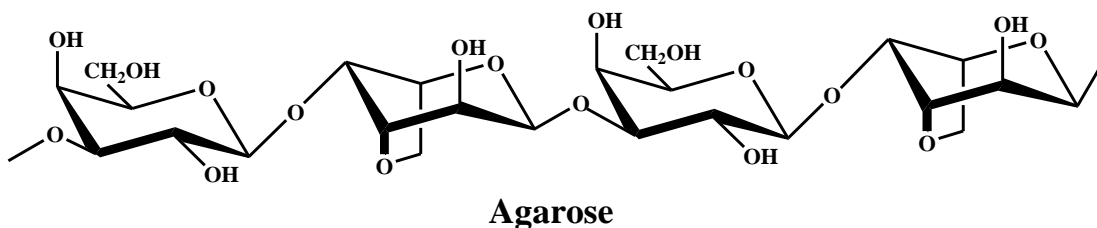
ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

2.1 วุ้น (Agar)

วุ้น (agar) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ที่ทำให้เกิดเจล โดยที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเล ซึ่งสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae phylum) เป็นสาหร่ายที่มีมากที่สุดแห่งหนึ่งตามแนวชายฝั่ง สาหร่ายที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ *Gracilaria confervoides*, *Gelidium cartilagineum* และ *Pteroclaia capillacea* ซึ่งสองชนิดแรกใช้ผลิตวุ้นทางการค้า ประเทศที่ผลิตได้แก่ ญี่ปุ่น ชิลี สเปน และเกาหลี

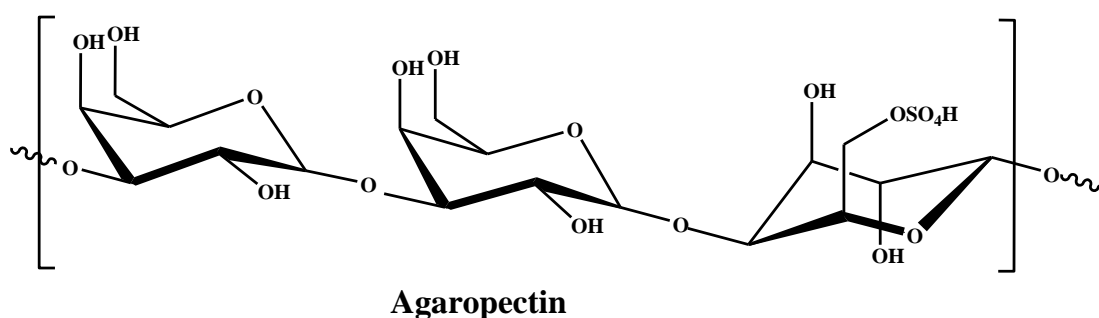
2.1.1 โครงสร้างทางโมเลกุล

โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น ประกอบด้วย agarose และ agaropectin ซึ่ง agarose เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกาแลคโตส (galactose) โครงสร้างโมเลกุล ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) คือ อากาโรไบโอส (agarobiose) ซึ่งประกอบด้วย 1,3 linked β -D-galactose และ 1,4 linked 3,6-anhydro-L-galactose เรียงสลับกันไปด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic linkage) agarose ค่อนข้างที่จะเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีประจุน้อยมาก ๆ จึงถูกเรียกว่า non-ionic polysaccharide โครงสร้างของ agarose แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ agarose (Usov, 1998)

ส่วน agaropectin เป็นโพลีแซคคาไรด์ซัลเฟตที่มีโครงสร้างคล้ายอะกาโรส แต่ 3,6-anhydro-L-galactose บางโมเลกุลนั้นถูกแทนที่ด้วย L-galactose sulfate จะมีอนุมูลซัลเฟตเกาะอยู่ และบางโมเลกุลของ D-galactose ถูกแทนที่ด้วย D-galactose sulfate หรือมีหมู่ไพรรูเวทเกาะอยู่ (4,6-O-(1-carboxy ethylidene)-D-galactopyranose) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้มีประจุ บางครั้งจึงเรียกว่า charged agarose โครงสร้างของ agaropectin แสดงดังรูปที่ 2.2 (Usov, 1998; Saxena, *et al.*, 2011; Lahaye and Rochas, 1991)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ agaropectin (Usov, 1998)

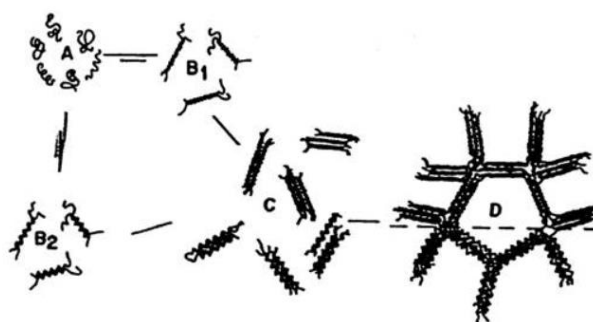
2.1.2 สมบัติของวุ้น

สมบัติการละลาย ปกติวุ้นจะไม่ละลายน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส แต่จะละลายได้ดีในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไป หากใช้สารละลายวุ้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 จะต้องใช้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส ร่วมกับการคนสารละลายขณะให้ความร้อน จึงจะมีการละลายอย่างสมบูรณ์ หากใช้ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 5 ต้องใช้หม้อนิ่งอัดความดันช่วยในการละลาย (Armisen, *et al.*, 2009)

การเกิดเจลของวุ้น เกิดขึ้นเมื่อมีการละลายผงวุ้นซึ่งวุ้นมีความสามารถดูดน้ำได้ดี โดยโมเลกุลของอะกาโรสในสารละลายมีลักษณะเป็นแบบ random coil แบบ A โครงสร้างโมเลกุลอยู่แบบไม่เป็นระเบียบ เมื่อมีการลดลงของอุณหภูมิ พอลิเมอร์แต่ละสายเกิดการพันกันเป็นเกลียวคู่แบบ B1 (antisymmetric double helices) หรือ B2 (symmetric double helices) เมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีก ปลายสายของ double helice จะเกิดการรวมกัน โดยเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เรียกว่า junction zone จะได้โครงสร้างลักษณะเป็นแบบ C,D และเมื่อมีการรวมตัวกันมากขึ้นเจลวุ้นจะมีการแข็งตัวมากขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ ดังรูปที่ 2.3 การที่จะเกิดรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิลดเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C,D

(ส่วนบน) และ หากนำเจลวุ้นไปให้ความร้อนอีกครั้งพอลิเมอร์ที่จับกันจะค่อย ๆ คลาย และถ้าให้ความร้อนมากกว่า 95 องศาเซลเซียส เจลวุ้นจะกลับมาเป็นสารละลายอีกครั้ง ซึ่งเจลวุ้นที่ได้นั้นมีสมบัติเป็น thermos reversible gel โดยทั่วไปอุณหภูมิเกิดเจลประมาณ 35-40 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 85-90 องศาเซลเซียสโครงสร้างของเจลจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อแข็ง ชุ่ม สีเหลืองอ่อน เปราะ แตกได้ง่าย เกิดการแยกตัวของน้ำ เนื้อสัมผัสเป็นแบบ juiciness และ crunchy

การเติมน้ำตาลหรือเดกซ์ทรินผสมกับโกลด์สปีนกัมจะทำให้เจลเกิดขึ้นมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดการเกิดการแยกตัวของน้ำ แต่ถ้าเติมแป้งหรือโซเดียมอัลจิเนตจะให้ผลตรงกันข้าม คือทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เจลที่เกิดจากวุ้นทนความร้อนได้ เพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลกับอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงที่ห่างกันมาก



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดเจล (Medin, 1995)

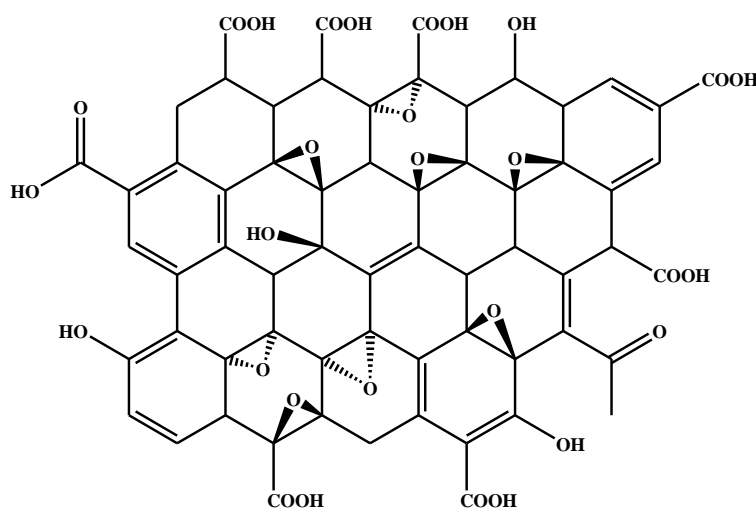
2.2 แกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)

2.2.1 โครงสร้างและสมบัติทั่วไป

แกรฟีนออกไซด์เป็นวัสดุกึ่งโลหะ 2 มิติ ที่มี 1 ชั้นอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรง และเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะเหมือนกับรังผึ้ง ทำให้แกรฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงกว่าเพชร มีความหนาในระดับนาโนและมีพื้นที่ผิวสูง (236 ตารางเมตรต่อกรัม) หากนำแกรฟีนออกไซด์มาวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นจะได้แกรไฟต์ที่เรารู้จักกันดีในรูปของไส้ดินสอ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีความหนาเพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียว ทำให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวของแกรฟีนออกไซด์ที่มีความโดดเด่นกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่น

คือ มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงมากกว่าสแตนเลสถึง 200 เท่า มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนที่ดีมาก โดยเฉพาะความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงแสงของแกรฟีนออกไซด์ในการดูดซับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ตั้งแต่อัลตราไวโอเลตช่วงที่ตามองเห็นได้ และอินฟราเรด สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ 2.3% (Nayar, *et al.*, 2012; Chang and Liao, 2016)

แกรฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ ด้วยวิธีของฮัมเมอร์ (Hummers method) (Hummers and Offeman, 1958) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สามารถปรับเปลี่ยนได้และสามารถผลิตขึ้นได้ในปริมาณที่มาก แกรฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ผิวจำนวนมาก ได้แก่ หมู่อีพอกไซด์ (Epoxide), ไฮดรอกซิล (Hydroxyl), คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และฟีนอล (Phenol) (Park, *et al.*, 2009) (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของแกรฟีนออกไซด์ (Aunkor, *et al.*, 2015)

2.2.2 ประโยชน์และการนำไปใช้

เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรง การนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม และความยืดหยุ่นสูง สามารถถูกบิดงอได้ จึงมีการนำวัสดุแกรฟีนมาใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ใช้แกรฟีนออกไซด์คอมโพสิตมาทำไม้เบดมินตันและไม้เทนนิส ทำให้ได้อุปกรณ์กีฬาที่มีความแข็งแรงทนทานแต่น้ำหนักเบากว่าเดิม ทำหน้าจอบแบบสัมผัสที่โค้งงอได้ และวัสดุนำส่งยาระดับนาโนในทางการแพทย์ และด้วยสมบัติเชิงแสงที่ดี สามารถนำมาพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสใช้สำหรับงาน เช่น จอสัมผัส เซลล์แสงอาทิตย์ ไดโอดเปล่งแสง หรือในงานทางโฟโตนิกส์ และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่

2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds; VOCs) หมายถึง สารที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนหลัก และมีไฮโดรเจน ออกซิเจน คลอไรด์ ฟลูออไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบเข้าด้วยกันเป็นพวกอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) รวมถึงกลุ่มของคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์ คีโตน) และกลุ่มแอลกอฮอล์ มีความดันไอมากกว่า 0.14 มิลลิเมตรปรอท สามารถระเหยกลายเป็นไอหรือก๊าซได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นสารตัวทำละลายที่ดี โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม (กระทรวงสาธารณสุข สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย, 2555)

2.3.1 ประเภทของ VOCs

1) แบ่งออกตามลักษณะของโมเลกุล เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

a. Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีอะตอมของฮาโลคลอรีนในโมเลกุล ประกอบด้วย อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (เช่น มันเชื้อเพลิง แก๊สโซลีน เฮกเซน อุตสาหกรรมตัวทำละลาย แอลกอฮอล์ คีโตน) และกลุ่มสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (เช่น สารตัวทำละลายจำพวก โทลูอีน เบนซีน เอทิลเบนซีน ไซลีน สไตรีน ฟีนอล) สารกลุ่มจำพวก VOCs กลุ่มนี้มีแหล่งกำเนิดทั้งจากสิ่งแวดล้อมและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ สารตัวทำละลาย กองขยะ วัสดุพลาสติก สีทาวัสดุ เป็นต้น ซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพ โดยเฉพาะบุคคลที่ต้องทำงานสัมผัสกับสารเหล่านี้เป็นประจำ เช่น คนเผาถ่าน คนงานเผาขยะ พนักงานดับเพลิง เป็นต้น ซึ่งมักป่วยด้วยโรคทางเดินหายใจบ่อย เนื่องจากได้รับสาร VOCs ประมาณ 144 ชนิด เป็นประจำจากเชื้อเพลิงและควันไฟในรูปของ เบนซีน โทลูอีน แนพทาลิน โพรพิน และ 1,3-บิวตะไดอิน

b. Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons คือ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีฮาโลคลอรีนในโมเลกุล ส่วนใหญ่จะเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม สาร Chlorinated VOCs นี้ มีความเสถียรและเป็นพิษในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มแรก (Non-Chlorinated VOCs) เพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและฮาโลเจนฮาโลเจนสลายตัวได้ยากในธรรมชาติ ทนทาน มีความคงตัวสูง ทั้งทางชีวภาพ ทางกายภาพหรือทางวิธีเคมี ทำให้สะสมในสิ่งแวดล้อมได้นาน ส่งผลต่อการทำงานของสารพันธุกรรมหรือไปรบกวนการยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้

2) การแบ่งประเภทตามลักษณะของโครงสร้าง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

a. กลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbons) หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีอะตอมคาร์บอนต่อเป็นสายโซ่ปลายเปิด อาจต่อกันเป็นสายยาวไม่มีกิ่งก้านสาขา เรียกว่า โซ่ตรง และอาจต่อกับคาร์บอนเป็นสายยาวที่เรียกว่า โซ่กิ่ง แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามชนิดพันธะ คือ พันธะเดี่ยว (alkane) พันธะคู่ (alkene) และพันธะสาม (alkyne)

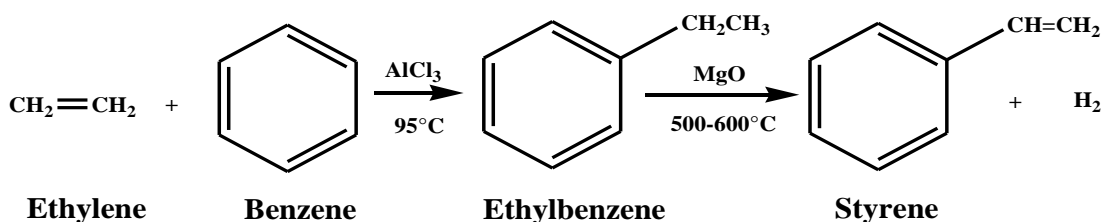
b. กลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbons) หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่ประกอบไปด้วยวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป โดยจัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจน และคาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น สารโทลูอีน (Toluene) สารไซลีน (Xylenes) และสารเบนซีน (Benzene)

c. กลุ่มออกซิเจน (Oxygenated) หมายถึง สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารคีโตน (Ketones) และ สารอะซิโตน (Acetone)

2.4 สไตรีน (Styrene)

2.4.1 คุณสมบัติทั่วไป

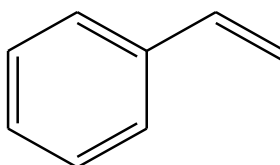
สไตรีน หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ethenylbenzene (IUPAC), vinyl benzene และ phenylethene สังเคราะห์ขึ้นได้จากการดึงอะตอมไฮโดรเจน (dehydrogenation) ออกจาก ethylbenzene ดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปสไตรีนจะมีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายกับน้ำมัน เป็นสารที่ไม่มีสี จนถึงมีสีเหลือง มีกลิ่นฉุน ไม่ละลายน้ำ เป็นสารที่ติดไฟง่าย ระเหยกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสามารถระเหยกลายเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว และสามารถแพร่กระจายได้อย่างกว้างขวาง เมื่อถูกอากาศ หรือถูกแสงจะเกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ (polymerization) อย่างช้า ๆ เกิดเป็น โพลีสไตรีน (polystyrene) (ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์, 2535) คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของสไตรีน แสดงดังรูปที่ 2.6 และ ตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์สไตรีน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสไตรีน

คุณสมบัติ	สไตรีน
สูตรทางเคมี	C ₈ H ₈
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	104.15
จุดเดือด (°C)	145
จุดหลอมเหลว (°C)	-31
ความหนาแน่นจำเพาะที่ 20 °C (g/mL)	0.906
ความสามารถการละลายน้ำที่ 20 °C (g/l)	0.3
ความดันไอที่ 20 °C (mmHg)	5



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของสไตรีน

2.4.2 ประโยชน์และการนำไปใช้

สไตรีนโมโนเมอร์ได้มีการนำมาใช้ในกระบวนการผลิตโพลีสไตรีน (Polystyrene) ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีชั้นกลาง ซึ่งเป็นส่วนผสมอยู่ในน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) และได้ใช้สไตรีนเป็นสารตั้งต้นหรือสารโมโนเมอร์ (monomer) ในกระบวนการผลิตโคโพลิเมอร์ (copolymer) ที่มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโพลิเมอร์สังเคราะห์ต่าง ๆ ได้แก่ โพลีสไตรีน (Polystyrene; PS) (กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ ฉนวน อุปกรณ์ต่าง ๆ ของเล่น เฟอร์นิเจอร์ กล่องเทปคาสเซ็ท) อะคริลิกเรซิน (Acrylic Resin) (สีเคลือบผิว) เรซินโพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin; UPR) (งานก่อสร้าง ประยุกต์ใช้ในงานทางทะเล) อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene Styrene; ABS) (วัสดุก่อสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องจักร ชิ้นส่วนรถยนต์ กระเป๋า ท่อ และกล่องบรรจุชิ้นส่วนอุปกรณ์) สไตรีน-อะคริโลไนไตรล์ เรซิน (Styrene Acrylonitrile Resin; SAN) (สุกภัณฑ์ ใบพัดพัดลม เครื่องปั่นน้ำผลไม้ บรรจุภัณฑ์เครื่องสำอาง ไฟแช็ก) สไตรีนบิวทาไดอีน รับเบอร์ (Styrene Butadiene Rubber; SBR) (ยางรถยนต์ และสายยาง) และ กาวลาเทกซ์ สไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Latex; SB Latex) (ผลิตภัณฑ์ที่ใช้กระดาษและผ้าพิมพ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552))

2.4.3 ความเป็นพิษของสไตรีน

ความเป็นพิษของสไตรีนนั้นก่อให้เกิดอันตรายแก่ร่างกายได้ 2 ลักษณะ คือ พิษเฉียบพลัน (Acute toxic) และพิษเรื้อรัง (Chronic toxic) การเกิดพิษในแต่ละบุคคลแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอายุ เพศ ปริมาณสไตรีนที่ร่างกายได้รับ ตลอดจนความสามารถของตับในการขับสารพิษ ออกจากร่างกาย (Dimian, *et al.*, 2019)

1) พิษเฉียบพลัน (Acute toxic)

ความเป็นพิษเฉียบพลันเมื่อถูกผิวหนัง จะเกิดการระคายเคืองผิวหนัง เมื่อเข้าตาจะระคายเคืองต่อดวงตา ซึ่งพิษต่อระบบประสาทสำหรับการมองเห็นนั้น อาจทำให้เส้นประสาทตาอักเสบได้ (retrobulber optic neuritis) ภาพที่มองเห็นอาจหายไปบางส่วน (central scotoma) และทำให้ตาบอดสี (loss of color vision) และเมื่อมีการหายใจเข้าไป ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อบุทางเดินหายใจ ทำให้ไอ แน่นหน้าอก และหายใจลำบาก เมื่อสูดดมจนถึงระดับที่ก่อให้เกิดพิษ ทำให้ปวดศีรษะ เวียนศีรษะเหมือนคนเมา อ่อนเพลีย มึนงง ง่วงซึม

2) พิษเรื้อรัง (Chronic toxic)

ความเป็นพิษเรื้อรังเมื่อเกิดการสัมผัสทางผิวหนังระยะยาว ทำให้เกิดผื่นผิวหนัง อักเสบ ผิวแห้งแตก คัน และจากการสูดดมระยะยาวจะมีผลต่อระบบประสาททำให้วิงเวียน มึนงง อ่อนเพลีย เบื่ออาหาร คลื่นไส้ เดินเซ ชาปลายมือปลายเท้า ความจำไม่ดี หัวใจเต้นผิดปกติ ทำให้เกล็ดเลือดต่ำ ต่อม้ำเหลืองผิดปกติ และทำให้เกิดผิดปกติของโครโมโซมในคน เพิ่มการแท้งในสตรีมีครรภ์ ระบบฮอร์โมนผิดปกติโดยเฉพาะการทำงานของต่อมไทรอยด์และการมีประจำเดือนผิดปกติ และอาจทำให้เกิดมะเร็งในคนและสัตว์

2.5 Passive sampling

Passive sampling คือ การเก็บตัวอย่างโดยการอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ ณ สภาวะคงที่ (Steady state) โดยการดูดซึมทางเคมีหรือ การดูดซับทางด้านกายภาพบนตัวกลาง (Medium) ซึ่งวิธีนี้ไม่ต้องใช้ปั๊มในการเก็บตัวอย่าง (สาวิตรี พูลมา, 2548; วนิตา จินศาสตร์, 2551) โดยหลักการของการเก็บแบบแพสซีฟ แบ่งได้เป็น 2 แบบดังนี้

2.5.1 การซึมผ่าน (Permeation)

การซึมผ่านโมเลกุลของก๊าซผ่านทางเยื่อผ่าน (membrane) มวลของก๊าซจะขึ้นอยู่กับอัตราการซึมผ่าน ความเข้มข้นของก๊าซและระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อผ่าน การเก็บตัวอย่างก๊าซแต่ละชนิดต้องศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของสารตัวอย่างแต่ละชนิดและควรเลือกเยื่อผ่านให้เหมาะสมกับก๊าซที่ต้องการเก็บตัวอย่าง อาทิ ความหนาของเยื่อผ่าน ความทนทานต่อการกัดกร่อน และเลือกใช้เฉพาะกับก๊าซตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้นในการศึกษา เช่น ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) หรือ ฟอรัมาลดีไฮด์ (CH₂O) เป็นต้น

