



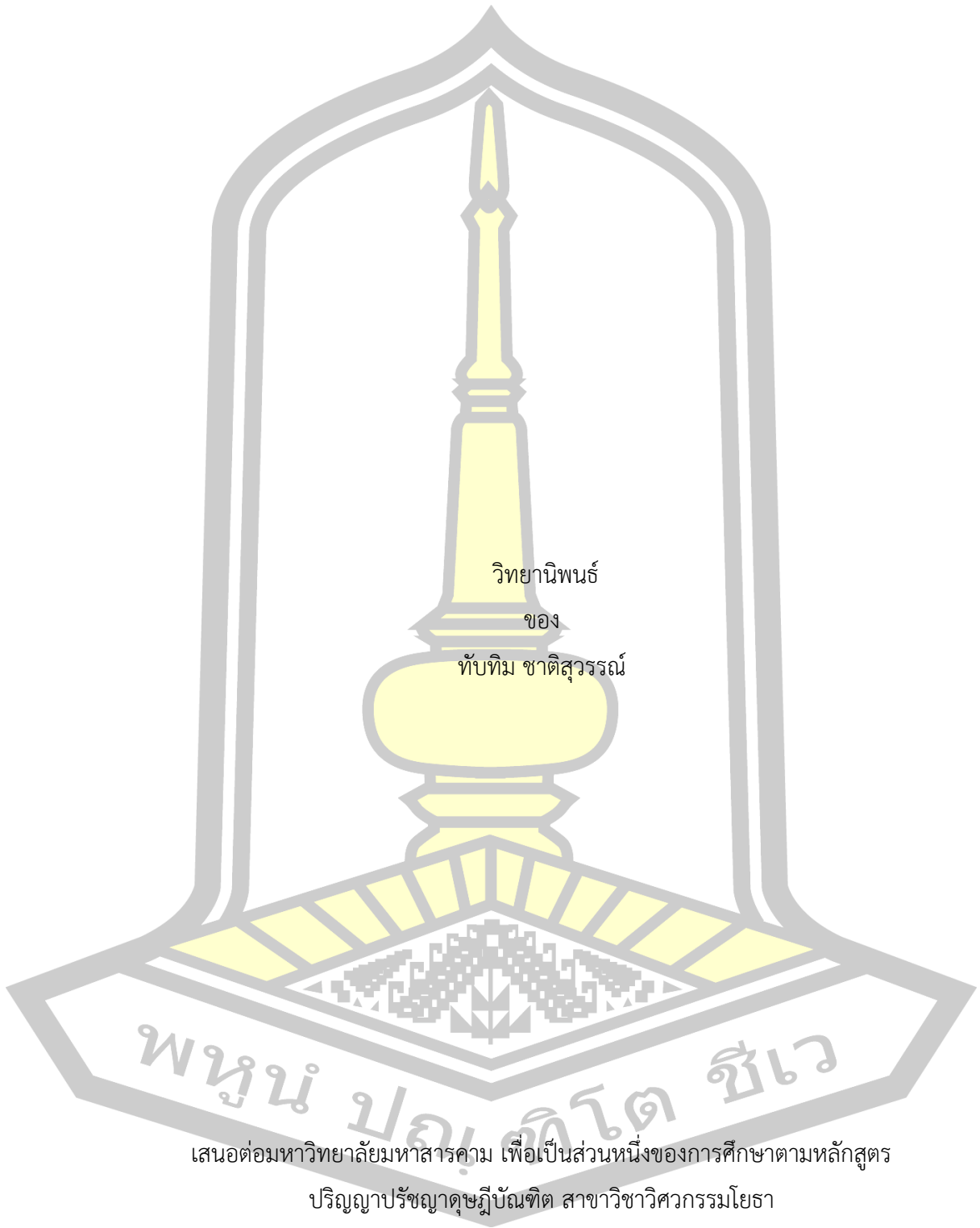
ผลของการปรับสภาพผ้าต่อการปลดปล่อยและการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ทับทิม ชาติสุวรรณ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
พฤษภาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลของการปรับสภาพผ้าต่อการปลดปล่อยและการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์