2.5.2 การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเก็บตัวอย่างที่อาศัยการแพร่ของโมเลกุลก๊าซ ซึ่งมวลของก๊าซที่เก็บได้จะถูกควบคุมโดยความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแพร่สปีฟ และคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของก๊าซแต่ละชนิด อัตราการเก็บตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของก๊าซที่เก็บและพื้นที่หน้าตัดของ Passive sampler ลักษณะของ Passive sampler ที่อาศัยหลักการแพร่ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นหลอดที่มีตัวดูดซับที่มีฝาครอบเป็นช่องตะแกรง ป้องกันผลกระทบจากกระแสลม ในขณะที่เก็บตัวอย่าง ความเข้มข้นของก๊าซสามารถคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดของตัวดูดซับ ระยะทางจากผิวหน้าของตัวแพร่สปีฟถึงสารดูดซับ สัมประสิทธิ์การแพร่และระยะเวลา ซึ่งอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิคค์ (Fick's First Law of Diffusion) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) (Thammakhet, *et al.*, 2006)

$$Q = \frac{AD(C_1 - C_0)t}{L} \quad (2.1)$$

โดยที่	Q	คือ	มวลของสารตัวอย่างที่ถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับ (ไมโครกรัม)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเส้นทางการแพร่ของอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)
	D	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ของสารตัวอย่างในอากาศ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
	C ₁	คือ	ความเข้มข้นของสารตัวอย่างในอากาศ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

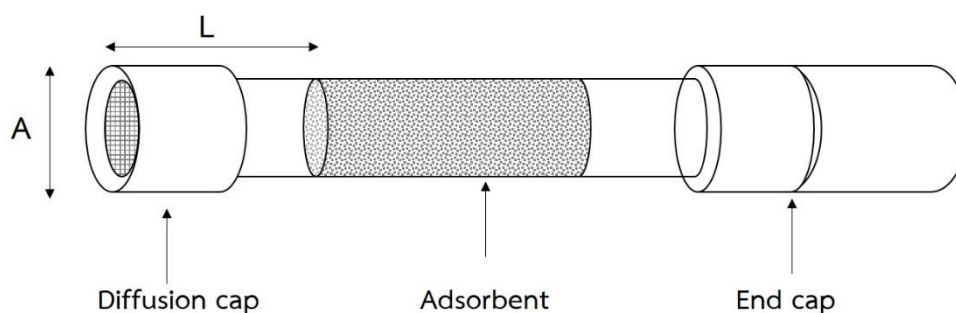
C_0	คือ	ความเข้มข้นของสารตัวอย่างบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
t	คือ	ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง (วินาที)
L	คือ	ความยาวของเส้นทางการแพร่ (Diffusion Path) ของสารประกอบ (เซนติเมตร)

2.6 ชนิดของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟประเภทการแพร่กระจายสามารถแบ่งออกเป็นประเภท หลอด (tube) แผ่นเหน็บ (badge) และแนวรัศมี (radial) ซึ่งแต่ละชนิดมีอัตราการดูดซับ (Uptake Rate) ที่แตกต่างกันอย่างมาก เหมาะสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้ (EPA, 2014)

2.6.1 หลอด (tube)

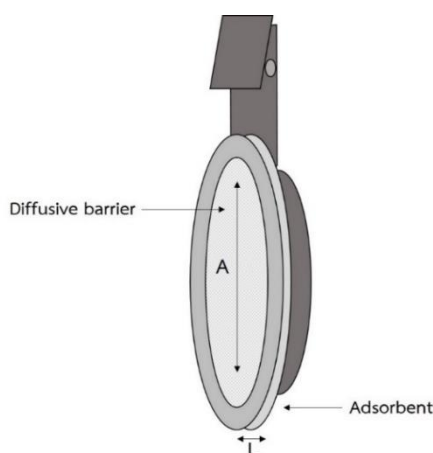
ลักษณะของหลอดเป็นรูปทรงกระบอกมีลักษณะพื้นที่ผิวหน้าตัดที่ค่อนข้างเล็ก (A) และความยาวเส้นทางการแพร่กระจาย (L) ยาวกว่า เมื่อเทียบกับรูปแบบแผ่นเหน็บและรัศมี จึงมีอัตราการดูดซับที่ต่ำกว่า เหมาะสำหรับการตรวจสอบระยะยาว (ค่าเฉลี่ยรายเดือน) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะนิยมนำไปใช้ในการเก็บตัวอย่างแบบแอคทีฟ ซึ่งใช้ปั๊มดูดอากาศในการเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างของเครื่องเก็บตัวอย่างแบบหลอดที่มีจำหน่ายทั่วไป เช่น ORSA 5 และ Thermal desorption tube (Markes International Ltd; UK) (รูปที่ 2.7) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟชนิดหลอด (tube) (EPA, 2014)

2.6.2 แผ่นเหน็บ (badge)

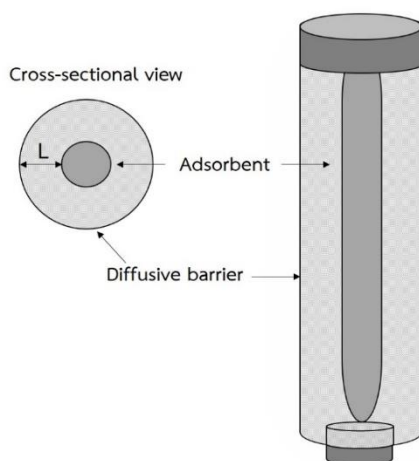
อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟแบบแผ่นเหน็บมีลักษณะเป็นพื้นที่ผิวหน้าตัด (A) ที่กว้าง และความยาวเส้นทางการแพร่กระจาย (L) ที่สั้น ส่งผลให้อัตราการดูดซับค่อนข้างสูงกว่าตัวอย่างแบบหลอด เนื่องจากความยาวเส้นทางการแพร่กระจายที่สั้นและพื้นที่ผิวที่กว้างจึงเหมาะสำหรับการตรวจสอบระยะสั้น (ค่าเฉลี่ยรายวัน) เช่น การสัมผัสส่วนบุคคล เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แผ่นไมโครพอร์ส (Microporus Membrane) ในการแยกสิ่งเจือปนออกก่อนที่สารตัวอย่าง จะเข้าไปถูกจับด้วยสารดูดซับ (เช่น SKC Ultra; 575 และ 521 Organic Vapor Badge จาก Assay Technologies เป็นต้น) หรือพลาสติกที่มีรูพรุน (เช่น 3M OVM 3500 เป็นต้น) (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟชนิดแผ่นเหน็บ (badge) (EPA, 2014)

2.6.3 แนวรัศมี (Radial)

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟแบบ แนวรัศมี เป็นอุปกรณ์ที่มีการเก็บวัสดุดูดซับไว้ในท่อตาข่าย เป็นท่อดูดซับที่บรรจุอยู่ในกระบอกที่มีรูพรุนซึ่งทำหน้าที่เป็นกระบอกบังลม ใช้ในการป้องกันแมลงหรือฝุ่นละออง และช่วยในการควบคุมอัตราการเก็บตัวอย่างให้คงที่ อุปกรณ์แบบแนวรัศมีนั้น มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และมีเส้นทางการแพร่กระจายในระยะสั้น ๆ เป็นผลให้โดยทั่วไปตัวอย่างแบบแนวรัศมี มีอัตราการดูดซับสูงกว่าแบบหลอดและแบบแผ่นเหน็บ อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแนวรัศมี ได้รับการจดสิทธิบัตรโดย Fondazione Salvatore Maugeri เป็นอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง Radiello sampler (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟแบบแนวรัศมี (Radial) (EPA, 2014)

2.7 การดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของก๊าซถูกพื้นผิวของวัสดุดูดซับดูดด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เมื่ออุณหภูมิคงที่ ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของก๊าซ นอกจากนี้ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับยังขึ้นกับพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับและเป็นสัดส่วนผกผันกับความสามารถในการระเหยของสารตัวอย่าง โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้เป็นสารดูดซับจะมีลักษณะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารตัวอย่างได้เยอะ ขนาดของรูพรุน (Pore size) และขนาดของอนุภาคจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยที่อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ขณะที่สารสามารถดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของสารอื่น จะเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ส่วนกระบวนการที่ทำให้สารถูกดูดซับหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับเรียกว่า การคายการดูดซับ (Desorption) (สาวิตรี พูลมา, 2548) กระบวนการดูดซับ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.7.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นกระบวนการดูดซับที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ดูดซับและตัวดูดซับเป็นแรงค่อนข้างอ่อน ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนเช่นเดียวกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van

Der Waals Force) โมเลกุลที่ถูกดูดซับยังคงมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม การดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยโมเลกุลแต่ละชั้นจะเกิดบนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ก่อนแล้ว ซึ่งความแรงของการดูดซับทางกายภาพ มีความสัมพันธ์กับชนิดและสมบัติทางกายภาพของอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (Adsorbing species) ซึ่งแรงทางกายภาพหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ จะเกิดได้จากการแพร่และการเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กรณีสารมีขั้วกับสารมีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวจะเกิดจากการหักเหของโมเลกุลสารถูกดูดซับเข้าหาสารดูดซับที่มีขั้วต่างกัน และเกิดการดึงดูดระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบขึ้น ตัวอย่างเช่น การกำจัดไอน้ำ (มีขั้ว) จากไอเสียโดยใช้ซิลิกาเจล (มีขั้ว) เป็นต้น

2) กรณีสารไม่มีขั้วกับสารไม่มีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวจะเกิดจากผลของการแพร่ของสารถูกดูดซับเข้าไปยังสารดูดซับ ซึ่งโดยปกติแล้ว สารที่ไม่มีขั้วจะเกิดขั้วสลักันขึ้นมา เนื่องจากการกระจายตัวของกลุ่มหมอกอเล็กโตรอนรอบอะตอมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยอเล็กโตรอนสามารถมาสะสมอยู่บริเวณด้านหนึ่งของสารได้ทำให้เกิดสภาพมีขั้วชั่วคราวจึงเกิดแรงดึงดูดอ่อน ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอของสารอินทรีย์ในผิวของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

3) กรณีสารมีขั้วกับสารไม่มีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวเกิดจากการเหนี่ยวนำของโมเลกุลสารถูกดูดซับให้เข้าหาสารดูดซับ โดยที่โมเลกุลมีขั้วสามารถเหนี่ยวนำสารที่ไม่มีขั้ว เมื่อเคลื่อนที่เข้าหากันได้ ซึ่งมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของสารมีขั้วหรือไม่มีขั้วกับสารไม่มีขั้วด้วยตัวเอง ดังนั้นในการดูดซับสารต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องเลือกสารดูดซับให้เหมาะสมกับสารที่จะดูดซับ โดยจะเลือกใช้สารดูดซับที่มีขั้วในการดูดซับสารที่มีขั้ว และเลือกใช้สารดูดซับที่ไม่มีขั้วในการดูดซับสารที่ไม่มีขั้ว

2.7.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) หรือ Chemisorption

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและผิวของสารดูดซับ เกิดเป็นพันธะเคมี ซึ่งแรงการดูดซับทางเคมีนี้ต้องอาศัยพลังงานเข้ามาร่วมด้วยเรียกว่า Activated adsorption ชั้นของการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ตัวดูดซับที่นิยมใช้เก็บสาร VOCs แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1) ตัวดูดซับชนิดโพลิเมอร์ที่มีรูพรุน (Porous polymer-based sorbents) เป็นสารดูดซับที่เป็นประจุลบ ได้แก่ Tenax และ Chromosorb

2) ตัวดูดซับชนิดคาร์บอน (Carbon-based sorbents) เป็นสารดูดซับที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ สารดูดซับ Activated charcoal, Graphited carbon blacks, Carbotraps, Anasorb, Carboxens และ Carbosieve

3) ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล (Silica gels) เป็นสารดูดซับที่เป็นประจุบวก ได้แก่ Activated silica gel

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen, *et al.* (2017) ได้ทำการศึกษาวัสดุแอโรเจล (aerogels) โดยการเตรียมวัสดุผสมกับแกรไฟีนออกไซด์ (AGO) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่แข็งด้วยวิธีระเหิดภายใต้สุญญากาศ (vacuum freeze drying method) จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) พบว่า AGO สามารถดูดซับสูงสุด 578 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษา kinetic ของการดูดซับพบว่า เป็นการดูดซับแบบอันดับสองเทียม (pseudo second order) พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) ที่คำนวณได้จากสมการ Van't Hoff แสดงให้เห็นว่า การดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน และยังสามารถนำวัสดุกลับไปใช้ซ้ำได้ด้วยการล้างด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 91% หลังจากนำมาใช้ซ้ำแล้ว 3 ครั้ง

Saelim, *et al.* (2013) ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ ซึ่งเตรียมในรูปของแผงวงจรพิมพ์ (printed circuit board; PCB) ที่เคลือบด้วยสาร polypyrrole และอนุภาคเงิน สำหรับการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ไฮลีน และสไตรีน ลักษณะพื้นฐานวิทยาของ PCB ถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM พบว่ามีโครงสร้างคล้ายดอกกะหล่ำและมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ หลังจากการสุ่มเก็บตัวอย่าง สารที่ถูกดูดซับนำมาวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์การคายการดูดซับด้วยความร้อนที่สร้างในห้องปฏิบัติการควบคู่ไปกับไมโครพรีคอนเซนเตรเตอร์ (micro-preconcentrator) แบบออนไลน์และวิเคราะห์โดย GC-FID ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่า อุปกรณ์เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างที่พัฒนาขึ้น ให้ช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้าง (0.002–10.849 นาโนกรัมสำหรับไฮลีนและ 0.002–10.643 นาโนกรัมสำหรับสไตรีน ซึ่งมีค่า $R^2 > 0.99$) โดยมีขีดจำกัดในการตรวจวัดที่ต่ำ (0.65 และ 0.64 พิโกกรัม สำหรับไฮลีนและสไตรีนตามลำดับ) และมีขีดจำกัดในการตรวจวัดเชิงปริมาณต่ำ (2.00 พิโกกรัม สำหรับสารประกอบทั้งสอง) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ PCB ที่พัฒนาขึ้นให้ความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำ (reproducibility) สูง โดยมี %RSD น้อยกว่า 8% มีความเสถียรในการจัดเก็บ 2 สัปดาห์ ความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำได้สี่เท่า โดยมี %RSD น้อยกว่า 10% และต้นทุนที่ต่ำอย่างยิ่ง (ประมาณ 0.25 USD ต่อตัวอย่าง) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟเชิงพาณิชย์ อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้เพื่อตรวจสอบไฮลีนและสไตรีนที่ร้านถ่ายเอกสารสองแห่งในหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย พบว่า มีเพียงไฮ

ลีนเท่านั้นที่พบในห้องถ่ายเอกสารในช่วงความเข้มข้นที่ตรวจไม่พบ (N.D., not detected) จนถึง 3.0 ± 0.1 ppbv นอกจากนี้ ยังมีการนำอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดังกล่าว ไปใช้ตรวจสอบการสัมผัสส่วนบุคคล (personal exposure) ซึ่งตรวจพบเฉพาะไซลีน เท่านั้น (พบในช่วงความเข้มข้น 1.4–3.4 ppbv)

Subba, *et al.* (2016) ได้นำอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟแผงวงจรพิมพ์ (printed circuit board; PCB) ที่พัฒนาขึ้นตามงานวิจัยของ Saelim, *et al.* (2013) ไปใช้สำหรับการตรวจวัดสารไซลีนและสไตรีนในร้านถ่ายเอกสาร และทดสอบความใช้ได้ของอุปกรณ์ซ้ำ (re-validation) ด้วยการวัดสารเบนซีน โทลูอินและไซลีน (BTX) ในตัวอย่างอากาศ ณ เมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย ด้วยการวิเคราะห์กลุ่มเป้าหมาย 16 ตำแหน่ง ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ความเข้มข้นสูงถึงต่ำ และนำมาศึกษาด้วยเครื่อง GC ซึ่งมีช่วงความเป็นเส้นตรงของ BTX เท่ากับ 0.06–5.6 ไมโครกรัม เบนซีน 0.07–2.2 ไมโครกรัม โทลูอินและไซลีน อยู่ที่ 0.23–2.5 ไมโครกรัม จากการศึกษาประสิทธิภาพนั้นพบว่า อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี ทั้งที่ใช้ต้นทุนต่ำในการผลิต อีกทั้งไม่มีความยุ่งยากในการติดตั้งเครื่องมือ สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ถึง 12 ครั้ง โดยมีระยะเวลาในการเก็บรักษาอยู่ที่ 3 สัปดาห์

Ozden and Dogeroglu (2008) ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟในรูปแบบขวดแก้ว สำหรับการวิเคราะห์หา NO_2 มีอัตราการดูดซึมอยู่ที่ 2.49 มิลลิกรัมต่ออนาที โดยมีความเข้มข้นต่ำสุดอยู่ที่ 1.99 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับระยะเวลาการสัมผัสสารอยู่ที่ 1 สัปดาห์ และสามารถเก็บรักษาไว้ก่อนใช้งานได้ถึง 6 สัปดาห์ ด้วยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับสินค้าตามท้องตลาด พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ ราคาเครื่องเก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟถูกกว่าอย่างเห็นได้ชัดและยังมีข้อดีในเรื่องความทนทานของวัสดุอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีความแม่นยำอยู่ที่ 8.80%

Thammakhet, *et al.* (2006) ได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟที่อย่างง่าย สำหรับการตรวจสอบสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน (BTX) โดยใช้ขวดแก้วทั่วไป บรรจุ Tenax TA 75 มิลลิกรัมที่ผ่านกระตุ่นแล้ว เป็นอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ หลังจากอุปกรณ์ดังกล่าว ถูกนำมาใช้ในการดูดซับสารตัวอย่างแล้ว จะนำมาทำการคายการดูดซับด้วยเครื่องคายการดูดซับด้วยความร้อน (thermal desorber) ที่สร้างในห้องปฏิบัติการ โดยสารตัวอย่างจะถูกไล่ออกจากตัวดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน และฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID) ด้วยวาล์วเก็บตัวอย่างก๊าซ พารามิเตอร์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ เช่น เวลาในการคายการดูดซับ อัตราการไหลของก๊าซพา และเวลาในการวิเคราะห์ เป็นต้น จะถูกทำการศึกษา เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สาร BTX เิงปริมาณที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคนี้ ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า 0.99 โดยมีขีดจำกัด

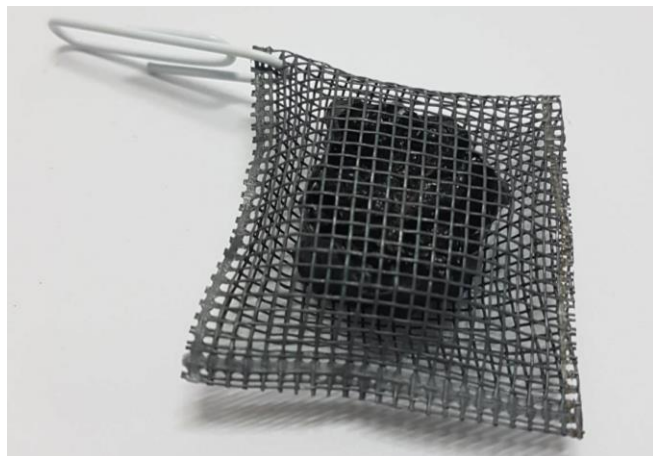
การตรวจวัด 0.3, 0.2 และ 0.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเบนซีน โทลูอินและไซลีนตามลำดับ เมื่อนำวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการตรวจวัดสาร BTX ในสถานบริการน้ำมัน 10 แห่งในภาคใหญ่ ประเทศไทย พบความเข้มข้นของ BTX ในช่วงที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จนถึง 19, 12-200 และ 23-200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเบนซีน โทลูอินและไซลีนตามลำดับ

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

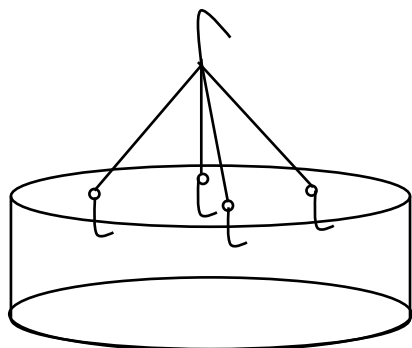
3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 สไตรีน (styrene) ความบริสุทธิ์ $\geq 99\%$ (Sigma-Aldrich, Netherlands)
- 3.1.2 โทลูอีน (toluene) (Fisher chemical, England)
- 3.1.3 เฮกเซน (hexane) (J.T. Baker, USA)
- 3.1.4 แกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) (Sigma Aldrich, USA)
- 3.1.5 ผงวุ้น (agar powder) ยี่ห้อ นางกวัก (บริษัท ส.ไทยฮวด จำกัด, ประเทศไทย)
- 3.1.6 น้ำปราศจากไอออน (Ultrapure water type I) ที่ผลิตด้วยระบบทำน้ำปราศจากไอออน (Merck, Darmstadt, Germany)
- 3.1.7 ขวดแก้ว (vial) ขนาด 25 มิลลิลิตร
- 3.1.8 ถุงซีลพลาสติก
- 3.1.9 ถุงตาข่าย สำหรับบรรจุตัวดูดซับ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ถุงตาข่ายที่บรรจุด้วยตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้น

3.1.10 อุปกรณ์ป้องกันน้ำและฝุ่น ซึ่งทำมาจากชั้นน้ำพลาสติก โดยเจาะรูที่ท้ายชั้น และนำลวดมาใส่ให้มีลักษณะเป็นตะขอ สำหรับแขวนตัวดูดซับและใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์พร้อมป้ายบอกชื่ออุปกรณ์ให้ผู้อื่นได้ทราบ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ป้องกันน้ำและฝุ่นสำหรับแขวนตัวดูดซับ

3.2 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) รุ่น 5977B (Agilent Technologies Inc., USA)

3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 400 (SEM-Quanta)

3.2.3 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น VERTEX 70

3.2.4 เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA8000

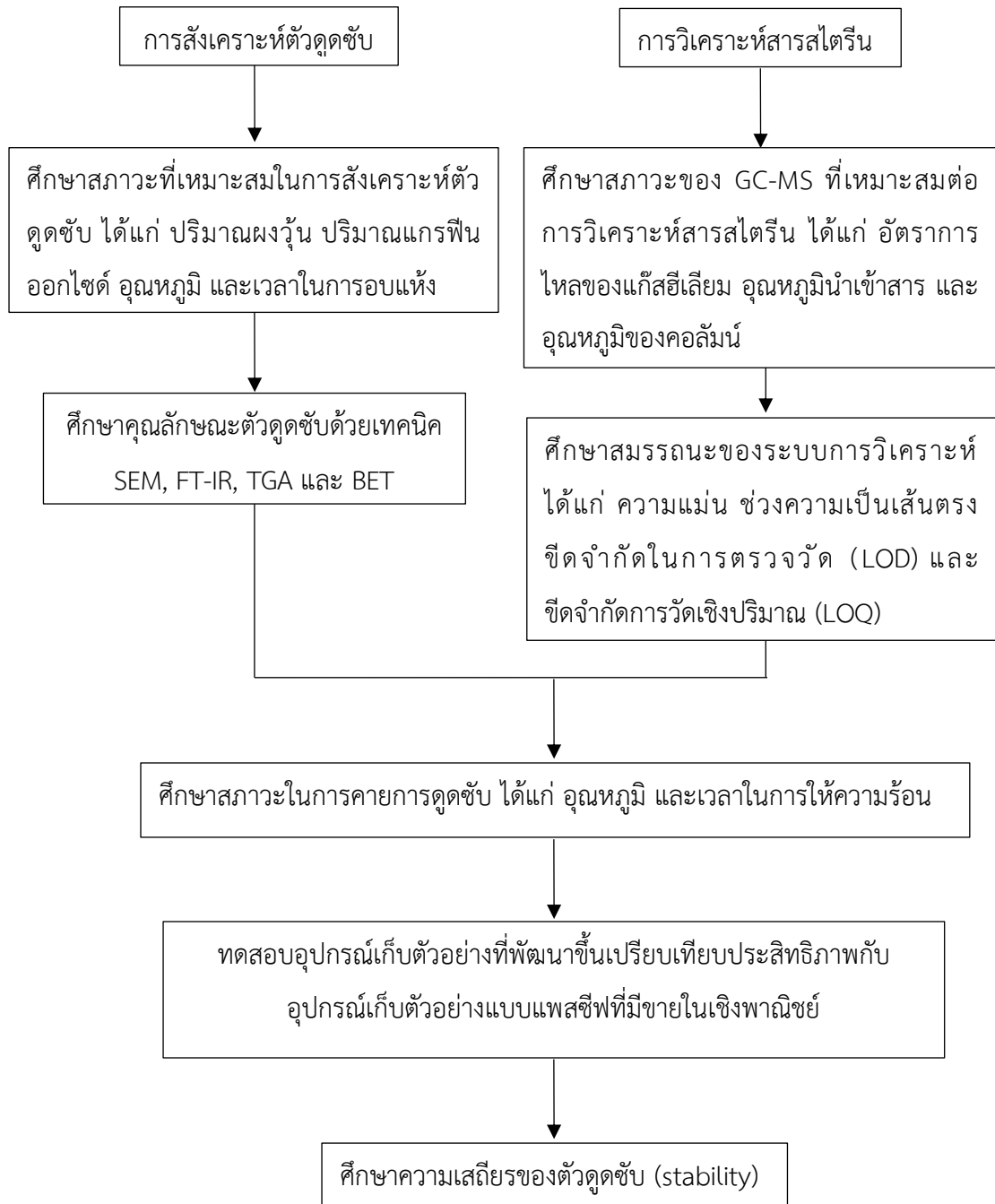
3.2.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน แบบ High throughput (High throughput surface area and porosity analyzer; BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2460

3.2.6 เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic bath) รุ่น S 100 H ยี่ห้อ ELMA

3.2.7 ตู้ดูดความชื้นแบบอัตโนมัติ (Auto Desiccator) รุ่น D50-A ยี่ห้อ Northman

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

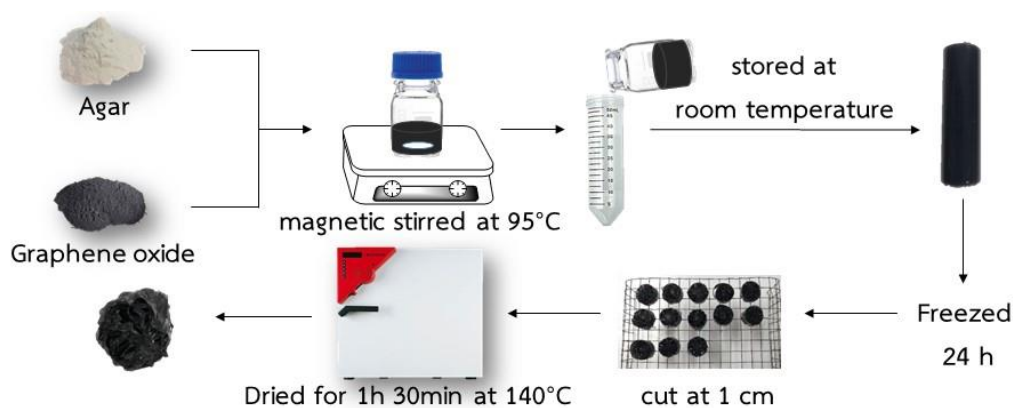
การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังแผนผังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ

การสังเคราะห์วัสดุดูดซับมีกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยการนำแกรฟีนออกไซด์และผงวุ้นมาละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และกวนผสมที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเทวุ้นใส่หลอดพลาสติก ขนาด 50 มิลลิลิตร เพื่อขึ้นรูปตัวดูดซับ และตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมงจนเกิดเป็นเจลวุ้น (hydrogel) แล้วนำเจลวุ้นที่ได้ไปแช่แข็งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้น้ำแข็งละลาย และนำเจลที่ได้มาตัดแบ่งให้มีลักษณะทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรและสูง 1 เซนติเมตร ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จะได้เป็นวัสดุดูดซับ (xerogel) ตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.4 กระบวนการสังเคราะห์ตัวดูดซับ

3.3.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ

การศึกษาปริมาณผงวุ้นที่เหมาะสมถูกศึกษาในช่วง 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 3.5 กรัม (ต่อปริมาตรน้ำ 50 มิลลิลิตร) ตามลำดับ โดยปราศจากการเติมแกรฟีนออกไซด์ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้อบแห้ง 1 ชั่วโมง 30 นาที

การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งของตัวดูดซับที่เหมาะสม จะศึกษาในช่วง 140, 150, 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณผงวุ้น 3 กรัม แกรฟีนออกไซด์ 50 มิลลิกรัม และอบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

การศึกษาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของตัวดูดซับที่เหมาะสม จะศึกษาในช่วง 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณผงวุ้น 3 กรัม ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ 50 มิลลิกรัม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

การศึกษาปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมถูกศึกษาในช่วง 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัม ตามลำดับ ต่อปริมาณผงวัน 3 กรัม โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

3.3.2 การศึกษาคุณลักษณะตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นสำหรับดูดซับสารสไตรีนถูกศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ศึกษาความเสถียรของตัวดูดซับด้วยเครื่อง TGA (Thermo Gravimetric Analyzer) จากการสลายตัวขององค์ประกอบในตัวอย่างและวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรของรูพรุน โดยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (High throughput surface area and porosity analyzers: BET) แบบ High throughput

3.3.3 การวิเคราะห์สารสไตรีน

3.3.3.1 การกำหนดสภาวะการทำงานของ GC-MS ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์สารสไตรีน

การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์สำหรับวิเคราะห์สารสไตรีน ใช้เกณฑ์การพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการให้สัญญาณการตอบสนองสูงและการแยกกันของพีคของสารสไตรีนชัดเจน (High resolution) สามารถทำได้โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานสไตรีนที่ความเข้มข้น 100 ppm ในตัวทำละลายเฮกเซน ฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) รุ่น 5977B (Agilent Technologies Inc., USA) คอลัมน์ชนิด HP-5MS capillary column ขนาดความยาว 30 เมตร × เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร × ความหนาฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ระบบการแตกไอออนเป็นแบบ electron ionization (70 eV) และวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยโหมด full scan (50 – 550 amu) โดยปรับเปลี่ยนสภาวะต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิส่วนนำเข้าสาร 100, 120, 140, 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้นที่ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เวลาที่คงที่ไว้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 0, 1, 2 และ 3 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, 20 และ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิสุดท้าย 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200 องศาเซลเซียส เวลาที่คงที่ไว้ที่อุณหภูมิสุดท้าย 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที

การศึกษาอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมนี้ พิจารณาจากอัตราการไหลที่ให้ค่าความกว้างของเพลททางทฤษฎีที่ให้ค่าน้อยที่สุด (Height equivalent to a theoretical plates, HETP) โดยค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$\text{HETP} = \frac{L}{N} \quad (3.1)$$

โดย L คือ ค่าความยาวของคอลัมน์ และ N คือ จำนวนเพลท (Number of theoretical plate) ซึ่งสามารถหาค่าจำนวนเพลทได้จากสมการที่ (3.2)

$$N = 16 \left(\frac{t_R}{W} \right)^2 \quad (3.2)$$

โดย t_R คือ เวลาที่สารออกจากคอลัมน์ (Retention time) และ W คือ ความกว้างของพีคพื้นฐาน

3.3.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารสไตรีน

การวิเคราะห์สารสไตรีนเชิงปริมาณ สามารถทำได้โดยการสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสไตรีนกับพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งกราฟมาตรฐานจะประกอบด้วย กราฟที่แสดงความเข้มข้นของสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลว และกราฟที่แสดงความเข้มข้นของสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊ส สามารถเตรียมได้ดังนี้

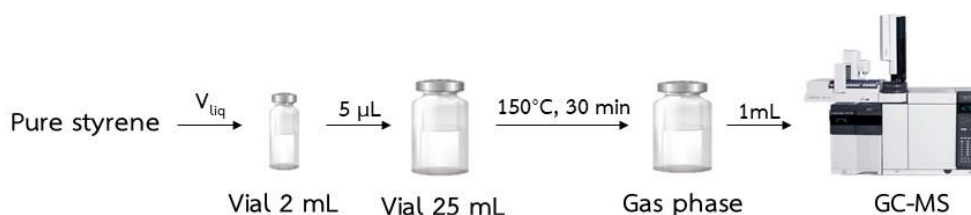
1) กราฟแสดงความเข้มข้นของสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลว เริ่มต้นโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานสไตรีนที่ความเข้มข้น 1000 ppm เป็น Stock standard solution ในขวดแก้ว vial ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ คือ 0.0001, 0.00025, 0.0005, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 ppm โดยเจือจางด้วยโทลูอีนให้ได้ปริมาตร 1.9 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS

2) กราฟแสดงความเข้มข้นของสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊สมีขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐานดังรูปที่ 3.5 กล่าวคือ ทำโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานสไตรีนที่ความเข้มข้น 300 ppm_v เป็น Stock standard solution ในขวด vial ปริมาตร 2 มิลลิลิตร สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.3) (Uyanik and Tinkili, 1999) และเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ คือ 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250 และ 300 ppm_v โดยเจือจางด้วยเฮกเซน จากนั้นใช้ไมโครปิเปต (micro pipete) ดูดสารละลายมา 5 ไมโครลิตร ใส่ขวดแก้ว vial ขนาด 25 มิลลิลิตร ก่อนนำขวดแก้ว vial

ขนาด 25 มิลลิลิตร ไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส จากนั้นดูดแก๊สมา 1 มิลลิลิตร ฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS

$$V_{liq} = \frac{CV_{bulb}}{1000} \frac{MP}{d_{liq}RT} \frac{V_{sol}}{V_{inj}} \quad (3.3)$$

โดยที่	V_{liq}	คือ	ปริมาตรของสารละลายของเหลวบริสุทธิ์ (ไมโครลิตร)
	C	คือ	ความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการ (ppm _v)
	V_{bulb}	คือ	ปริมาตรของ sampling bulb หรือปริมาตรของก๊าซที่ต้องการ (25 มิลลิลิตร)
	M	คือ	มวลโมเลกุลของสาร (กรัมต่อโมล)
	P	คือ	ความดันบรรยากาศ (0.992 atm)
	d_{liq}	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (กรัมต่อมิลลิลิตร)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซในอุดมคติ (0.08206 L atm mol ⁻¹ K ⁻¹)
	T	คือ	อุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ (เคลวิน)
	V_{sol}	คือ	ปริมาตรของสารละลายที่เตรียม (1.9 มิลลิลิตร)
	V_{inj}	คือ	ปริมาตรของสารละลายที่ฉีดลง sampling bulb (5 ไมโครลิตร)



รูปที่ 3.5 กระบวนการขั้นตอนการเตรียมกราฟมาตรฐานแสดงความเข้มข้นของสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊ส

3.3.3.3 การศึกษาสมรรถนะของระบบการวิเคราะห์

สมรรถนะของระบบในการวิเคราะห์อุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความแม่นยำ (Accuracy) ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Dynamic Range) ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection) ขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of Quantitation)

1) ความแม่นยำ (Accuracy)

เป็นการทดสอบความถูกต้องของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบกับปริมาณของสารที่มีอยู่จริงในตัวอย่าง ซึ่งความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์แสดงในรูปของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error) ดังสมการ (3.4)

$$\% \text{ Relative Error} = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่	% Relative Error	คือ ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
	X_2	คือ ค่าความเข้มข้นของสารที่วัดได้ (ppm _v)
	X_1	คือ ค่าความเข้มข้นของสารจริง (ppm _v)

2) ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Dynamic Range: LDR)

เป็นการศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟ และความเข้มข้นของสารสไตรีน การกำหนดช่วงความเป็นเส้นตรงจะพิจารณาจากในช่วงความสัมพันธ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มากกว่า 0.99 ซึ่งช่วงดังกล่าวจะให้สมการเส้นตรงที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ ดังสมการ (3.5)

$$y = m(x) + c \quad (3.5)$$

โดยที่	y	คือ พื้นที่ใต้กราฟ
	x	คือ ความเข้มข้นของสไตรีน (ppm _v)
	m	คือ ความชันของสมการเส้นตรง
	c	คือ จุดตัดแกน y

3) ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection: LOD)

เป็นค่าที่แสดงความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่ต่ำที่สุด ซึ่งวิธีการวิเคราะห์สามารถตรวจวัดได้ โดยคำนวณจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบลงค์ (blank) และความชันสมการเส้นตรง (Calibration equation) ที่ได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน (ICH, 1994) แสดงดังสมการ (3.6)

$$\text{LOD} = 3.3S_B/S \quad (3.6)$$

โดยที่ LOD คือ ขีดจำกัดในการตรวจวัด
 S_B คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์ blank 10 ซ้ำ
 S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

4) ขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation: LOQ)

คือ ปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดเชิงปริมาณได้ โดยคำนวณจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ blank และความชันของสมการเส้นตรง (Calibration equation) ที่ได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน (ICH, 1994) แสดงดังสมการ (3.7)

$$\text{LOQ} = 10S_B/S \quad (3.7)$$

โดยที่ LOQ คือ ขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ
 S_B คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์ blank 10 ซ้ำ
 S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

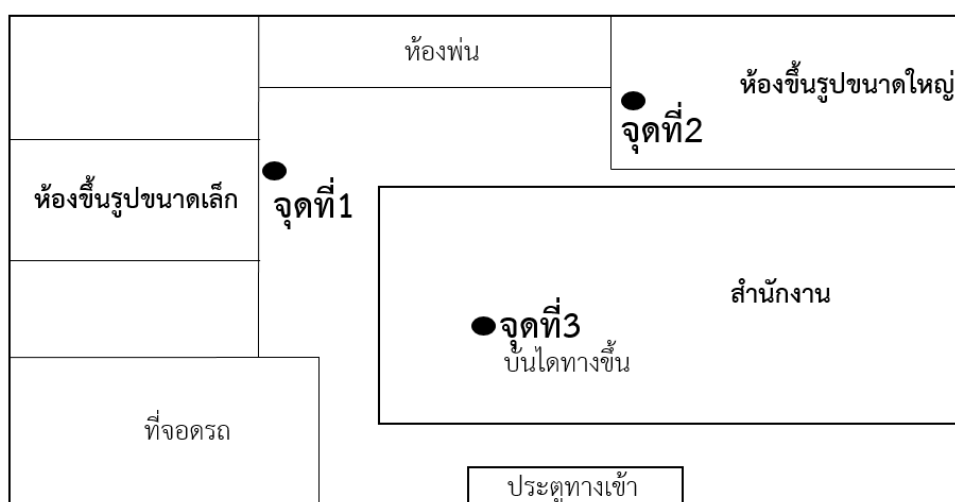
3.3.4 การศึกษาสภาวะในการคายการดูดซับที่เหมาะสม

การศึกษาสภาวะในการคายการดูดซับสารสไตรีน ด้วยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟที่จัดทำขึ้นในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้โดยการนำตัวดูดซับที่ได้สังเคราะห์ขึ้นไปแขวนในขวด (vessel) ปริมาตร 1500 มิลลิลิตร ซึ่งภายในบรรจุสารมาตรฐานสไตรีนความเข้มข้น 100 ppm_v และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล เมื่อครบกำหนดแล้ว จึงนำตัวดูดซับไปทำการคายการดูดซับด้วยการให้ความร้อน (thermal desorption) ที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 120, 130, 140, 150 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ คือ 10, 20, 30 และ 40 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์สารสไตรีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมตามข้อ 3.3.3.1

3.3.5 การทดสอบตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในสภาพแวดล้อมจริง

จัดทำอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ โดยนำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้บรรจุลงในถุงตาข่ายตามรูปที่ 3.1 จากนั้นนำไปแขวนติดกับอุปกรณ์ป้องกันน้ำและฝุ่น (ดังรูปที่ 3.2) เพื่อไม่ให้มีสิ่งแปลกปลอมอื่นมารบกวน (ซึ่งอุปกรณ์ป้องกัน 1 อัน ประกอบด้วยตัวดูดซับ 4 ชุด) จากนั้นทำการ

ติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟในพื้นที่ของโรงงานผลิตสระว่ายน้ำไฟเบอร์กลาสที่ตั้งอยู่ใน อ.ถาง จ.ภูเก็ต ซึ่งแผนผังการติดตั้งอุปกรณ์จำนวน 3 จุดเก็บตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.6 และเมื่อครบ กำหนดนำตัวดูดซับใส่ลงขวดแก้ว vial ขนาด 25 มิลลิลิตร พร้อมปิดขวดด้วยจุกยางและฝาลูมิเนียม ด้วย crimper เพื่อนำมาคายการดูดซับด้วยความร้อนและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ในการแขวน ตัวอย่างได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับดังนี้



รูปที่ 3.6 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ

3.3.5.1 การศึกษาระยะเวลาในการแขวนตัวอย่าง

โดยเลือกจุดเก็บตัวอย่างมี 3 จุด คือ จุดที่มีความเข้มข้นสูง จำนวน 2 จุด และอีกจุด เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจุดที่ 1 อยู่บริเวณหน้าห้องขึ้นรูปขนาดเล็ก จะทำการแขวนอุปกรณ์ เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1, 3, 7 และ 14 วัน จุดที่ 2 อยู่บริเวณในห้องขึ้นรูปขนาดใหญ่ จะศึกษาที่ 1, 3, 5 และ 14 วัน และจุดที่ 3 เป็นบริเวณใต้บันไดภายในสำนักงาน จะเก็บการแขวนเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน

3.3.5.2 การศึกษาผลของความสูง โดยเลือกแขวนเพียงจุดเดียวหรือ บริเวณหน้า ห้องขึ้นรูปขนาดเล็ก ซึ่งแขวนอุปกรณ์ไว้เป็นเวลา 3 วัน โดยแขวนที่ระดับความสูงต่าง ๆ ได้แก่ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 เมตร

3.3.5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์แพสซีฟที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ที่มี ขายในเชิงพาณิชย์

การแขวนเปรียบเทียบทำได้โดยเลือกจุดติดตั้งอุปกรณ์ 2 จุด โดยเลือกจุดที่ความ เข้มข้นสูงและจุดที่ความเข้มข้นต่ำ คือ จุดที่ 1 และจุดที่ 3 (เนื่องจากจุดที่ 2 นั้น มีความเข้มข้น

ใกล้เคียงกับจุดที่ 1) ซึ่งแต่ละจุดจะติดตั้งอุปกรณ์ 2 ชุด ได้แก่ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์แพสซีฟที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจุดที่ 1 ทำการแขวนไว้เป็นเวลา 3 วัน และจุดที่ 3 ทำการแขวนไว้เป็นเวลา 7 วัน แต่ละจุดได้ทำการแขวนที่เวลาต่างกัน เนื่องจากค่าการดูดซับที่เข้าสู่สมดุลของ 2 จุดนั้นต่างกัน (จากผลการศึกษาในข้อ 3.3.5.1) เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างกลับมายังห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเครื่อง GC-MS โดยการสกัดของอุปกรณ์แพสซีฟที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ทำได้โดยนำตัวดูดซับของอุปกรณ์แพสซีฟที่ได้จากการแขวนใส่ลงขวด vial 4 มิลลิลิตร เติมโทลูอีนลงไป 2 มิลลิลิตร แล้วก็ปิดฝาอูมิเนียมด้วย crimper จากนั้นนำไปสกัดด้วยอัลตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำส่วนของสารละลายไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการฉีดวิเคราะห์นั้นนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่ได้จากกราฟมาตรฐานไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารสไตรีนในอากาศด้วยสมการกฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิกค์ (Fick's First Law of Diffusion) ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

3.3.6 การศึกษาความเสถียรของตัวดูดซับ (Stability)

ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับทั้งหมด 28 ชิ้น จากนั้นนำตัวดูดซับ 4 ชิ้นที่เตรียมขึ้นใหม่นี้มาทำการทดสอบดูดซับสารสไตรีนทันที เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผลการดูดซับกับตัวดูดซับอื่น ๆ ตัวดูดซับที่เหลือจะถูกแบ่งใส่ถุงซีล และเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 8 และ 12 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดจะนำตัวดูดซับออกมาแขวน เพื่อทำการดูดซับสารสไตรีนและวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง GC-MS

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ

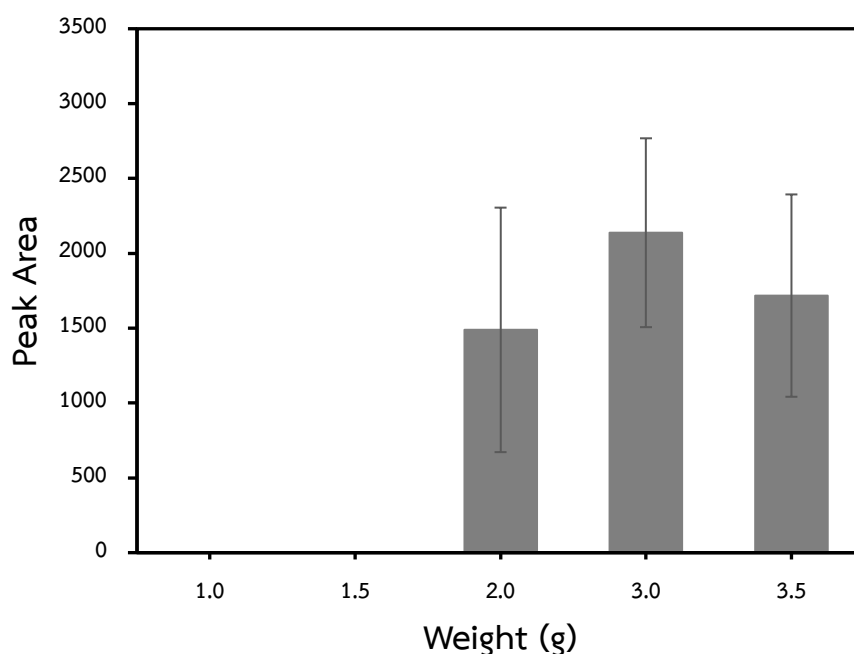
วัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นของแข็งทรงกระบอกสีดำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร และมีความเป็นรูพรุนสูง (แสดงดังรูปที่ 4.1) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีของการเป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากวัสดุดูดซับชนิดนี้ เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ freezing/thawing ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมต่อสายโมเลกุลพอลิเมอร์แบบกายภาพ (physical cross-linking) ที่ให้รูพรุนขนาดใหญ่ (Choodum, *et al.*, 2016) นอกจากนี้ เพื่อให้กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงที่สุด พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ จึงถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ ปริมาณผงวุ้น ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งวัสดุดูดซับ