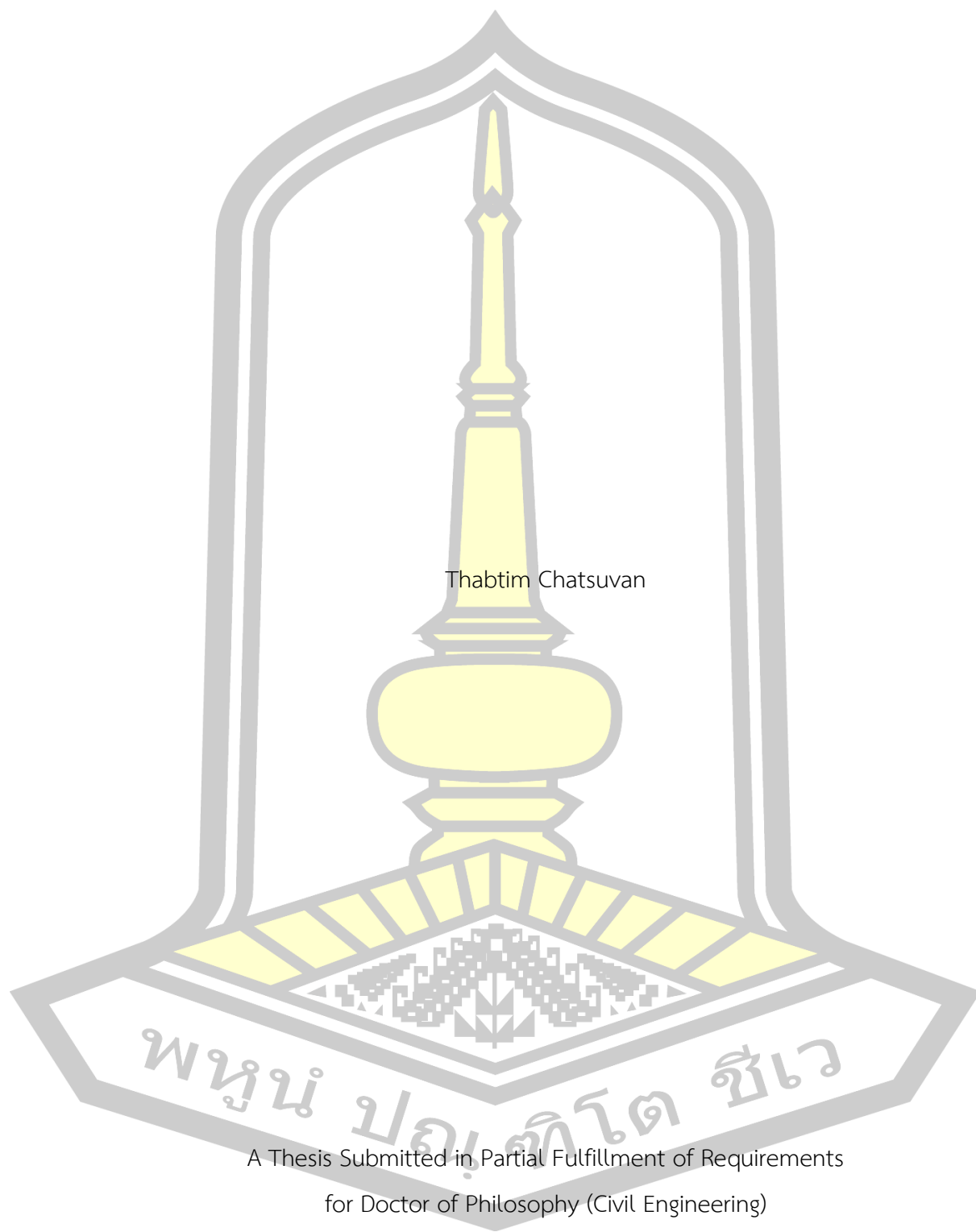
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Effect of fabric conditioning on emission and sorption of gaseous organic pollutants



Thabtim Chatsuvan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Doctor of Philosophy (Civil Engineering)

May 2020

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวทับทิม ชาติสุวรรณ  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สหลาภ หอมวุฒิวงศ์ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ )

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล )

กรรมการ

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

มหาวิทยาลัยอุนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

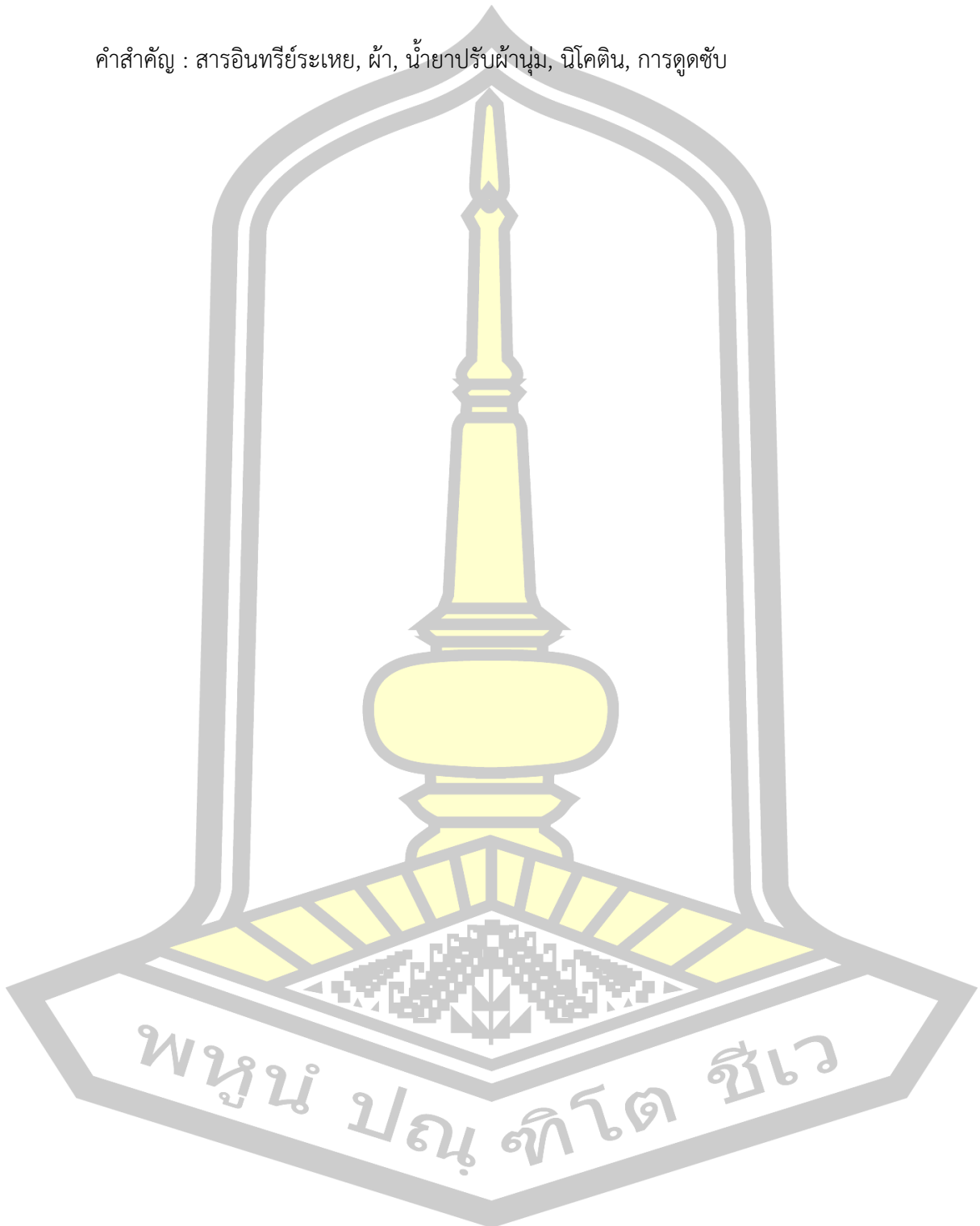
ชื่อเรื่อง	ผลของการปรับสภาพผ้าต่อการปลดปล่อยและการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์		
ผู้วิจัย	ทับทิม ชาติสุวรรณ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์ รองศาสตราจารย์ ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณี		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2563