รูปที่ 4.1 ลักษณะของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้

4.1.1 ปริมาณผงวุ้น

วุ้นเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งประกอบด้ว้โมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ อะกาโรแพคติน (agarpectin) และอะกาโรส (agarose) ซึ่งมีโครงสร้างหลักเหมือนกัน กล่าวคือ เป็นพอลิเมอร์สายยาวของกาแลคโตส (galactose-based backbone) (Raphael, *et al.*, 2010) โดยความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ในการผลิตเจลพอลิเมอร์จะส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างของเจลพอลิเมอร์และอุณหภูมิในการเกิดเจลพอลิเมอร์ (Nayar, *et al.*, 2012) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ปริมาณวุ้นที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุดูดซับจึงถูกศึกษาในรูปของน้ำหนักผงวุ้น 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 3.5 กรัม (ต่อปริมาตรน้ำ 50 มิลลิลิตร) ตามลำดับ โดยในขั้นตอนการศึกษานี้ จะเลือกใช้วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์จากวุ้นเพียงอย่างเดียว (ปราศจากการเติมแกรฟีนออกไซด์) เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพในการดูดซับสารสไตรีนของพอลิเมอร์วุ้นโดยตรง ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์โดยใช้ผงวุ้นปราศจากแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 พบว่า วัสดุดูดซับที่ได้จากการใช้ผงวุ้นหนัก 1.0 และ 1.5 กรัม จะไม่สามารถดูดซับสารสไตรีนได้ เนื่องจากในโครงสร้างของวัสดุดูดซับจะประกอบด้วยสายพอลิเมอร์ของอะกาโรสที่พันกันเป็นเกลียว (helical fiber) (Seow and Hauser, 2016) ซึ่งอะกาโรสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดที่ไม่มีประจุ (non-ionic polysaccharide) (Raphael, *et al.*, 2010) จึง

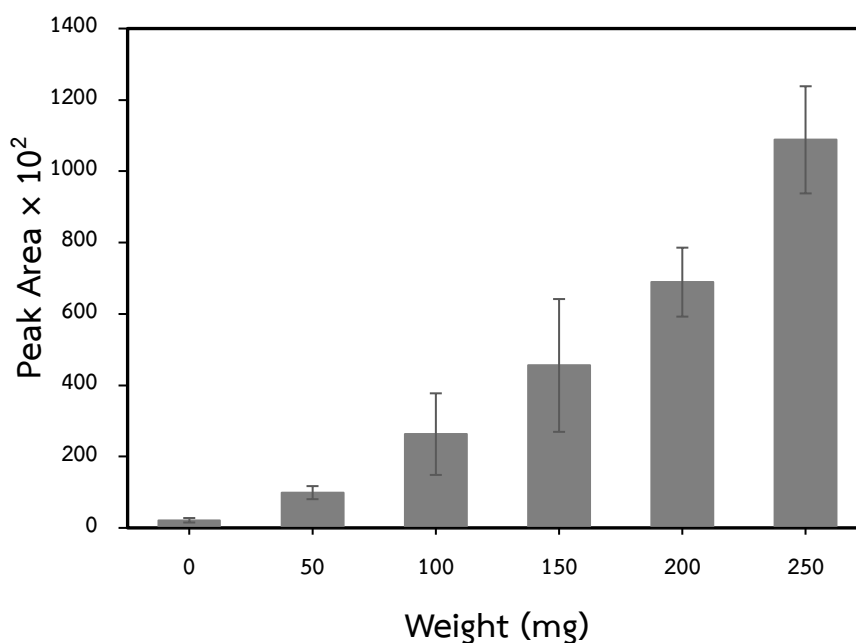
เป็นส่วนสำคัญในการดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วของสารสไตรีน การมีผงฝุ่นและอะกาโรสในปริมาณที่ต่ำเกินไป ทำให้พื้นที่ส่วนที่เกิดการดูดซับ (active sites) จึงมีไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดูดซับสารสไตรีนได้ แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงฝุ่นมากขึ้นเกินกว่า 1.5 กรัม อะกาโรสจะมีปริมาณสูงขึ้นจนสามารถทำให้วัสดุดูดซับที่ผลิตได้ เกิดการดูดซับสารสไตรีนได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาณผงฝุ่นมากเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากปริมาณผงฝุ่นที่สูงเกินไป จะเพิ่มความหนาแน่นของสายพอลิเมอร์ให้สูงขึ้นจนทำให้ไม่มีพื้นที่ให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้ รุพของวัสดุดูดซับที่เกิดขึ้นจากการไล่น้ำในขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจลและซีโร-เจลจึงน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารสไตรีนลดลง ดังนั้น ปริมาณผงฝุ่นที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุสำหรับดูดซับสารสไตรีน คือ 3.0 กรัม ซึ่งจะใช้ในการศึกษาผลของปริมาณผงแกรฟีนออกไซด์ที่มีต่อการดูดซับสารสไตรีนต่อไป

4.1.2 ปริมาณแกรฟีนออกไซด์

แกรฟีนออกไซด์เป็นวัสดุนาโนชนิดคาร์บอน (carbon nanomaterials) ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ (Kumar, *et al.*, 2020) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 236 ตารางเมตรต่อกรัม (Yu, *et al.*, 2018) มีความแข็งแรง และนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี (Ali, *et al.*, 2019) ซึ่งในหลายงานวิจัยมีการบ่งชี้ว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับชนิดแกรฟีนออกไซด์จะยิ่งสูงขึ้น เมื่อมีการนำแกรฟีนออกไซด์มาทำเป็นวัสดุผสม (composite materials) (Sun, *et al.*, 2014; Zheng, *et al.*, 2018) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีการนำแกรฟีนออกไซด์มาผสมกับวุ้น เพื่อทำเป็นวัสดุดูดซับ โดยทำการศึกษาปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมในรูปของน้ำหนักของผงแกรฟีนออกไซด์ในช่วง 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัม ตามลำดับ ต่อปริมาณผงวุ้น 3.0 กรัม สำหรับการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ

จากผลการศึกษาการดูดซับสารสไตรีน (แสดงดังรูปที่ 4.3) พบว่า เมื่อใช้ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ในการสังเคราะห์มากขึ้น จะทำให้ปริมาณสไตรีนที่ดูดซับได้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จะมีส่วนในการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้แก่วัสดุดูดซับ และทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว π - π stacking ระหว่างแกรฟีนออกไซด์กับสไตรีน กล่าวคือ π อิเล็กตรอนของวงแหวนอะโรมาติกบนพื้นผิวของแกรฟีนออกไซด์ยึดเหนี่ยวกับ π อิเล็กตรอนของวงแหวนอะโรมาติกของสารสไตรีน (Ibrahim, *et al.*, 2015) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกลไกการดูดซับมากกว่าสมบัติด้านความมีขั้วสูง (low hydrophobicity) ที่เกิดจากการมีอยู่ของหมู่ออกซิเจนบนพื้นผิวของแกรฟีนออกไซด์เอง (Kumar, *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณของแกรฟีนออกไซด์มากกว่า 200 มิลลิกรัม จะส่งผลต่อโครงสร้างของวัสดุดูดซับ กล่าวคือ จะเป็นการเพิ่มความพรุนให้แก่วัสดุ

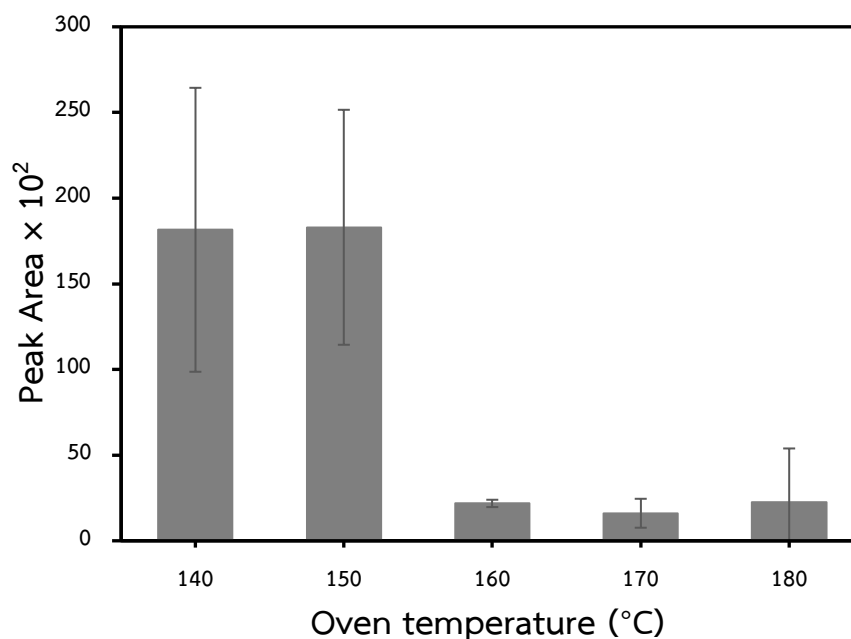
ซับมากเกินไป จนกระทั่งวัสดุดูดซับเกิดการเปราะและแตกหักได้ง่าย ส่งผลกระทบต่อการขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งานรวมถึงลดสมบัติด้านความเที่ยง (precision) ของปริมาณสารสไตรีนที่ดูดซับได้ ดังนั้นปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสม ซึ่งจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับสารสไตรีนคือ 200 มิลลิกรัม



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศ โดยใช้ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน

4.1.3 อุณหภูมิอบแห้ง

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุดูดซับประเภท xerogel หรือ aerogel จะมีอากาศเป็นองค์ประกอบมากถึง 90–99% ซึ่งมีส่วนช่วยให้วัสดุดูดซับมีความหนาแน่นต่ำและมีความเป็นรูพรุนสูง (Zhao, *et al.*, 2018) ซึ่งในการผลิตวัสดุดูดซับประเภทนี้ จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุดูดซับ เพื่อกำจัดตัวทำละลายหรือน้ำออกจากโครงสร้างของ hydrogel ดังนั้น ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งจึงมีส่วนสำคัญต่อโครงสร้างของวัสดุดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผลของอุณหภูมิของการอบแห้งต่อความสามารถในการดูดซับสารสไตรีนจึงถูกศึกษาในช่วง 140, 150, 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณผงวุ้น 3.0 กรัม แกรฟีนออกไซด์ 50 มิลลิกรัม และเวลาอบแห้งที่ 1 ชั่วโมง 30 นาที ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.4



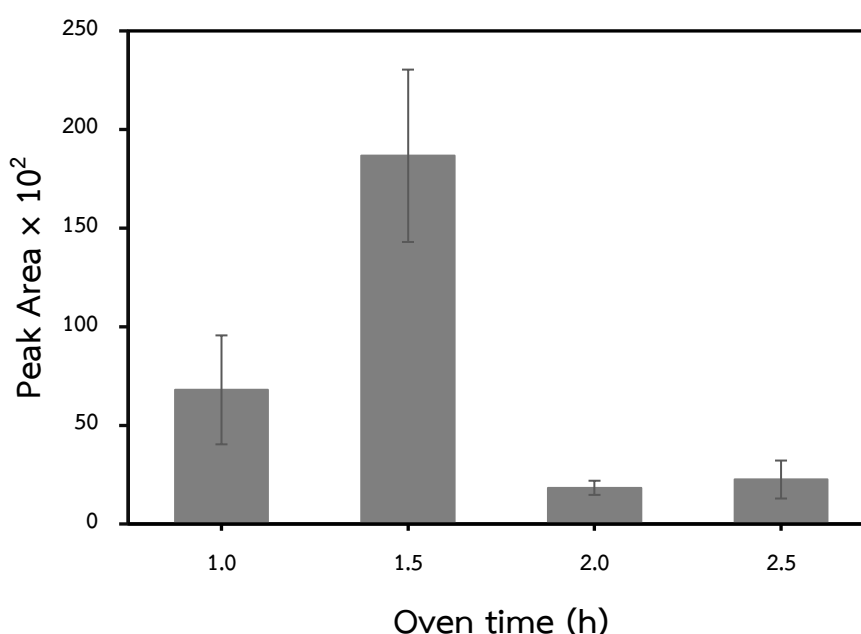
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.4 พบว่า ปริมาณสไตรีนที่ดูดซับได้ด้วยวัสดุดูดซับ ซึ่งเตรียมโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 140 และ 150 องศาเซลเซียส มีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นการบ่งชี้ว่า น้ำสามารถถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัสดุดูดซับของแข็งได้อย่างสมบูรณ์ ตั้งแต่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส ปริมาณสไตรีนที่ถูกดูดซับจะมีน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงเกินไป จะทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการเสียสภาพ (collapse of porosity) (Lee and Park, 2020) ซึ่งสังเกตเห็นได้จากกายภาพของวัสดุดูดซับเกิดการหดตัว และบางส่วนเกิดการหลอมละลาย ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุดูดซับจึงถูกเลือกที่ 140 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานสำหรับการเตรียมวัสดุดูดซับ (cost effectiveness) ต่อไป

4.1.4 เวลาอบแห้ง

ในการให้ความร้อนแก่วัสดุดูดซับ เพื่อกำจัดน้ำหรือตัวทำละลายออกจากโครงสร้างของวัสดุดูดซับและเกิดการแทนที่ด้วยอากาศ นอกเหนือจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว เวลาในการให้ความร้อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงต่อความเป็นรูพรุนของวัสดุดูดซับ ดังนั้น ในการวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการอบแห้งวัสดุดูดซับที่ 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณผงวุ้น 3.0 กรัม ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ 50 มิลลิกรัม และอุณหภูมิอบแห้งที่ 140 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาในรูปที่ 4.5 พบว่า การให้ความร้อนแก่วัสดุดูดซับเป็นเวลา 1.0

ชั่วโมงนั้น ไม่สามารถกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างของวัสดุดูดซับได้ทั้งหมด ทำให้พื้นผิวสัมผัสในการดูดซับสารสไตรีนมีน้อย ปริมาณสารสไตรีนที่ดูดซับจึงมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในอบแห้งเป็น 1.5 ชั่วโมง พลังงานความร้อนที่ให้แก่วัสดุดูดซับมีเพียงพอที่จะระเหยนํ้าออกจากโครงสร้างของวัสดุดูดซับได้หมด ทำให้วัสดุสามารถดูดซับสารสไตรีนได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การอบแห้งวัสดุดูดซับนานเกิน 1.5 ชั่วโมง จะทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการเสียหายจากความร้อนได้เช่นเดียวกับการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป สารสไตรีนที่ดูดซับได้จึงมีปริมาณลดลง ดังนั้น เวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุดูดซับผสมจึงถูกแนะนำที่ 1.5 ชั่วโมง



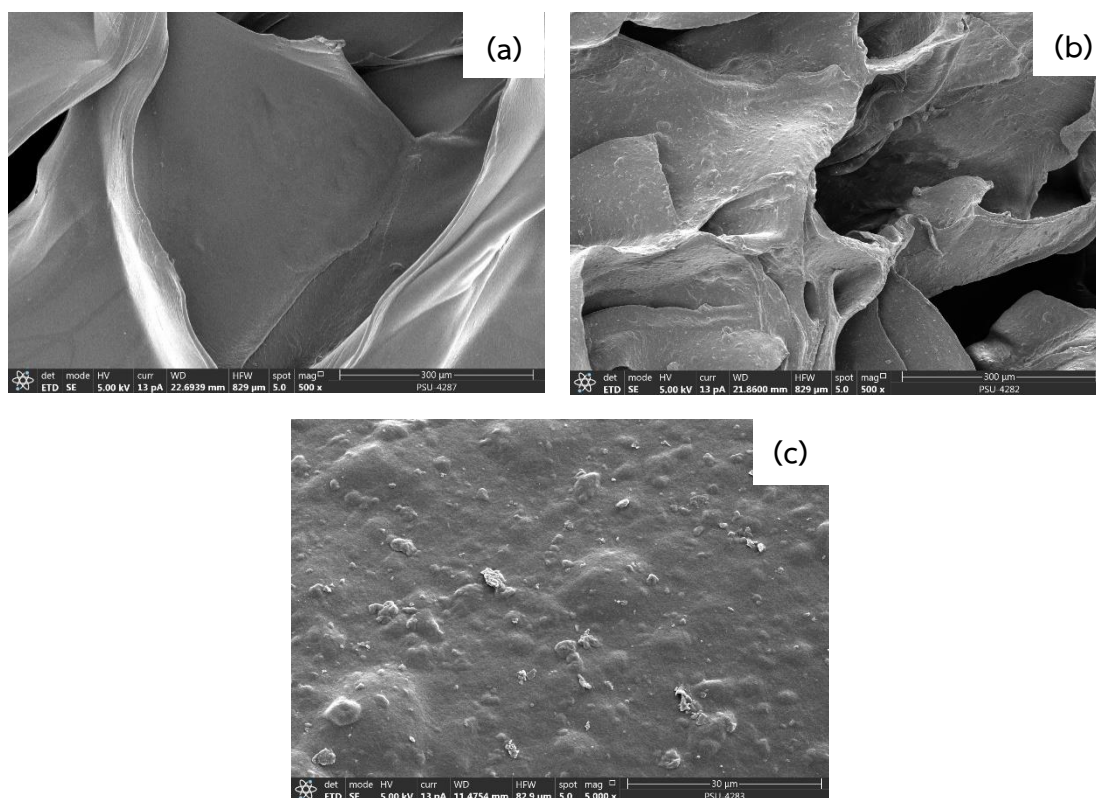
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสารสไตรีนในอากาศที่เวลาอบแห้งต่าง ๆ

4.2 คุณลักษณะของวัสดุดูดซับ

4.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500x และ 5000x (แสดงดังรูปที่ 4.6) พบว่า วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) (รูปที่ 4.6 (a)) มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นเจล (gel skeleton) (Zhang, *et al.*, 2015) เนื่องจากพบผนังเซลล์ของพอลิแซคคาไรด์ โดยในแต่ละแผ่นวุ้น (agar sheet) จะมีขนาดระดับไมโครเมตร และมีลักษณะพื้นผิวเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen, *et al.* (2017) ที่ทำการสังเคราะห์วัสดุดูดซับวุ้นผ่านกระบวนการ freeze-drying พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับวุ้นจะมีความแตกต่างจากวัสดุดูดซับที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO) (รูปที่ 4.6 (b,c)) ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ โดยเป็นผลมาจากการกระจายตัวของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปบนพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ และบางส่วนฝังตัวอยู่ในบริเวณผนังของรูพรุน แสดงให้เห็นว่าแกรฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมีความเข้ากันได้ได้ดีกับโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ของวุ้น

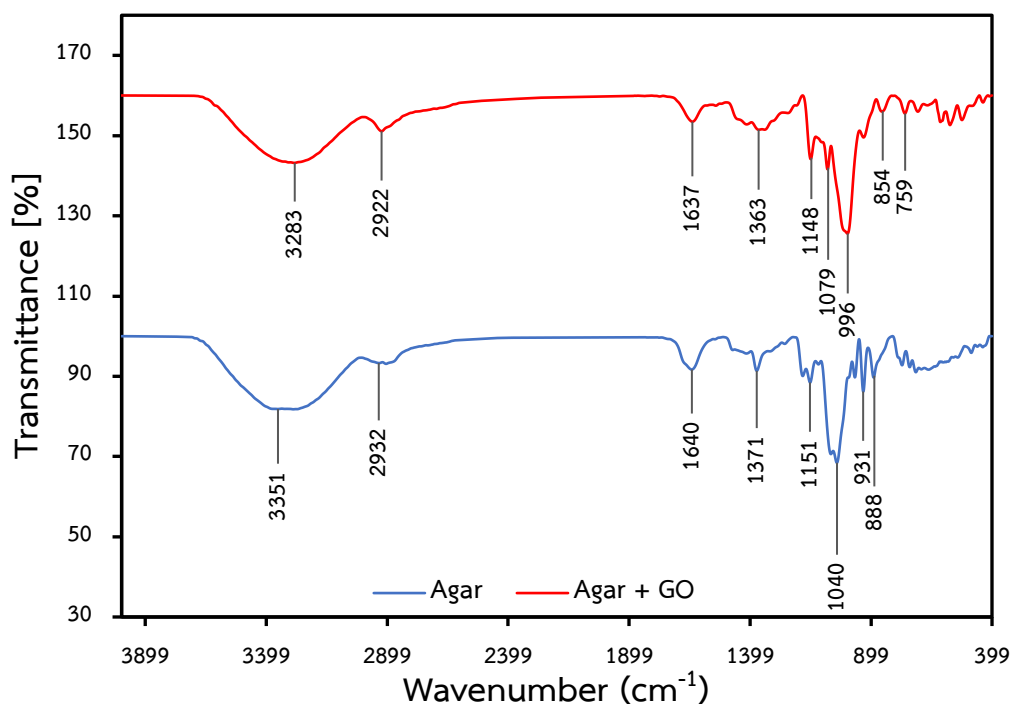


รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของ (a) วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และ (b,c) วัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO)

4.2.2 หมู่ฟังก์ชัน

จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับ ด้วยเทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยทำการศึกษาวัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ และวัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ ผลจากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า สเปกตรัมของวัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) มีพีคปรากฏที่เลขคลื่น 3351 cm^{-1} เป็นพีคที่มีช่วงกว้างมากที่สุด ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของพันธะ O-H ในหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) (Freile-Pelegri n, *et al.*, 2007) โดยหมู่ฟังก์ชันนี้ เป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของอะกาโรส นอกจากนี้ ยังมีการปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2932 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ในหมู่มะทิล (methyl) และ

เมทิลีน (methylene) การปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 1640 cm^{-1} จากการยืดของพันธะเพปไทด์ที่เกิดการคอนจูเกตด้วยหมู่เอมีน (NH) และอะซิโตน (CO) (El-Hefian, *et al.*, 2012) และยังพบการปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 1371 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกที่เกี่ยวข้องกับหมู่เอสเทอร์ซัลเฟต (ester sulfate group) พิกที่ตำแหน่ง 1040 และ 931 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะ C–O ในกลุ่มของ 3,6-anhydrogalactose และสัญญาณพิกที่ตำแหน่ง 888 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C–H ของ β -galactose (Freile-Pelegrin, *et al.*, 2007; Shankar, *et al.*, 2014) และเมื่อมีการผสมแกรฟีนออกไซด์พบว่ามีสเปกตรัมของวัสดุดูดซับ (Agar+GO) นั้นมีการเลื่อนตำแหน่งไปยังเลขคลื่นต่ำกว่าสเปกตรัมของวัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) การปรากฏพิกของพันธะ O–H เลื่อนจากตำแหน่งเลขคลื่น 3351 cm^{-1} ไปยัง 3283 cm^{-1} และอีกตำแหน่งที่มีการเลื่อนของเลขคลื่นอย่างชัดเจนคือพิกของพันธะ C–O เลื่อนไปปรากฏที่ 996 cm^{-1} ซึ่งจากเดิมปรากฏที่ 1040 cm^{-1} สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Belay, *et al.* (2017) ที่พบว่าเมื่อวุ้นผสมกับแกรฟีนออกไซด์จะเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจน ระหว่างแกรฟีนออกไซด์และวุ้นขึ้น โดยพันธะที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้เกิดการสลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างชั้นในสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยตัวเอง และจะส่งผลให้เกิดการเลื่อนตำแหน่งของพิก รวมถึงลดความเข้มของพิก O–H ลง อย่างไรก็ตาม จะมีการตรวจไม่พบพิกของการยืดพันธะ C=O ของหมู่ -COOH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบบริเวณของแผ่นชีทแกรฟีนออกไซด์ (เลขคลื่น $1,730\text{ cm}^{-1}$) ในสเปกตรัมของวัสดุผสม อาจเนื่องมาจากปริมาณของแกรฟีนออกไซด์ในวัสดุดูดซับมีน้อยมาก (6.67 %w/w แกรฟีนออกไซด์/วุ้น) แต่มีการตรวจพบพิกของการยืดพันธะ C=C ของโครงข่ายคาร์บอน (sp^2 carbon skeleton network) ที่เป็นโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ ซึ่งปรากฏที่เลขคลื่น 1637 และหมู่ C–O–C ที่เลขคลื่น 1709 cm^{-1} จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า วัสดุดูดซับที่ได้นั้น มีวุ้นและแกรฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบในการสร้างวัสดุดูดซับซีโรเจล (xerogel) นี้

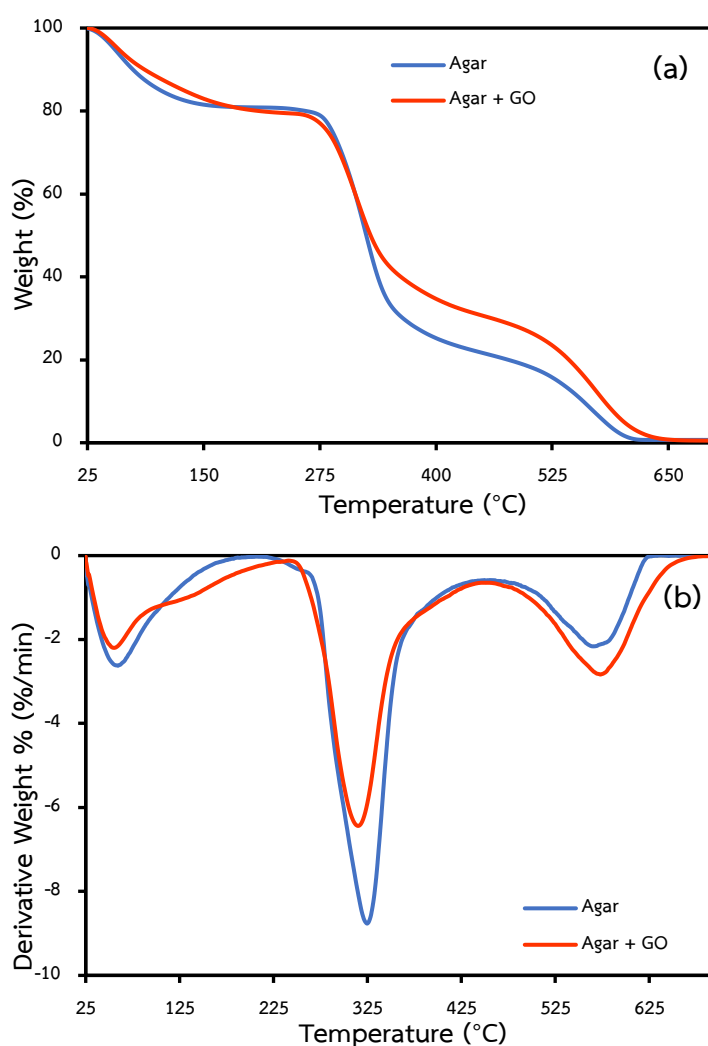


รูปที่ 4.7 สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และวัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO)

4.2.3 ความเสถียรภาพทางความร้อน

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง TGA โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.8 (a) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 170 องศาเซลเซียส จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุดูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และวัสดุดูดซับมีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO) ไป 20% ซึ่งเกิดจากการระเหยออกของความชื้นภายในวัสดุดูดซับ รวมถึงเกิดการสูญเสียของกลุ่มออกซิเจนบนพื้นผิวแกรฟีนออกไซด์ (Han, *et al.*, 2011; Chang, *et al.*, 2012; Chen, *et al.*, 2017) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 280 องศาเซลเซียส จนถึง 325 องศาเซลเซียส น้ำหนักของวัสดุดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็วทั้งวัสดุที่มีและไม่มีแกรฟีนออกไซด์ โดยน้ำหนักของวัสดุดูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar) จะลดลงไป 59% และวัสดุดูดซับมีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO) 49% ที่อุณหภูมิ 283 และ 294 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุดูดซับที่มีแกรฟีนออกไซด์มีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าว จะเกิดการสลายของส่วนที่เป็นวุ้นในวัสดุดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าคือ เมื่อมีการเพิ่มแกรฟีนออกไซด์ลงในวัสดุดูดซับ ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจะลดลง (El-Hefian, *et al.*,

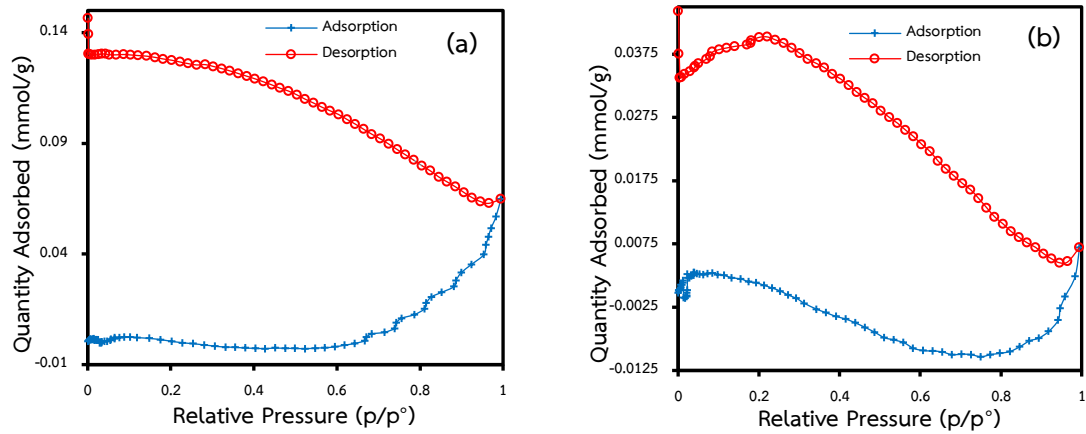
2012; Chen, *et al.*, 2017) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุคูดซับที่มีแกรฟีนออกไซด์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าวัสดุคูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์ และจากผลการวัดอัตราการมวลที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ($\Delta T G$) ดังรูปที่ 4.8 (b) พบว่า วัสดุคูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และวัสดุคูดซับมีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO) มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการมวลที่เห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 325 และ 315 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุคูดซับทั้งสองมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงอัตราการมวลที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดในการสูญเสียน้ำหนักของวุ้น (Madera-Santana, *et al.*, 2010; Basumatary, *et al.*, 2018; Moghadam Ziabari, *et al.*, 2019)



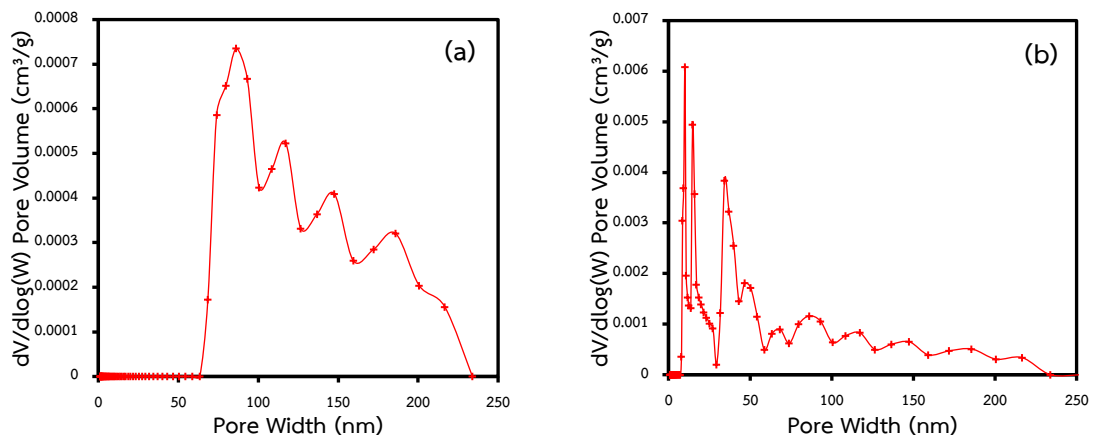
รูปที่ 4.8 TGA (a) และ $\Delta T G$ (b) ของวัสดุคูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ (Agar) และวัสดุคูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์ (Agar+GO)

4.2.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจน

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับและการคายการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุดูดซับที่มีและไม่มีแกรฟีนออกไซด์ (รูปที่ 4.9) พบว่าวัสดุดูดซับทั้งสองแบบนั้นมีลักษณะของไอโซเทอมเป็น hysteresis loop แบบไม่ปิด (Unclosed hysteresis loop) อาจเป็นผลมาจากการบวมตัว (swelling) ของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์จากวัน ทำให้ไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้ไม่สามารถคายการดูดซับออกมาได้ที่ความดันต่ำ (Paquin, *et al.*, 2015) จากรูปที่ 4.9 เห็นได้ว่า hysteresis loop ของวัสดุดูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์จะมีลักษณะที่กว้างกว่าวัสดุดูดซับที่มีแกรฟีนออกไซด์ แสดงให้เห็นว่ามีการบวมตัวที่สูงกว่า ซึ่งเมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์จะทำให้การบวมตัวลดลง เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์นั้นเข้าไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับวันทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระลดลง (Belay, *et al.*, 2017) ผลจากการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่าวัสดุดูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับที่มีแกรฟีนออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0972 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.2766 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม วัสดุดูดซับผสมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้นั้น จะมีพื้นที่ผิวน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของแกรฟีนออกไซด์ (236 ตารางเมตรต่อกรัม) (Yu, *et al.*, 2018) เนื่องจากในวัสดุดูดซับนั้นมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์อยู่น้อยมากประมาณ 6.67%w/w แกรฟีนออกไซด์/วัน จึงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chen, *et al.* (2017) ซึ่งได้ทำการสังเคราะห์วัสดุดูดซับจากวันและแกรฟีนออกไซด์เช่นกันโดยใช้ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ 0, 20, 60 และ 80% ผลของพื้นที่ผิวจำเพาะที่ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ต่ำกว่า 20% มีค่าน้อยกว่า 1 ตารางเมตรต่อกรัม และผลจากการกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์ จากรูปที่ 4.10 (a) พบว่า วัสดุดูดซับวันปราศจากแกรฟีนออกไซด์ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร หรือมีรูพรุนเป็นแบบขนาดใหญ่ (macropore) โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนอยู่ที่ 86.43 นาโนเมตร ส่วนวัสดุดูดซับที่มีแกรฟีนออกไซด์ ผลการศึกษาในรูปที่ 4.10 (b) พบว่า มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนอยู่ที่ 2.17 นาโนเมตร จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ลงไปขนาดรูพรุนจะเล็กลง เนื่องมาจากการฝังตัวของแกรฟีนออกไซด์ที่ผนังของรูพรุน ทำให้ผนังของรูพรุนหนาขึ้น ขนาดของรูพรุนจึงเล็กลง รวมถึงมีปริมาตรรูพรุน (total pore volume) ลดลงจาก 0.00210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.00015 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับกราฟไอโซเทอมของการดูดซับในรูปที่ 4.9 (b) ซึ่งเป็นไอโซเทอมชนิดที่ 4 (Type IV) หรือไอโซเทอมของวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Thommes, *et al.*, 2015)



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของ (a) วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ และ (b) วัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์



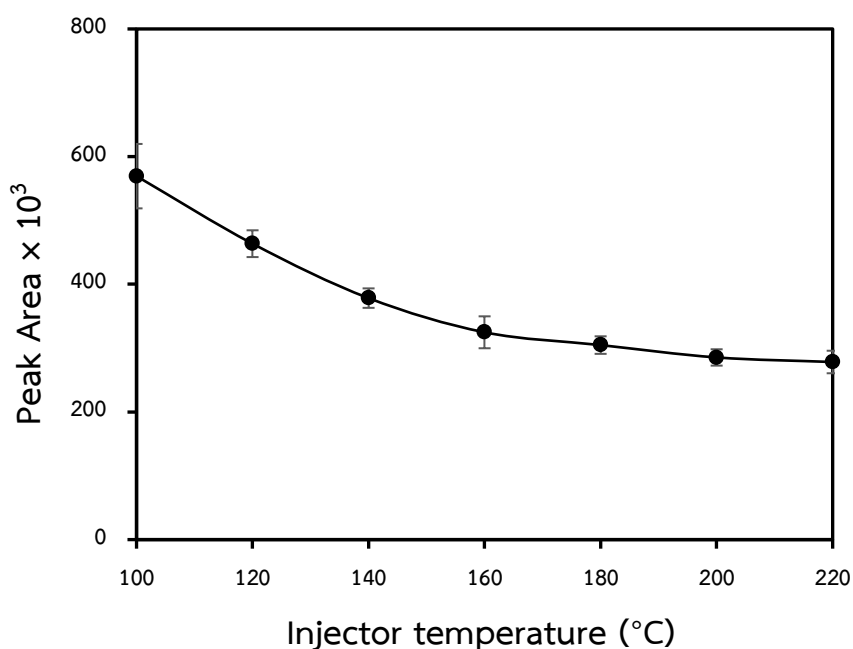
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของ (a) วัสดุดูดซับวุ้นที่ปราศจากแกรฟีนออกไซด์ และ (b) วัสดุดูดซับวุ้นที่มีแกรฟีนออกไซด์

4.3 การวิเคราะห์สารสไตรีน

4.3.1 สภาพของ GC-MS ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารสไตรีน

4.3.1.1 อุณหภูมิของหัวฉีด (Injector temperature)

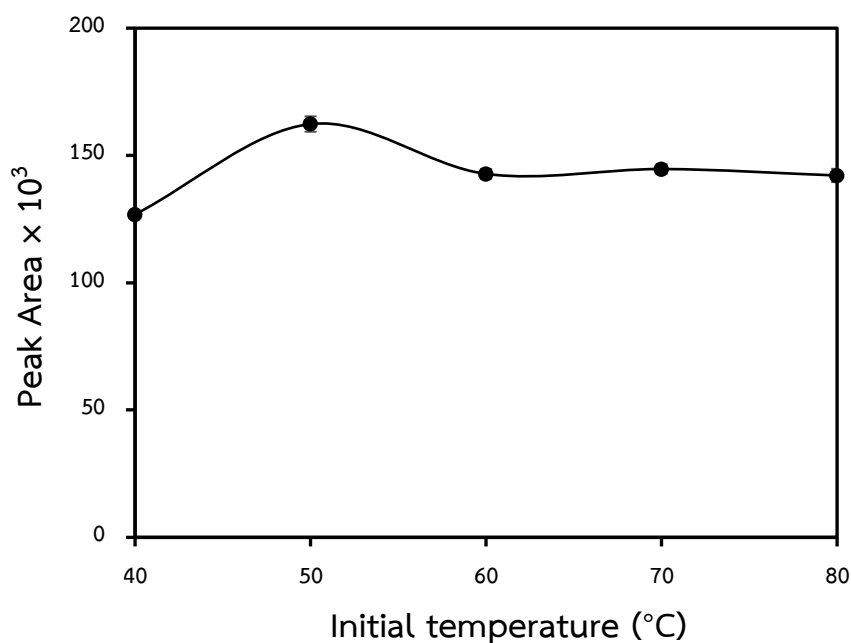
อุณหภูมิของหัวฉีด เป็นส่วนที่สารตัวอย่างถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่คอลัมน์ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมของหัวฉีด ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยกลายเป็นไอได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว ซึ่งอุณหภูมิของหัวฉีดที่เหมาะสมได้ทำการศึกษาตั้งแต่ 100 ถึง 220 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของหัวฉีดส่งผลให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ให้พื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดคือ 100 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิดังกล่าว โครมาโทแกรมที่ได้จะมีลักษณะที่ไม่สมมาตรหรือเป็นโครมาโทแกรมที่มีหาง (tailing peak) ส่งผลให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้นั้น มีความเที่ยงต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (ซึ่งโครมาโทแกรมมีลักษณะสมมาตรมากกว่า) เป็นอุณหภูมิของหัวฉีดที่เหมาะสมในการระเหยเป็นไอของสารสไตรีนก่อนเข้าสู่คอลัมน์



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิหัวฉีดสารต่อพื้นที่ใต้กราฟ

4.3.1.2 อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature)

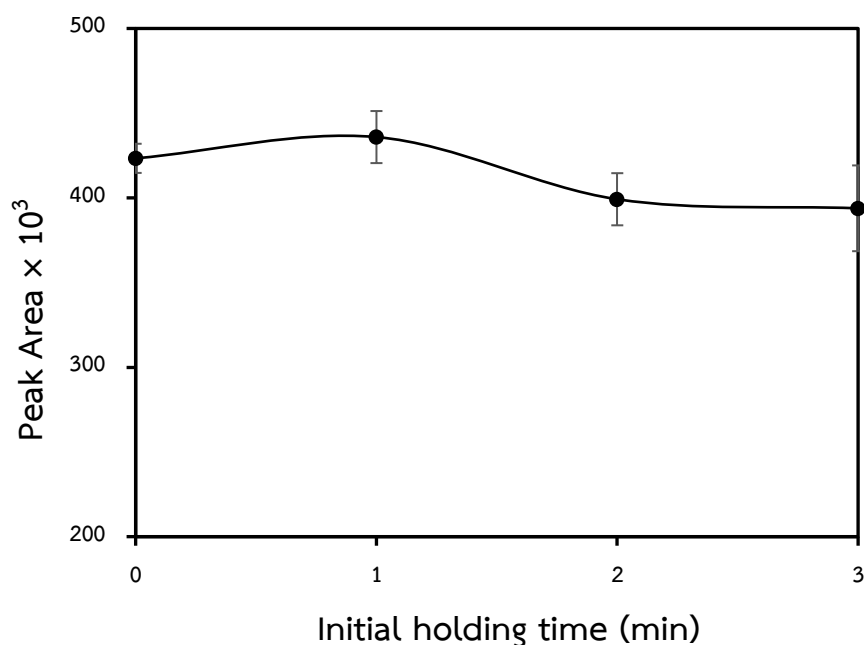
จากการศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นในช่วงตั้งแต่ 40 ถึง 80 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่า การใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าของพื้นที่ใต้กราฟมีค่าสูงที่สุด และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส ค่าของพื้นที่ใต้กราฟนั้น จะมียาลดลงและคงที่จนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้น อุณหภูมิเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุด คือ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 ผลการศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นต่อพื้นที่ใต้กราฟ

4.3.1.3 ระยะเวลาเริ่มต้น (Initial time)

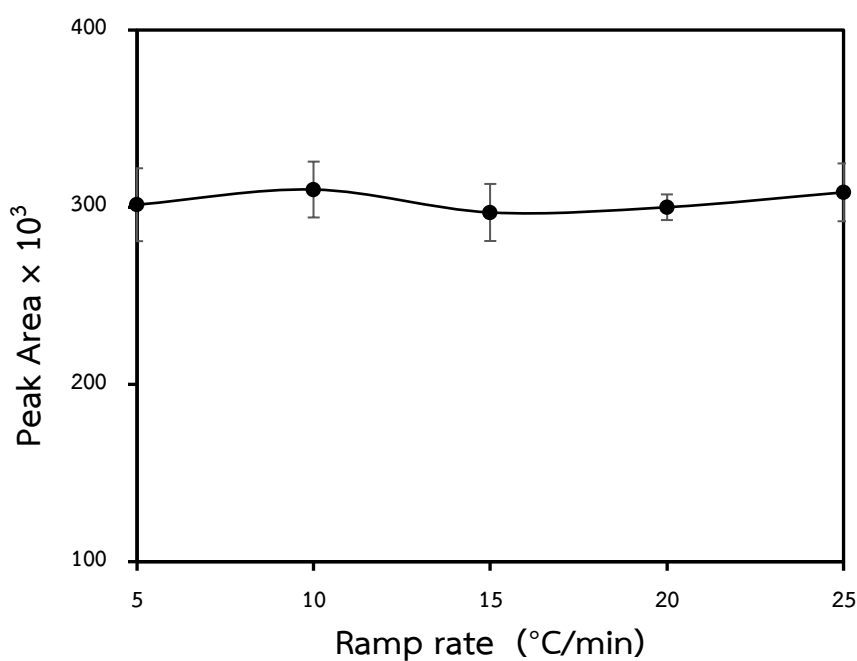
ในการศึกษาระยะเวลาเริ่มต้น จะทำการคงที่อุณหภูมิเริ่มต้นไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส และทำการศึกษาผลของระยะเวลาในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 3 นาที ผลการศึกษาในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ 1 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเวลาเริ่มต้นมากกว่า 1 นาที ค่าพื้นที่ใต้กราฟจะมีค่าลดลง และจะมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเริ่มต้นมากกว่า 2 นาทีขึ้นไป ดังนั้นระยะเวลาของอุณหภูมิเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 1 นาที



รูปที่ 4.13 ผลของระยะเวลาของอุณหภูมิเริ่มต้นต่อพื้นที่ใต้กราฟ

4.3.1.4 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Ramp rate)

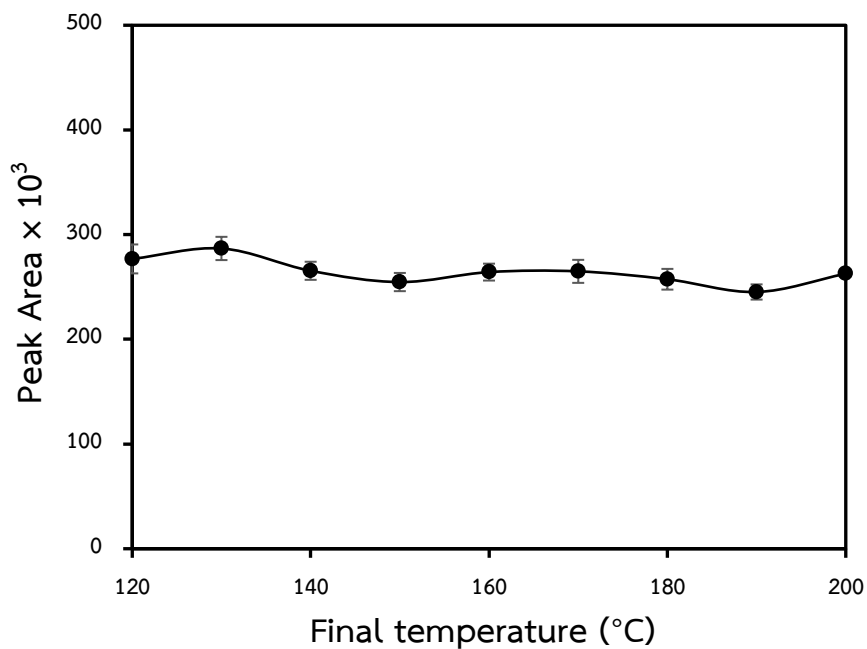
จากการศึกษาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งทำการศึกษาในช่วง 5 ถึง 25 องศาเซลเซียส ต่อนาที ผลการศึกษาในรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 5 เป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีขึ้นไป ค่าพื้นที่ใต้กราฟจะมีค่าลดลงและคงที่หลังจาก 15 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นต้นไป ดังนั้นในการวิเคราะห์สไตรีน จึงเลือกใช้ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสม



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อพื้นที่ใต้กราฟ

4.3.1.5 อุณหภูมิสุดท้าย (Final temperature)

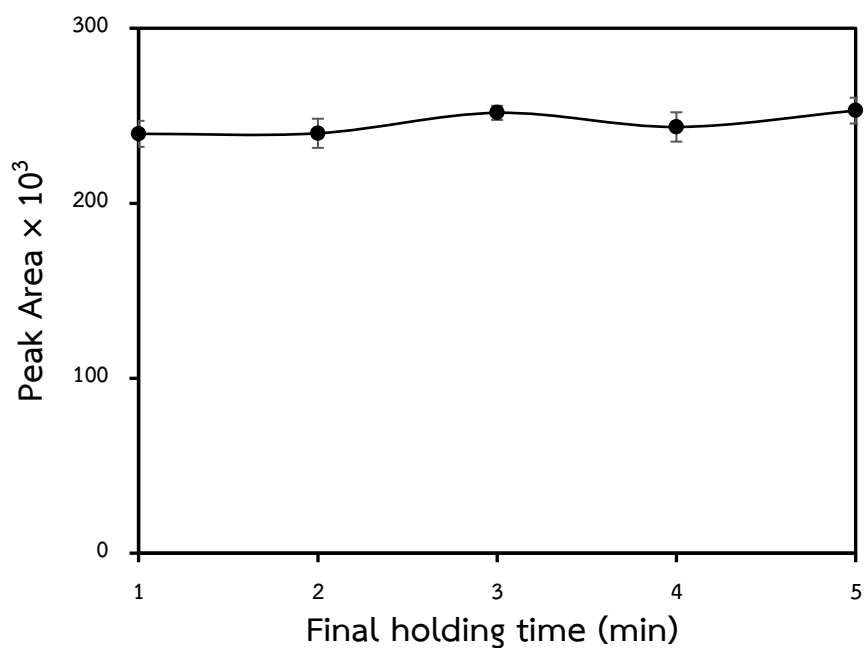
จากผลการศึกษาอุณหภูมิสุดท้ายตั้งแต่ 120 ถึง 200 องศาเซลเซียส (แสดงดังรูปที่ 4.15) ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ดังนั้น จึงเลือกใช้อุณหภูมิต่ำที่สุดที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิสุดท้าย เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์



รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิสุดท้ายต่อพื้นที่ใต้กราฟ

4.3.1.6 ระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้าย (Final time)

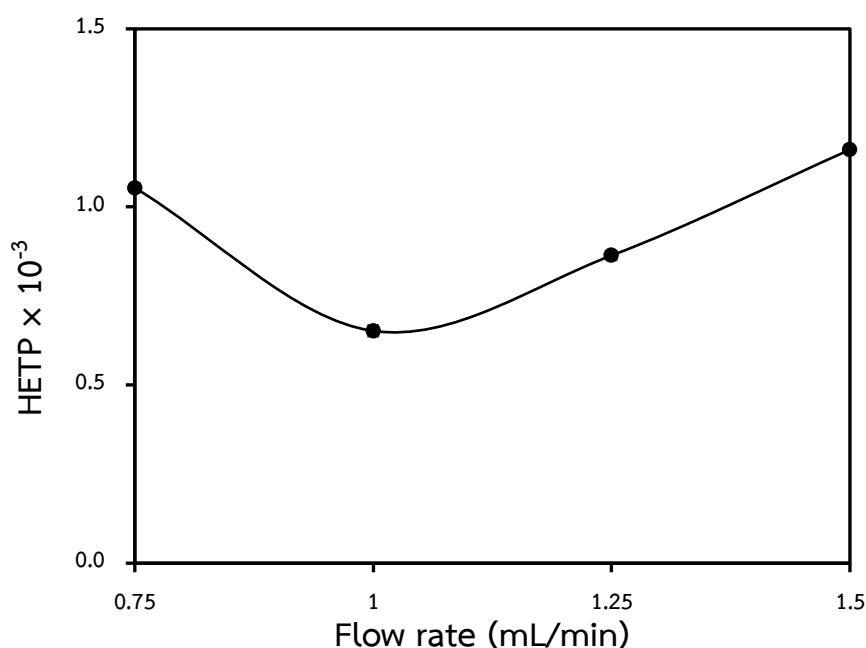
จากการศึกษาระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้ายที่ 120 องศาเซลเซียส ได้ศึกษาระยะเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ผลจากรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้มีค่าคงที่ตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ดังนั้นระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้ายที่เหมาะสมและใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยที่สุดคือ 1 นาที



รูปที่ 4.16 ผลการศึกษาระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้ายต่อพื้นที่ใต้กราฟ

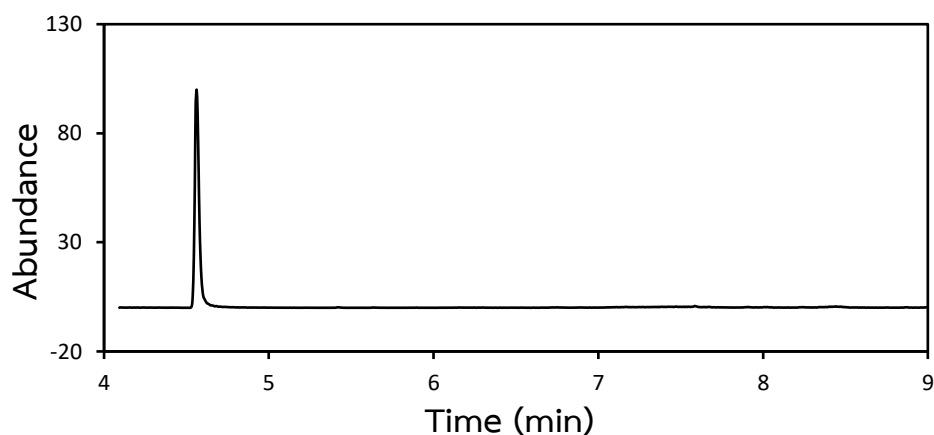
4.3.1.7 อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม (Flow rate)

อัตราการไหลของแก๊สพาเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการแยกสารภายในคอลัมน์และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาในรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมต่อค่าความกว้างของเพลททางทฤษฎี (Height Equivalent to a Theoretical Plate; HETP) ซึ่งศึกษาอัตราการไหลของแก๊สพาในช่วง 0.75 ถึง 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาทีจะให้ค่าความกว้างของเพลททางทฤษฎีน้อยที่สุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ จะเกิดการแยกสารได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นอัตราการไหลของแก๊สพาที่เหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ คือ 1 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.17 ผลของอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมต่อค่าความกว้างของเพลททางทฤษฎี

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารสไตรีนด้วยเครื่อง GC-MS ในหัวข้อ 4.3.1.1 – 4.3.1.7 ดังกล่าวไว้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ทั้งหมด 9 นาที และสารสไตรีนมี Retention time เท่ากับ 4.57 นาที ดังแสดงในโครมาโทแกรมในรูปที่ 4.18 และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1



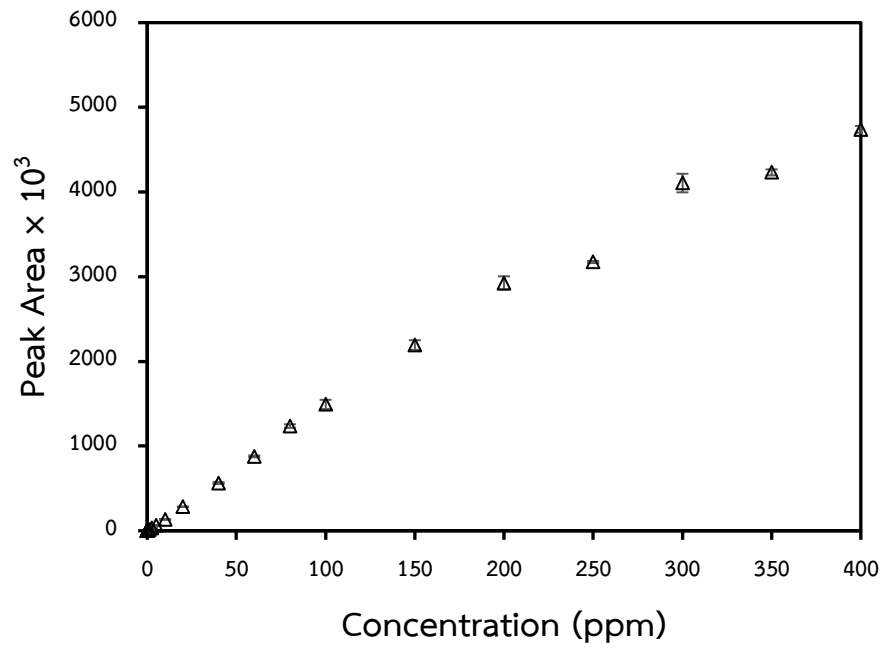
รูปที่ 4.18 โครมาโตแกรมของสารสไตรีนที่ความเข้มข้น 200 ppm_v

ตารางที่ 4.1 สรุปการศึกษาสภาวะ GC-MS ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารสไตรีน

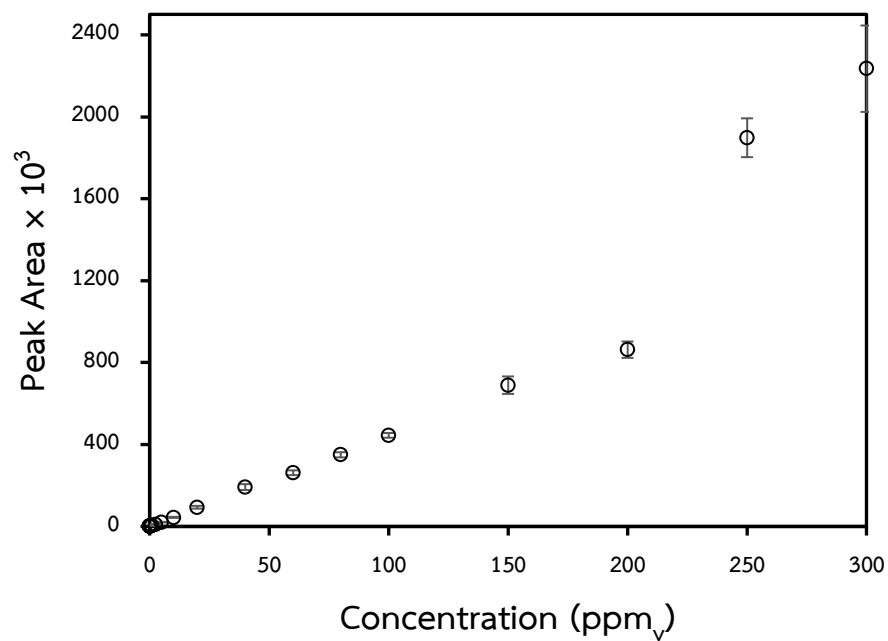
ปัจจัยที่ศึกษา	สภาวะที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
อุณหภูมิของหัวฉีด	80-220 °C	120 °C
อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม	0.75-1.5 mL min ⁻¹	1 mL min ⁻¹
อุณหภูมิของคอลัมน์		
อุณหภูมิเริ่มต้น	40-80 °C	50 °C
ระยะเวลาของอุณหภูมิเริ่มต้น	0-3 min	1 min
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	5-25 °C min ⁻¹	10 °C min ⁻¹
อุณหภูมิสุดท้าย	120-200 °C	120 °C
ระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้าย	1-5 min	1 min

4.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารสไตรีน

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารสไตรีนทั้งในรูปของเหลวและในรูปของแก๊สทำได้โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนกับพื้นที่ใต้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 ซึ่งจากรูปที่ 4.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลวกับพื้นที่ใต้กราฟในช่วงความเข้มข้น ตั้งแต่ 0.0001 ถึง 400 ppm และ รูปที่ 4.20 เป็นกราฟที่อยู่ในรูปของแก๊สในช่วงความเข้มข้น ตั้งแต่ 0.0001 ถึง 300 ppm_v ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ค่าพื้นที่ใต้กราฟของทั้งสองกราฟนั้นแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสไตรีน



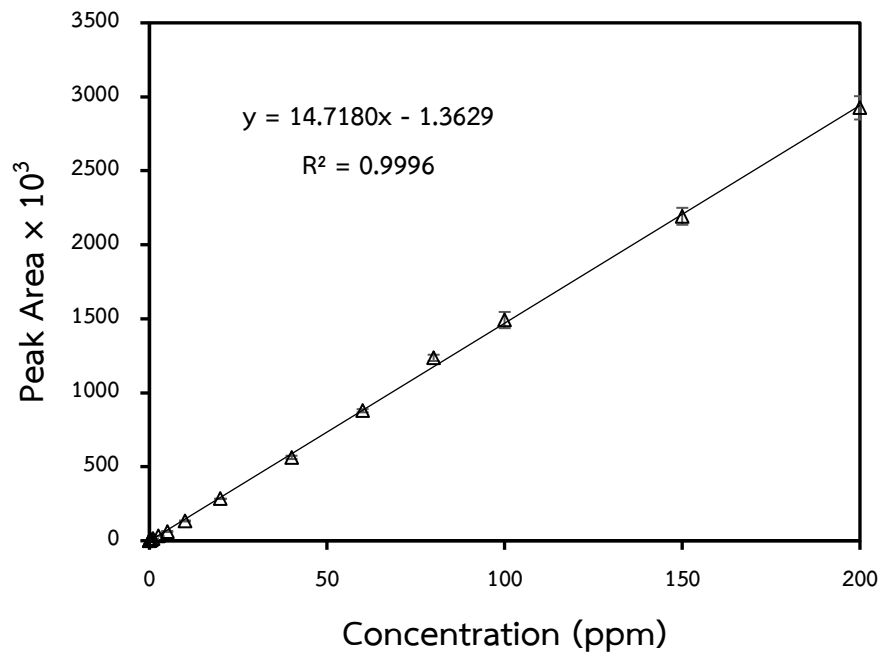
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลว กับพื้นที่ใต้กราฟ



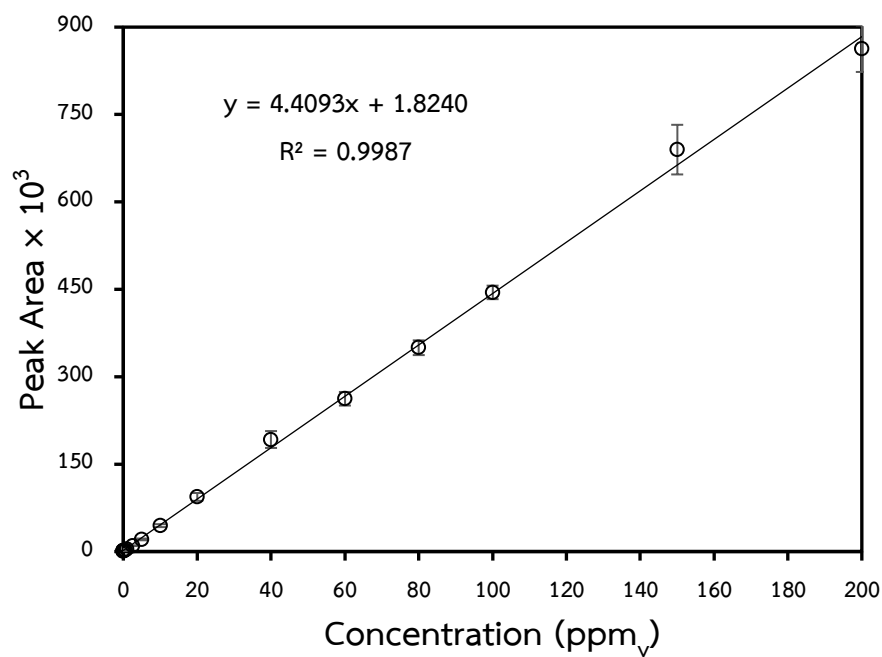
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊ส กับพื้นที่ใต้กราฟ

4.3.3 สมรรถนะของระบบการวิเคราะห์

จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Dynamic Range: LDR) ของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลวและแก๊สกับพื้นที่ใต้กราฟ ดังหัวข้อ 4.3.2 ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มากกว่า 0.99 พบว่าให้ค่าช่วงความเป็นเส้นตรงกว้างที่สุดสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารสไตรีนในช่วง 0.01 ถึง 200 ppm (รูปที่ 4.21) และ 0.005 ถึง 200 ppm_v (รูปที่ 4.22) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9996 และ 0.9987 และสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน (Calibration equation) คือ $y = 14.7180x - 1.3629$ และ $y = 4.4093x + 1.8240$ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารสไตรีนในรูปของเหลวและแก๊สตามลำดับ และเมื่อศึกษาความแม่นยำ (Accuracy) ของระบบที่พัฒนาขึ้นโดยการตรวจวัดสารสไตรีนในรูปของเหลวที่ความเข้มข้น 15 ppm และในรูปของแก๊สที่ความเข้มข้น 15 ppm_v พบว่า ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error) ในรูปของเหลว เท่ากับ 1.94% และในรูปของแก๊ส เท่ากับ 0.48% ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 10% ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Sunesson, *et al.*, 1995) และจากสมการเส้นตรงข้างต้นดังที่กล่าวสามารถนำมาหาค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection: LOD) และขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation: LOQ) โดยคำนวณจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบลงค์ (blank) 10 ซ้ำ และความชันของสมการเส้นตรง ซึ่งจากการศึกษาให้ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณในรูปของเหลวต่ำสุดเท่ากับ 0.01 ± 0.00 และ 0.02 ± 0.00 ppm และในรูปของแก๊สต่ำสุดเท่ากับ 0.001 ± 0.000 และ 0.003 ± 0.000 ppm_v



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของเหลวกับพื้นที่ใต้กราฟ

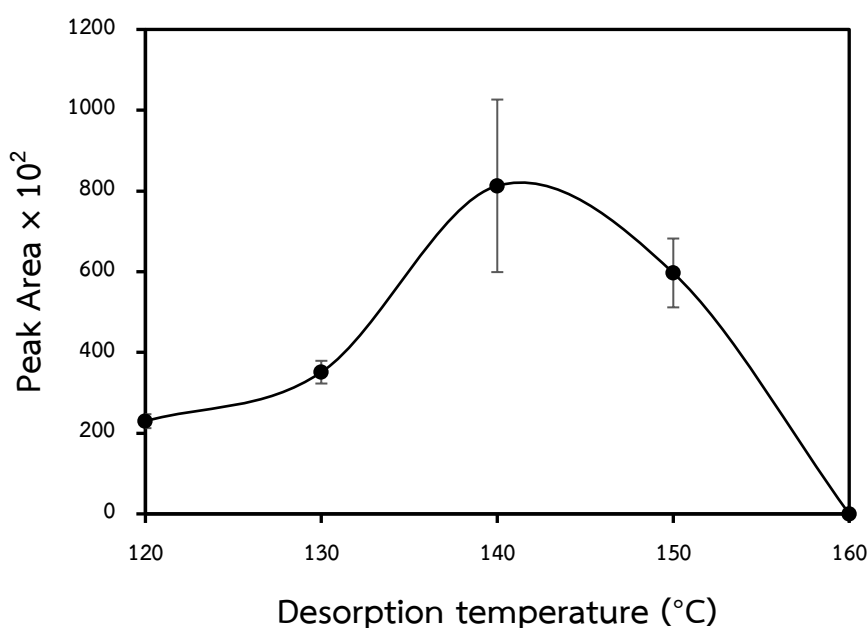


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนที่อยู่ในรูปของแก๊สกับพื้นที่ใต้กราฟ

4.4 สภาวะในการคายการดูดซับ

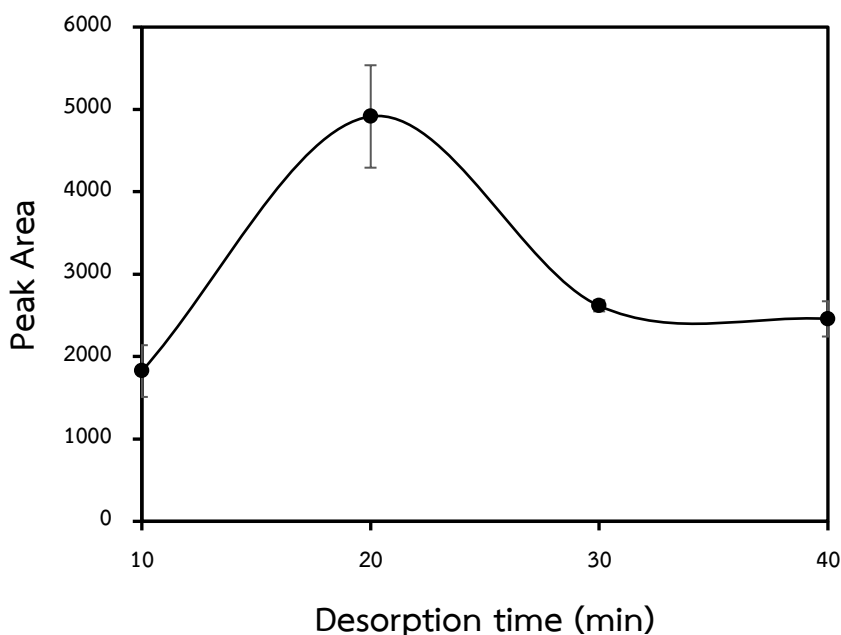
การคายการดูดซับของวัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นเป็นการสกัดโดยใช้ความร้อน (Thermal Desorption) โดยปราศจากสารเคมีทำละลาย ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการลดของเสียที่จะต้องกำจัดหลังการวิเคราะห์ได้ เมื่อทำการให้ความร้อนแก่วัสดุดูดซับ วัสดุดูดซับจะทำการคายการดูดซับ ทำให้เกิดการสกัดแก๊สออกมาและแก๊สที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งประสิทธิภาพในการคายการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่วัสดุดูดซับ ซึ่งจะต้องพอเหมาะไม่ทำให้เกิดการคายการดูดซับที่น้อยเกินไป หรือทำให้สารสไตรีนเกิดการสลายตัวได้

ผลจากการศึกษาอุณหภูมิของการคายการดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 120 ถึง 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการคายการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 120 ถึง 160 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากพลังงานที่โมเลกุลได้รับจะถูกใช้ไปในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสไตรีนและตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณสารสไตรีนที่คายการดูดซับออกมามีมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 140 องศาเซลเซียส พบว่าค่าพื้นที่ใต้กราฟได้มีค่าลดลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจส่งผลทำให้สารสไตรีนสลายตัวได้ ทำให้ปริมาณสารสไตรีนที่สกัดได้ลดลง ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้สกัดวัสดุดูดซับให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 140 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 ผลของอุณหภูมิในการคายการดูดซับ

อีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการคายการดูดซับของสไตรีนออกจากแก้วดูดซับ คือ เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนหรือให้พลังงานแก่แก้วดูดซับ โดยในงานวิจัยนี้ จะศึกษาผลของเวลา ในช่วง 10 ถึง 40 นาที ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งพบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่แก้วดูดซับใน เวลาเพิ่มขึ้นค่าของพื้นที่ใต้กราฟมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่เวลา 20 นาที แต่เมื่อให้ความร้อนนาน กว่า 20 นาที พบว่าค่าพื้นที่ใต้กราฟมีค่าลดลง ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแก่แก้วดูดซับ ในการคายการดูดซับคือ 20 นาที



รูปที่ 4.24 ผลของเวลาในการคายการดูดซับ

4.5 การทดสอบวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในสภาพแวดล้อมจริง

4.5.1 การศึกษาระยะเวลาในการแขวนตัวอย่าง

ผลจากการศึกษาระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างทั้งหมดที่ศึกษามี 3 จุด จุดแขวน ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.6 (แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ) ซึ่งจากผลของ ระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจากจุดที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.2 เป็นตารางแสดงระยะเวลาที่แขวน ตัวอย่างกับความเข้มข้นของสารสไตรีน จุดที่ 1 ซึ่งเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสารสไตรีนสูง เนื่องจาก บริเวณนี้เป็นบริเวณหน้าห้องขึ้นรูปขนาดเล็กที่มีการใช้สารสไตรีนในการทำผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป จึงทำให้

จุดนี้เป็นจุดที่มีความเข้มข้นสูง จากการศึกษพบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างเพิ่มขึ้นในช่วง 1-7 วัน ความเข้มข้นของสไตรีนที่ถูกดูดซับจะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างมากกว่า 7 วัน กลับพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารสไตรีนที่เก็บได้จะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า อัตราการดูดซับสไตรีนจะเข้าสู่สมดุล เมื่อใช้เวลาในการเก็บตัวอย่าง 7 วัน อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างมากกว่านั้น อาจเกิดการคายการดูดซับได้ เมื่อทำการสังเกตความแตกต่างของปริมาณสไตรีนที่เก็บได้ เมื่อใช้ระยะเวลาในการแขวนอุปกรณ์ 3 วัน และ 7 วัน พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารสไตรีนจะไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ ดังนั้นระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างที่เหมาะสม จึงถูกแนะนำให้ใช้ 3 วัน

ตารางที่ 4.2 ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 1

ระยะเวลาในการแขวนตัวอย่าง (วัน)	ความเข้มข้นสไตรีน (ppm _v)*
1	84.35±2.94
3	101.34±19.17
7	102.20±25.61
14	88.82±22.27

* 3 ซ้ำ, RSD ≤ 25%

ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจุดที่ 2 เป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสไตรีนสูงเช่นเดียวกับจุดที่ 1 ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่มีการใช้สารสไตรีนในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่จึงกำหนดให้จุดนี้เป็นอีกหนึ่งจุดที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาการแขวนตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นของสไตรีนนั้นมีค่าสูงขึ้น และเมื่อระยะเวลาการแขวนตัวอย่างหลังจากวันที่ 3 เห็นได้ชัดว่าค่าความเข้มข้นมีค่าลดลง แสดงว่าระยะเวลาที่สารสไตรีนถูกดูดซับจนเข้าสู่สมดุล ณ จุดที่ 2 คือ 3 วัน

ตารางที่ 4.3 ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 2

ระยะเวลาในการแขวนตัวอย่าง (วัน)	ความเข้มข้นสไตรีน (ppm _v)*
1	123.86±1.98
3	133.11±13.13
5	103.11±3.14
14	89.57±4.50

* 3 ซ้ำ, RSD < 11%

ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจุดที่ 3 เป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสไตรีนต่ำ เนื่องจากจุดนี้อยู่ห่างไกลจากบริเวณที่มีการใช้สารสไตรีนโดยตรง และเป็นจุดที่อยู่บริเวณใต้บันไดทางขึ้นของสำนักงาน โดยด้านข้างบันไดจะมีประตูปิดกั้นบริเวณทางเชื่อมต่อกับส่วนงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้านนอกสำนักงาน แต่บริเวณนี้ยังคงมีโอกาสที่สารสไตรีนจะแพร่เข้ามาได้จากการเปิด-ปิดประตู ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดให้บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งผลจากการศึกษาระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างพบว่า เมื่อระยะเวลาการแขวนเพิ่มขึ้นในช่วง 7 วันแรก ค่าความเข้มข้นของสไตรีนที่เก็บได้จะมีค่าสูงขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการแขวนมากกว่า 7 วัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากระยะเวลาการแขวนที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มข้นทั้งหมดค่อนข้างที่จะมีค่าใกล้เคียงกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ อัตราการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลตั้งแต่ 3 วันแรก แต่เนื่องจากจุดนี้เป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสารสไตรีนต่ำ ปริมาณสไตรีนที่เก็บได้ จึงมีโอกาที่จะเกิดความแปรปรวนหรือมีผลกระทบจากปัจจัยภายนอกได้หลายปัจจัย เช่น วันที่เก็บตัวอย่างอาจตรงกับวันหยุดยาวของบริษัท ทำให้มีการผลิตและปริมาณสไตรีนที่เก็บได้น้อยกว่าปกติ เป็นต้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกระยะเวลาการแขวนที่ 7 วัน แทนระยะเวลา 3 วัน เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

ตารางที่ 4.4 ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 3

ระยะเวลาในการแขวนตัวอย่าง (วัน)	ความเข้มข้นสไตรีน (ppm _v)*
3	17.21±1.11
7	18.90±2.36
14	16.38±2.05
28	16.01±2.41

* 3 ซ้ำ, RSD < 16%

จากผลการศึกษาระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างทั้ง 3 จุด สรุปผลได้ว่า จุดที่ 1 และ 2 นั้นซึ่งเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสไตรีนสูงมีระยะเวลาการแขวนตัวอย่างที่เหมาะสมคือ 3 วัน และจุดที่ 3 ซึ่งเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสไตรีนต่ำมีระยะเวลาการแขวนตัวอย่างที่เหมาะสมคือ 7 วัน

4.5.2 การศึกษาผลของความสูง

ผลจากการศึกษาระดับความสูงในการแขวนตัวอย่างที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 0.5 ถึง 2.5 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งผลมาจากการแขวนตัวอย่าง ณ จุดที่ 1 เป็นบริเวณหน้าห้องขึ้นรูปขนาดเล็กซึ่งเป็นจุดที่มีความเข้มข้นสารสไตรีนสูง พบว่าเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของ

สารสไตรีนมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสไตรีนมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 104.15 กรัมต่อโมล ซึ่งมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของอากาศ (ประมาณ 29 กรัมต่อโมล) ทำให้ปริมาณสไตรีนมีมากบริเวณที่มีความสูงน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อดูค่าความแตกต่างแล้ว ค่าที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการแขวนตัวอย่างในงานวิจัยนี้ใช้ระดับความสูงจากพื้นดิน 1.5 เมตร เป็นระดับความสูงที่เหมาะสมในการแขวนอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง เนื่องจากระดับความสูงดังกล่าวเป็นระดับความสูงเดียวกับระดับการหายใจของมนุษย์ (Zabiegała, *et al.*, 2002) ประกอบกับพื้นที่เก็บตัวอย่างเป็นพื้นที่ภายในโรงงาน ซึ่งมีคนทำงานอยู่ การศึกษาหาปริมาณสารสไตรีนเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ใน 8 ชั่วโมงของคนทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม จึงมีความสำคัญในเรื่องอาชีวอนามัยและความปลอดภัยในการทำงานของคนงาน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกระดับแขวนอ้างอิงตามระดับการหายใจของมนุษย์ที่ 1.5 เมตร ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น

ตารางที่ 4.5 ผลของระดับความสูงในการแขวนตัวอย่าง

ระดับความสูง (เมตร)	ความเข้มข้นสไตรีน (ppm _v)*
0.5	5.13±1.11
1	5.51±1.15
1.5	4.40±0.40
2	4.32±0.83
2.5	2.73±0.34

* 3 ซ้ำ, RSD < 21%

4.5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์פשซีพีที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ จะทำการศึกษาโดยนำอุปกรณ์ทั้งสองชนิด มาใช้ในการเก็บตัวอย่างสไตรีนที่มีอยู่ในสถานะแวดล้อมจริง 2 จุดด้วยกัน โดยแบ่งเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสไตรีนสูงและต่ำ ผลแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่าความเข้มข้นในจุดที่ 3 ซึ่งเป็นจุดที่อยู่ใต้บันได มีความเข้มข้นของสไตรีนต่ำพบสารสไตรีนจากวัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.12±0.00 ppm_v และค่าความเข้มข้นจากวัสดุดูดซับเชิงพาณิชย์เท่ากับ 0.10±0.01 ppm_v และจุดที่ 1 ซึ่งอยู่บริเวณหน้าห้องขึ้นรูปเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสารสไตรีนสูง พบค่าความเข้มข้นจากวัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 1.19±0.04 ppm_v และค่าความเข้มข้นจากวัสดุดูดซับเชิงพาณิชย์เท่ากับ 1.06±0.03 ppm_v โดยตัว

ดูดซับทั้งสองแบบจะมีปริมาณสไตรีนที่ถูกดูดซับแตกต่างกัน 2% และ 12.26% สำหรับพื้นที่ที่มีความเข้มข้นต่ำและสูงตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation; %RSD) น้อยกว่า 13% ซึ่งถือว่าดีกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ 25% (NIOSH) สำหรับการเก็บตัวอย่างในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมของเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบแพสซีฟ (Myers, *et al.*, 2005) สำหรับตัวแพสซีฟที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น มีต้นทุนในการวิเคราะห์ต่อหนึ่งครั้งเท่ากับ 145 บาท ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับตัวแพสซีฟเชิงพาณิชย์ที่มีต้นทุนการวิเคราะห์ครั้งหนึ่งเท่ากับ 1,020 บาท

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นของสารสไตรีนในตัวอย่างจริง

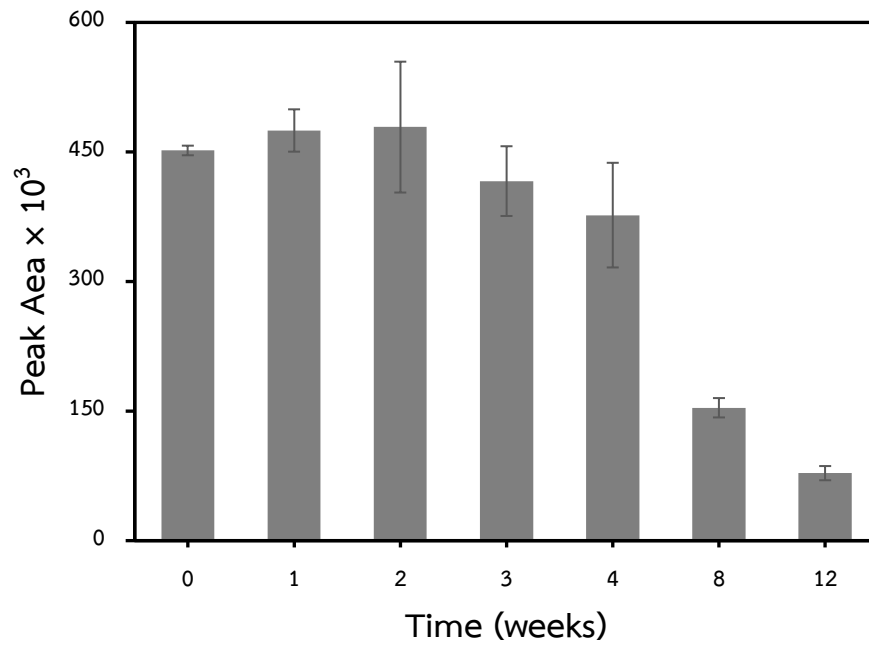
จุดเก็บตัวอย่าง	ความเข้มข้นสไตรีน (ppm./g absorbent)*		%ความแตกต่าง
	ตัวแพสซีฟที่พัฒนา	ตัวแพสซีฟเชิงพาณิชย์	
บริเวณที่มีความเข้มข้นของสไตรีนต่ำ	0.12±0.00	0.10±0.01	2%
บริเวณที่มีความเข้มข้นของสไตรีนสูง	1.19±0.04	1.06±0.03	12.26%

* 4 ซ้ำ, RSD < 13%

4.6 การศึกษาความเสถียรของวัสดุดูดซับ (Stability)

จากการศึกษาความเสถียรของวัสดุดูดซับ (Stability) ที่ได้พัฒนาขึ้นในระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 12 สัปดาห์ ซึ่งได้ทำการเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) ณ อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาว่า วัสดุดูดซับที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นสามารถเก็บรักษาได้นานเพียงใดก่อนที่จะนำไปใช้ในการดูดซับสารสไตรีน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาในการเก็บวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ปริมาณสารสไตรีนที่ดูดซับได้จะมีค่าคงที่ในช่วง 2 สัปดาห์แรก แต่จะเริ่มมีค่าลดลงหลังจากสัปดาห์ที่ 2 เป็นต้นไป (แสดงดังรูปที่ 4.25) ซึ่งค่าร้อยละการลดลงของพื้นที่ใต้กราฟของสไตรีนในสัปดาห์ที่ 3 และ สัปดาห์ที่ 4 คือ 8% และ 17% ตามลำดับ และเมื่อทำการเก็บรักษาจนสัปดาห์ที่ 12 พบว่ามีค่าพื้นที่ใต้กราฟลดลงอย่างมากถึง 83% ผลการศึกษาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหลังจากการสังเคราะห์วัสดุดูดซับนั้นควรที่จะนำวัสดุดูดซับไปใช้โดยทันที หรือสามารถเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) ได้ในระยะเวลา 3 สัปดาห์ ตามคำแนะนำของสถาบันความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งชาติ (NIOSH,

USA) กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยการวัดเชิงปริมาณของตัวอย่างไม่ควรแตกต่างจากการวิเคราะห์ในวันที่ 0 มากกว่า 10% (Volden, *et al.*, 2005)



รูปที่ 4.25 ผลของความเสถียรของวัสดุดูดซับ (Stability)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ชนิดแพสซีฟสำหรับเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือสารสไตรีนในอากาศ โดยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะพัฒนาให้อยู่ในรูปวัสดุดูดซับและอาศัยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ซึ่งวัสดุดูดซับสามารถสังเคราะห์ได้โดยนำผงวุ้น 3 กรัม และแกรฟีนออกไซด์ 200 กรัม มาละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร และทำการกวนผสมที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเทวุ้นใส่หลอดพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เพื่อขึ้นรูปวัสดุดูดซับ และตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมงจนเกิดเป็นเจลวุ้น (hydrogel) เจลวุ้นที่ได้จะถูกนำไปแช่แข็งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้น้ำแข็งละลาย หลังจากนั้น จะนำเจลที่ได้มาตัดแบ่งเป็น 6 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นจะมีความหนา 1 เซนติเมตร และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จะได้เป็นวัสดุดูดซับซีโรเจล (xerogel) ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งทรงกระบอกสีดำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่า วัสดุดูดซับมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีการฝังตัวอยู่ที่บริเวณผนังของรูพรุน ผลของการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR) แสดงให้เห็นว่า วัสดุดูดซับมีความเชื่อมโยงเข้ากันได้ดีด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้วัสดุดูดซับยังสามารถทนความร้อนได้สูงจากผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน (TGA) และจากการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า วัสดุดูดซับมีพื้นที่ผิว 0.2766 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ที่ 2.17 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารสไตรีนด้วยเทคนิค GC-MS พบว่า สภาวะที่เหมาะสมประกอบด้วยอุณหภูมิส่วนนำเข้าสาร 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม 1 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส คงไว้ที่เวลา 1 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิสุดท้าย 120 องศาเซลเซียส และคงที่ไว้ 1 นาที โดยสภาวะดังกล่าว จะถูกนำมาใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน

สไตรีนกับพื้นที่ใต้กราฟทั้งในรูปของเหลวและในรูปของแก๊ส พบว่า ให้ค่าช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear range) ที่กว้างคือ ตั้งแต่ 0.01 ถึง 200 ppm และ 0.005 ถึง 200 ppm_v โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.9996 และ 0.9987 สำหรับการวัดในรูปของเหลวและแก๊สตามลำดับ นอกจากนี้ ยังให้ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ในรูปของเหลวต่ำสุดเท่ากับ 0.01±0.00 และ 0.02±0.00 ppm และในรูปของแก๊สต่ำสุดเท่ากับ 0.001±0.000 และ 0.003±0.000 ppm_v นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวยังให้ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของระบบที่พัฒนาขึ้นสูง ซึ่งจากการตรวจวัดสารสไตรีนในรูปของเหลวที่ความเข้มข้น 15 ppm และในรูปของแก๊สที่ความเข้มข้น 15 ppm_v พบว่า ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (% Relative Error) ในรูปของเหลวเท่ากับ 1.94 และในรูปของแก๊สเท่ากับ 0.48

เมื่อนำวัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นมาทดสอบการดูดซับสารสไตรีนภายในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาสภาวะในการคายการดูดซับที่เหมาะสม ก่อนนำไปทดสอบการดูดซับในสภาพแวดล้อมจริง โดยใช้วิธีการสกัดด้วยความร้อน (Thermal Desorption) ซึ่งเป็นวิธีที่ปราศจากสารเคมีหรือตัวทำละลายใด ๆ จากการศึกษาพบว่า สภาวะการคายการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด คือใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 นาที และเมื่อนำอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่พัฒนาขึ้น มาทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงของโรงงานประกอบสระว่ายน้ำสำเร็จรูป โดยได้ทำการศึกษาในส่วนของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างที่ความสูงจากพื้นดิน 1.5 เมตร ซึ่งเป็นระดับการหายใจของมนุษย์ พบว่า บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารสไตรีนสูง จะต้องใช้เวลาในการแขวนตัวอย่าง 3 วัน และบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ จะใช้เวลาในการแขวนตัวอย่าง 7 วัน เพื่อให้อัตราการดูดซับสารเข้าสู่สมดุล และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์แพสซีฟที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ (SKC 575-006) ซึ่งบรรจุด้วยตัวดูดซับชนิด Anasorb747 โดยการนำอุปกรณ์แพสซีฟทั้งสองชนิดมาแขวนเปรียบเทียบกันทั้งบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า อุปกรณ์เก็บตัวอย่างทั้งสองชนิด จะดูดซับสารสไตรีนได้แตกต่างกัน 2% และ 12.26% สำหรับพื้นที่เก็บตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำและสูงตามลำดับ เมื่อพิจารณาต้นทุนในการวิเคราะห์ต่อหนึ่งครั้ง พบว่า อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น (145 บาท) มีต้นทุนที่ต่ำกว่าอุปกรณ์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ (1,020 บาท) และจากผลการทดสอบความเสถียรของวัสดุดูดซับ พบว่า เมื่อนำวัสดุดูดซับที่พัฒนาขึ้นมาเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) จะมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 3 สัปดาห์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระหว่างการสังเคราะห์วัสดุดูดซับนั้น ในขั้นตอนการขึ้นรูปควรตั้งสารละลายไว้ให้ความร้อนลดลงประมาณ 5-10 นาที แล้วค่อยเทลงไปในภาชนะเพื่อขึ้นรูป เนื่องจากสารละลายมีความร้อนสูง อาจจะทำให้สารละลายซึมผ่านสำลีไปได้

5.2.2 หากมีการนำงานวิจัยไปศึกษาต่อยอด ผู้วิจัยแนะนำให้มีการศึกษาปริมาณผงวุ้นและปริมาณแกรฟีนออกไซด์เพิ่มเติม ในการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ เพื่อการดูดซับ ที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

5.2.3 การเก็บรักษาวัสดุดูดซับควรมีการศึกษาที่สภาวะอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ในตู้เย็น เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของวัสดุดูดซับกับการเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น

5.2.4 ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นสามารถนำไปศึกษาต่อยอดในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายตัวอื่น ๆ เช่น โทลูอิน เบนซีน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย. (2555). *คู่มือวิชาการ เรื่องสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (Volatile Organic Compounds : VOCs)*, สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2552). *คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงสไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene monomer)*, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. (2535). “สไตรีน (Styrene).” *วารสารเทคนิคการแพทย์และกายภาพบำบัด*, 4, 159-164.
- วนิดา จินศาสตร์. (2551). *มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ*, พิมพ์ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, กรุงเทพฯ.
- วิญญู จิตสัมพันธ์เวช, วินัย สมบูรณ์, ภัณฑิรา เกตุแก้ว, ประภา เทพสินธพสกุล และ อภิษฎา มุ่งพัฒนกิจ. (2550). “เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสาร BTEX จากอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ.” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร ฉบับพิเศษ*, 30(4), 633-640.
- สาวิตรี พูลมา. (2548). “การรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในกรุงเทพ.” *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.*
- Ali, I., Basheer, A. A., Mbianda, X. Y., Burakov, A., Galunin, E., Burakova, I., Mkrtchyan, E., Tkachev, A., and Grachev, V. (2019). “Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater.” *Environment International*, Elsevier, 127, 160–180.
- ATSDR. (2002). *Toxicological Profile for Styrene*, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Georgia.
- Aunkor, M. T. H., Mahbubul, I. M., Saidur, R., and Metselaar, H. S. C. (2015). “Deoxygenation of graphene oxide using household baking soda as a reducing agent.” *RSC Advances*, 5(86), 70461–70472.
- Basumatary, K., Daimary, P., Das, S. K., Thapa, M., Singh, M., Mukherjee, A., and Kumar, S. (2018). “Lagerstroemia speciosa fruit-mediated synthesis of silver nanoparticles and its application as filler in agar based nanocomposite films for antimicrobial food packaging.” *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 99–106.

- Batterman, S., Hatzivasilis, G., and Jia, C. (2006). "Concentrations and emissions of gasoline and other vapors from residential vehicle garages." *Atmospheric Environment*, 40(10), 1828–1844.
- Belay, M., Nagarale, R. K., and Verma, V. (2017). "Preparation and characterization of graphene-agar and graphene oxide-agar composites." *Journal of Applied Polymer Science*, 134(33), 1–12.
- Bruno, P., Caselli, M., De Gennaro, G., Iacobellis, S., and Tutino, M. (2008). "Monitoring of volatile organic compounds in non-residential indoor environments." *Indoor Air*, 18(3), 250–256.
- Chang, B. Y. S., Huang, N. M., An'amt, M. N., Marlinda, A. R., Norazriena, Y., Muhamad, M. R., Harrison, I., Lim, H. N., and Chia, C. H. (2012). "Facile hydrothermal preparation of titanium dioxide decorated reduced graphene oxide nanocomposite." *International Journal of Nanomedicine*, 7, 3379–3387.
- Chang, C. W., and Liao, Y. C. (2016). "Accelerated Sedimentation Velocity Assessment for Nanowires Stabilized in a Non-Newtonian Fluid." *Langmuir*, 32(51), 13620–13626.
- Chen, L., Li, Y., Du, Q., Wang, Z., Xia, Y., Yedinak, E., Lou, J., and Ci, L. (2017). "High performance agar/graphene oxide composite aerogel for methylene blue removal." *Carbohydrate Polymers*, 155, 345–353.
- Choodum, A., Malathong, K., NicDaeid, N., Limsakul, W., and Wongniramaikul, W. (2016). "A cost effective hydrogel test kit for pre and post blast trinitrotoluene." *Forensic Science International*, 266, 202–208.
- Chullasat, K., Nurerk, P., Kanatharana, P., Kueseng, P., Sukchuay, T., and Bunkoed, O. (2017). "Hybrid monolith sorbent of polypyrrole-coated graphene oxide incorporated into a polyvinyl alcohol cryogel for extraction and enrichment of sulfonamides from water samples." *Analytica Chimica Acta*, 961, 59–66.
- Dimian, A. C., Bildea, C. S., and Kiss, A. A. (2019). *Styrene Manufacturing : Applications in Design and Simulation of Sustainable Chemical Processes*, Elsevier, English.
- El-Hefian, E. A., Nasef, M. M., and Yahaya, A. H. (2012a). "Preparation and characterization of chitosan/agar blended films: Part 1. chemical structure and morphology." *E-Journal of Chemistry*, 9(3), 1431–1439.

- El-Hefian, E. A., Nasef, M. M., and Yahaya, A. H. (2012b). "Preparation and characterization of chitosan/agar blended films: Part 2. Thermal, Mechanical, and surface properties." *E-Journal of Chemistry*, 9(2), 510–516.
- EPA. (2014). *Passive Samplers for Investigations of Air Quality: Method Description, Implementation, and Comparison to Alternative Sampling Methods*, United States Environmental Protection Agency, U.S.A.
- Freile-Pelegri n, Y., Madera-Santana, T., Robledo, D., Veleza, L., Quintana, P., and Azamar, J. A. (2007). "Degradation of agar films in a humid tropical climate: Thermal, mechanical, morphological and structural changes." *Polymer Degradation and Stability*, 92(2), 244–252.
- Han, D., Yan, L., Chen, W., and Li, W. (2011). "Preparation of chitosan/graphene oxide composite film with enhanced mechanical strength in the wet state." *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 653–658.
- Hummers, W. S., and Offeman, R. E. (1958). "Preparation of Graphitic Oxide." *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339.
- Ibrahim, W. A. W., Nodeh, H. R., and Sanagi, M. M. (2015). "Graphene-Based Materials as Solid Phase Extraction Sorbent for Trace Metal Ions, Organic Compounds, and Biological Sample Preparation." *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 46(4), 267–283.
- ICH. (1994). *Guideline for Industry, Q2B Validation of analytical procedures: Methodology*, Federal Register Publications, U.S.A.
- Kandhol, G., Bala, S., Wadhwa, H., Mahendia, S., and Kumar, S. (2019). "Enhanced UV-blocking and thermal stability of Agar: Effect of reinforcement of reduced graphene oxide (RGO)." *Proceedings of The National Conference on Recent Advances in Condensed Matter Physics: Racmp-2018*, Kurukshetra, India: 12–13 October 2018
- Kumar, V., Lee, Y. S., Shin, J. W., Kim, K. H., Kukkar, D., and Fai Tsang, Y. (2020). "Potential applications of graphene-based nanomaterials as adsorbent for removal of volatile organic compounds." *Environment International*, Elsevier, 135, 1–12.
- Lahaye, M., and Rochas, C. (1991). "Chemical structure and physico-chemical properties of agar." *International Workshop on Gelidium*, 211(1), 137–148.
- Lee, J. H., and Park, S. J. (2020). "Recent advances in preparations and applications of

- carbon aerogels: A review.” *Carbon*, 163, 1–18.
- Li, X., Zhu, H., Wang, K., Cao, A., Wei, J., Li, C., Jia, Y., Li, Z., Li, X., and Wu, D. (2010). “Graphene-on-silicon schottky junction solar cells.” *Advanced Materials*, 22(25), 2743–2748.
- Madera-Santana, T. J., Robledo, D., Azamar, J. A., Ríos-Soberanis, C. R., and Freile-Pelegín, Y. (2010). “Preparation and characterization of low density polyethylene-agar biocomposites: Torque-rheological, mechanical, thermal and morphological properties.” *Polymer Engineering and Science*, 50(3), 585–591.
- Martin, N. A., Leming, E. J., Henderson, M. H., Lipscombe, R. P., Black, J. K., and Jarvis, S. D. (2010). “Verification of diffusive and pumped samplers for volatile organic compounds using a controlled atmosphere test facility.” *Atmospheric Environment*, Elsevier Ltd, 44(28), 3378–3385.
- Medin, A. (1995). “Studies of Structure and Properties of Agarose.” *PhD Thesis*, Upsaliensis, Acta Universitatis.
- Moghadam Ziabari, S. A., Babamoradi, M., Hajizadeh, Z., and Maleki, A. (2019). “The effect of magnetic field on the magnetic property of Agar/Fe₃O₄ nanocomposite.” *Iranian Chemical Communication*, 7, 512–520.
- Myers, G., Myrmel, K., Guild, L.V., Harper, M. (2005). *Validation of Benzene using SKC Passive Sampler*, SKC Inc, U.S.A.
- Nayar, V. T., Weiland, J. D., Nelson, C. S., and Hodge, A. M. (2012). “Elastic and viscoelastic characterization of agar.” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 7, 60–68.
- Ozden, O., and Dogeroglu, T. (2008). “Field evaluation of a tailor-made new passive sampler for the determination of NO₂ levels in ambient air.” *Environmental Monitoring and Assessment*, 142(1–3), 243–253.
- Paquin, F., Rivnay, J., Salleo, A., Stingelin, N., and Silva-Acuña, C. (2015). “Multi-phase microstructures drive exciton dissociation in neat semicrystalline polymeric semiconductors.” *Journal of Materials Chemistry C*, 3(41), 10715–10722.
- Phillips, and Williams. (2009). *Handbook of hydrocolloids : Second edition*, Woodhead Publishing, UK.
- Prado, C., Ibarra, I., and Periago, J. F. (1997). “Evaluation of styrene in air by thermal

- desorption-gas chromatography.” *Journal of Chromatography A*, 778(1–2), 255–262.
- Raphael, E., Avellaneda, C. O., Manzolli, B., and Pawlicka, A. (2010). “Agar-based films for application as polymer electrolytes.” *Electrochimica Acta*, 55(4), 1455–1459.
- Rene, E. R., Montes, M., Veiga, M. C., and Kennes, C. (2011). “Styrene removal from polluted air in one and two-liquid phase biotrickling filter: Steady and transient-state performance and pressure drop control.” *Bioresource Technology*, 102(13), 6791–6800.
- Saelim, J., Kanatharana, P., Thavarungkul, P., and Thammakhet, C. (2013). “Novel fabricated silver particles/polypyrrole printed circuit board passive samplers for volatile organic compounds monitoring.” *Microchemical Journal*, 108, 180–187.
- Saxena, A., Kaloti, M., and Bohidar, H. B. (2011). “Rheological properties of binary and ternary protein-polysaccharide co-hydrogels and comparative release kinetics of salbutamol sulphate from their matrices.” *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(2), 263–270.
- Segovia-Sandoval, S. J., Pastrana-Martínez, L. M., Ocampo-Pérez, R., Morales-Torres, S., Berber-Mendoza, M. S., and Carrasco-Marín, F. (2020). “Synthesis and characterization of carbon xerogel/graphene hybrids as adsorbents for metronidazole pharmaceutical removal: Effect of operating parameters.” *Separation and Purification Technology*, 237, 116341.
- Seow, W. Y., and Hauser, C. A. E. (2016). “Freeze-dried agarose gels: A cheap, simple and recyclable adsorbent for the purification of methylene blue from industrial wastewater.” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 1714–1721.
- Shankar, S., Teng, X., and Rhim, J. W. (2014). “Properties and characterization of agar/CuNP bionanocomposite films prepared with different copper salts and reducing agents.” *Carbohydrate Polymers*, 114, 484–492.
- Strandberg, B., Sunesson, A. L., Olsson, K., Levin, J. O., Ljungqvist, G., Sundgren, M., Sällsten, G., and Barregard, L. (2005). “Evaluation of two types of diffusive samplers and adsorbents for measuring 1,3-butadiene and benzene in air.” *Atmospheric Environment*, 39(22), 4101–4110.
- Stringa, F., Marzi, F., Gianni, L., Imperato, M., Bianchi, A., and Bianchi, P. E. (2016). “Long-term follow-up of anatomical and functional macular changes after a single

- intravitreal implant of dexamethasone 0.7 mg for radiation macular edema secondary to proton beam therapy for choroidal melanoma.” *International Medical Case Reports Journal*, 9, 377–383.
- Subba, J. R., Thammakhet, C., Thavarungkul, P., and Kanatharana, P. (2016). “Sampling of BTX in Hat Yai city using cost effective laboratory-built PCB passive sampler.” *Journal of Environmental Science and Health*, 51(10), 861–869.
- Sun, X., Xia, Q., Zhao, Z., Li, Y., and Li, Z. (2014). “Synthesis and adsorption performance of MIL-101(Cr)/graphite oxide composites with high capacities of n-hexane.” *Chemical Engineering Journal*, 239, 226–232.
- Sunesson, A. L., Nilsson, C. A., and Andersson, B. (1995). “Evaluation of adsorbents for sampling and quantitative analysis of microbial volatiles using thermal desorption-gas chromatography.” *Journal of Chromatography A*, 699(1–2), 203–214.
- Thammakhet, C., Muneesawang, V., Thavarungkul, P., and Kanatharana, P. (2006). “Cost effective passive sampling device for volatile organic compounds monitoring.” *Atmospheric Environment*, 40(24), 4589–4596.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., and Sing, K.S.W. (2015). “Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report).” *Pure Appl. Chem*, 87, 1051–1069.
- Usov, A. I. (1998). “Structural analysis of red seaweed galactans of agar and carrageenan groups.” *Food Hydrocolloids*, 12(3), 301–308.
- Uyanik, A., and Tinkili, N. (1999). “Preparing Accurate Standard Gas Mixtures of Volatile Substances at Low Concentration Levels.” *The Chemical Educator*, 4(4), 141–143.
- Volden, J., Thomassen, Y., Greibrokk, T., Thorud, S., and Molander, P. (2005). “Stability of workroom air volatile organic compounds on solid adsorbents for thermal desorption gas chromatography.” *Analytica Chimica Acta*, 530(2), 263–271.
- Wongniramaikul, W. (2012). “Passive Sampling for Air Quality Monitoring.” *KKU Science Journal*, 40(2), 444–471.
- Yang, K., Li, Y., Tan, X., Peng, R., and Liu, Z. (2013). “Behavior and toxicity of graphene and its functionalized derivatives in biological systems.” *Small*, 9(9–10), 1492–1503.

- Yao, G., Bi, W., and Liu, H. (2020). "pH-responsive magnetic graphene oxide/poly(NVI-co-AA) hydrogel as an easily recyclable adsorbent for cationic and anionic dyes." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 588, 124393.
- Yu, L., Wang, L., Xu, W., Chen, L., Fu, M., Wu, J., and Ye, D. (2018). "Adsorption of VOCs on reduced graphene oxide." *Journal of Environmental Sciences*, 67, 171–178.
- Zabiegała, B., Górecki, T., Przyk, E., and Namieśnik, J. (2002). "Permeation passive sampling as a tool for the evaluation of indoor air quality." *Atmospheric Environment*, 36(17), 2907–2916.
- Zhang, X., Liu, X., Cao, M., Xia, K., and Zhang, Y. (2015). "Preparation of hydroxypropyl agars and their properties." *Carbohydrate Polymers*, 129, 87-91.
- Zhao, W., Zhang, H., Liu, J., Xu, L., Wu, H., Zou, M., Wang, Q., He, X., Li, Y., and Cao, A. (2018). "Controlled Air-Etching Synthesis of Porous-Carbon Nanotube Aerogels with Ultrafast Charging at 1000 A g⁻¹." *Small*, 14(40), 1–10.
- Zheng, Y., Chu, F., Zhang, B., Yan, J., and Chen, Y. (2018). "Ultra-high adsorption capacities of carbon tetrachloride on MIL-101 and MIL-101/graphene oxide composites." *Microporous and Mesoporous Materials*, 263, 71–76.
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., and Ruoff, R. S. (2010). "Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications." *Advanced Materials*, 22(35), 3906–3924.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลสำหรับการพัฒนาวัสดุดูดซับ

ตารางที่ ก.1 ปริมาณผงวุ้นและพื้นที่ได้พืค

ผงวุ้น (g)	พื้นที่ได้พืค			ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3		
1	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0
2	1044	990	2431	1488	817
3	1420	2606	2386	2137	631
3.5	2491	1420	1241	1717	676

ตารางที่ ก.2 ปริมาณแกรฟีนออกไซด์และพื้นที่ได้พืค

แกรฟีนออกไซด์ (mg)	พื้นที่ได้พืค			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^2$)	SD
	1	2	3		
50	11447	10329	7865	99	18
100	37274	27142	14445	263	114
150	64194	45469	26958	455	186
200	59705	68012	78979	689	97
250	123868	108691	93826	1088	150

ตารางที่ ก.3 อุณหภูมิการอบแห้งวัสดุดูดซับและพื้นที่ได้ฟีด

อุณหภูมิ (°C)	พื้นที่ได้ฟีด			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^2$)	SD
	1	2	3		
140	20336	8993	25129	182	83
150	20319	23921	10658	183	69
160	2373	1950	2222	22	2
170	2244	1927	649	16	8
180	241	641	5868	22	31

ตารางที่ ก.4 เวลาการอบแห้งวัสดุดูดซับและพื้นที่ได้ฟีด

เวลา (h)	พื้นที่ได้ฟีด			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^2$)	SD
	1	2	3		
1	3705	9017	7677	68	28
1.5	14785	23401	17817	187	44
2	2214	1781	1501	18	4
2.5	1501	1918	3338	23	10

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการวิเคราะห์สารสไตรีนด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปคโตรเมตรี

ตารางที่ ข.1 ผลของอุณหภูมิหัวฉีดสารต่อพื้นที่ที่ได้พืค

อุณหภูมิของหัวฉีด (°C)	พื้นที่ที่ได้พืค					ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4	5		
80	512845	555447	518192	559038	564038	542	24
100	483255	598091	582305	571888	611489	569	50
120	490579	465506	431853	467924	462189	464	21
140	366642	366972	373643	403543	380789	378	15
160	353355	342167	307109	329016	292285	325	25
180	315664	303825	321338	293389	289579	305	14
200	288755	264266	299150	286850	287924	285	13
220	283988	256486	282703	302080	265942	278	18

ตารางที่ ข.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมต่อพื้นที่ที่ได้พืค

อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม (mL/min)	ความกว้างพืค					ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4	5		
0.75	0.125	0.131	0.097	0.120	0.118	0.118	0.013
1	0.108	0.096	0.077	0.075	0.071	0.085	0.016
1.25	0.073	0.097	0.103	0.083	0.103	0.092	0.013
1.5	0.103	0.103	0.089	0.091	0.117	0.101	0.011

ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นต่อพื้นที่ได้พืค

อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	พื้นที่ได้พืค			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3		
40	127481	126948	126144	127	1
50	161404	159893	165726	162	3
60	142044	141278	144915	143	2
70	143533	146825	143637	145	2
80	144375	139284	142750	142	3

ตารางที่ ข.4 ผลของระยะเวลาของอุณหภูมิเริ่มต้นต่อพื้นที่ได้พืค

ระยะเวลาของ อุณหภูมิเริ่มต้น (min)	พื้นที่ได้พืค					ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4	5		
0	424310	429202	429666	408561	424944	423	9
1	447660	444468	444502	410458	432390	436	15
2	401653	390283	425036	391190	387769	399	15
3	420021	360878	379682	390704	417939	394	25

ตารางที่ ข.5 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อพื้นที่ได้พืค

อัตราการเพิ่ม อุณหภูมิ (°C/min)	พื้นที่ได้พืค					ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4	5		
5	289781	272056	323398	307088	314837	301	21
10	336161	307065	294532	310010	302237	310	16
15	298693	290589	276093	320431	299525	297	16
20	303407	291978	305295	306982	292458	300	7
25	312707	315851	293917	290115	329525	308	16

ตารางที่ ข.6 ผลของอุณหภูมิสุดท้ายต่อพื้นที่ได้พืค

อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	พื้นที่ได้พืค					ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4	5		
120	294815	279490	258257	282392	269140	277	14
130	292783	287595	287066	268584	297965	287	11
140	267577	255600	269682	276543	257987	265	9
150	262365	257110	239815	255626	258617	255	9
160	275103	260542	270378	256828	258242	264	8
170	252962	271963	271546	275159	253013	265	11
180	239945	260948	263310	259460	263295	257	10
190	256134	245140	245569	235832	243390	245	7
200	264095	258814	264357	261745	264450	263	2

ตารางที่ ข.7 ผลการศึกษาระยะเวลาของอุณหภูมิสุดท้ายต่อพื้นที่ได้พืค

ระยะเวลาของ อุณหภูมิสุดท้าย (min)	พื้นที่ได้พืค					ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4	5		
1	245699	246933	232597	230989	242066	240	7
2	234072	247472	250272	231859	236158	240	8
3	249544	253651	246876	257414	250780	252	4
4	246251	248920	230789	251938	240033	244	8
5	256300	255585	239850	257616	255291	253	7

ตารางที่ ข.8 ช่วงความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีนและค่าพื้นที่ใต้พีค (สถานะแก๊ส)

ความเข้มข้น (ppm _v)	พื้นที่ใต้พีค							ค่าเฉลี่ย (×10 ³)	SD
	1	2	3	4	5	6	7		
0.005	691	748	628	722	644	633	771	1	0
0.01	1129	1122	964	1036	959	1099	1078	1	0
0.05	1090	1029	1176	1103	1177	1340	1200	1	0
0.1	1354	1305	1387	1359	1384	1310	1285	1	0
0.25	1547	1609	1783	1434	1564	1526	1497	2	0
0.5	2105	2043	2198	2059	2024	2574	2187	2	0
1	3624	4152	4189	4075	4070	4172	3755	4	0
2.5	9653	10254	9340	11043	9603	10223	9898	10	1
5	19028	20607	19371	21725	22738	19733	22434	21	2
10	40968	41950	46653	46233	45988	46742	42523	44	3
20	84778	97287	104256	94410	90092	87612	97693	94	7
40	174583	207535	204169	189116	178447	209080	182912	192	14
60	253508	266498	269380	249813	278550	269468	248128	262	12
80	327721	361188	364685	345642	357117	343183	348793	350	13
100	423473	445697	446505	452816	459097	448548	436817	445	12
150	663148	638522	656307	744577	747596	695300	682936	690	43
200	776603	880006	898976	874281	878528	858246	874197	863	40

ตารางที่ ข.9 ช่วงความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานสไตรีน และค่าพื้นที่ใต้พีค (สถานะของเหลว)

ความเข้มข้น (ppm)	พื้นที่ใต้พีค			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3		
0.01	1232	1174	1133	1	0.05
0.025	1763	1714	1817	2	0.05
0.05	1878	1922	1998	2	0.06
0.1	2730	2894	2946	3	0.11
0.25	4217	4225	4267	4	0.03
0.5	6775	7127	7168	7	0.22
1	12627	13262	12540	13	0.39
2.5	30163	31723	32714	32	1.29
5	61939	63830	61021	62	1.43
10	130156	136246	133512	133	3.05
20	284400	281582	284113	283	1.55
40	551329	564477	573703	563	11.24
60	869229	890107	875471	878	10.72
80	1222378	1260369	1225053	1236	21.20
100	1485391	1549081	1440011	1491	54.79
150	2128495	2210041	2239120	2193	57.35
200	3003185	2928395	2845847	2926	78.70

ภาคผนวก ค

ข้อมูลจากสถานะการการคายการดูดซับของวัสดุดูดซับ

ตารางที่ ค.1 ผลของอุณหภูมิในการคายซับกับพื้นที่ได้พืค

อุณหภูมิ (°C)	พื้นที่ได้พืค			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^2$)	SD
	1	2	3		
120	21863.44	24961.22	22081.35	230	17
130	32370.56	37990.56	34955.12	351	28
140	56887.52	96777.64	90126.14	813	214
150	63538.09	65599.05	49911.31	597	85
160	0	0	0	0	0

ตารางที่ ค.2 ผลของเวลาในการคายซับกับพื้นที่ได้พืค

เวลา (h)	พื้นที่ได้พืค			ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3		
10	2176	1573	1723	1824	314
20	5632	4539	4573	4915	622
30	2632	2542	2674	2616	68
40	2470	2237	2664	2457	214

ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากทดสอบการดูดซับของวัสดุดูดซับในตัวอย่างจริง

ตารางที่ ง.1 ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 1 กับพื้นที่ได้ฟีด

เวลา (days)	พื้นที่ได้ฟีด			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3		
1	386951	361024	373212	374	13
3	492276	502482	351211	449	85
7	558801	333973	464611	452	113
14	485914	290411	404010	393	98

ตารางที่ ง.2 ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 2 กับพื้นที่ได้ฟีด

เวลา (days)	พื้นที่ได้ฟีด			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3		
1	542544	543297	558015	548	9
3	595754	527692	642829	589	58
5	456486	442585	470315	456	14
14	414445	400481	375304	397	20

ตารางที่ ง.3 ผลของระยะเวลาในการแขวนตัวอย่างจุดที่ 3 กับพื้นที่ได้พืช

เวลา (days)	พื้นที่ได้พืช			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3		
3	80166	80850	72089	78	5
7	77653	97012	80778	85	10
14	67524	84358	70241	74	9
28	73557	82412	61263	72	11

ตารางที่ ง.4 ผลของความสูงในการแขวนตัวอย่างกับพื้นที่ได้พืช

ความสูง(m)	พื้นที่ได้พืช			ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3		
0.5	21498	30106	21745	24	5
1	23044	23396	31971	26	5
1.5	20253	20159	23253	21	2
2	17009	21370	24261	21	4
2.5	12157	14477	14964	14	2

ภาคผนวก จ

ข้อมูลความเสถียรของวัสดุดูดซับ (Stability)

ตารางที่ จ.1 ผลของความเสถียรของวัสดุดูดซับกับพื้นที่ใต้พิศ

เวลา (weeks)	พื้นที่ใต้พิศ				ค่าเฉลี่ย ($\times 10^3$)	SD
	1	2	3	4		
0	459097	448548	446505	452816	452	6
1	463880	481807	505376	448368	475	25
2	409268	417275	542656	546015	479	76
3	408625	465638	423034	367818	416	40
4	336891	322337	392830	455478	377	61
8	144635	170191	150330	150319	154	11
12	89811	77762	73649	71364	78	8

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวบุษกร เกลี้ยงเกลา		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6030221009		
วุฒิการศึกษา	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่	2559

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

บุษกร เกลี้ยงเกลา, “การสังเคราะห์วัสดุสำหรับดูดซับสไตรีนในอากาศ,” ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 19, วันที่ 27-29 พฤษภาคม 2563, ณ โรงแรมเฮอริเทจ เชียงราย จังหวัดเชียงราย, หน้า 174-181.