### บทคัดย่อ

การปรับสภาพผ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยและปรากฏการณ์การดูดซับ การซักเสื้อผ้าด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มในชีวิตประจำวันมีผลทำให้สมบัติพื้นผิวผ้าเปลี่ยนไปจากเดิม งานวิจัยนี้แบ่งหัวข้อศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อ และมีผลการศึกษาดังนี้ 1) การประเมินวิธีการตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าด้วยเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอ็กชแทรกชัน-แก๊สโครมาโทกราฟี (SPME-GC) พบว่า ที่เวลา 3 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับเก็บและคายตัวอย่าง 2) การปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้า 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการย้อม (ดั้งเดิม) ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมธรรมชาติ ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมเคมี ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ที่ผ่านการปรับสภาพ 3 สภาวะ ได้แก่ การซักน้ำกลั่น การซักน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และการซักน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น เทียบกับผ้าสภาพดั้งเดิมจากการทดสอบ พบว่า ผ้าที่ผ่านการซักน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (TVOC) 67-139 มก./ลบ.ม. ซึ่งเป็นสารที่สามารถระบุได้ว่ามาจากน้ำยาปรับผ้านุ่ม ในขณะที่ผ้าที่ไม่ผ่านการซักปล่อยปริมาณสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด 33-85 มก./ลบ.ม. 3) การทดสอบความสามารถของผ้าในการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยการหาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้ถุงเก็บก๊าซขนาด 2 ลิตร ที่ความเข้มข้นก๊าซนิโคติน 24 พีพีเอ็ม ขนาดผ้าที่ทดสอบ 28-144 ตร.ซม. และควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบพบว่า แบบจำลองฟรอนดลิสสามารถอธิบายการดูดซับนิโคติน ที่ความเข้มข้นก๊าซนิโคติน 0.01 พีพีเอ็ม ผ้าไหมดั้งเดิมดูดซับได้มากกว่าผ้าฝ้าย 300 เท่า และมากกว่าผ้าไหมย้อม 3000 เท่า เมื่อผ้าผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น พบว่า ผ้าไหมดั้งเดิมดูดซับนิโคตินลดลง 107 เท่า แต่ผ้าฝ้าย และผ้าไหมย้อมเคมี มีค่าใกล้เคียงเดิม นอกจากนี้ยังพบว่า การย้อมสีเคมีมีผลให้ความจุในการดูดซับลดลง 3000 เท่าเมื่อเทียบกับผ้าไหมไม่ย้อม และ 4) การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของผ้า พบว่า ผ้าที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติมีสมบัติความมีขี้สูงกว่าผ้าที่ผลิตจากเส้นใย

สังเคราะห์ ซึ่งทำให้ผ้าจากเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินมากกว่า

คำสำคัญ : สารอินทรีย์ระเหย, ผ้า, น้ำยาปรับผ้านุ่ม, นิโคติน, การดูดซับ



<b>TITLE</b>	Effect of fabric conditioning on emission and sorption of gaseous organic pollutants		
<b>AUTHOR</b>	Thabtim Chatsuvan		
<b>ADVISORS</b>	Associate Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D. Associate Professor Maneerat Ongwandee , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Doctor of Philosophy	<b>MAJOR</b>	Civil Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2020

### ABSTRACT

Conditioning fabric is a contributor to emission of volatile organic compounds (VOCs) and sorption phenomenon. Washing clothes with fabric softener in daily life results in changing surface properties of the fabric. This research was divided into 4 main subjects and their results are as follows. Firstly, a detection method for sampling and analyzing VOCs emitted from fabrics was developed using a solid phase microextraction technique coupled with a gas chromatography (SPME-GC). The optimum sample collection and desorption time was found to be 3 min. Secondly, VOC emissions from five different fabrics were tested, including originally undyed silk, naturally dyed silk, chemically dyed silk, cotton, polyester, T/C and rayon fabrics. They were conditioned with three methods: washing with deionized water, washing with fabric softener, and washing with concentrated fabric softener. Results show that the fabrics washed with the concentrated softener released total VOCs (TVOC) of 67-139, which some emitted VOCs were identified originally from the fabric softener. Meanwhile, the unwashed fabrics emitted TVOC of 33-85. Thirdly, a fabric ability to sorb gaseous nicotine was performed with a sorption isotherm using 2-liter gas bags containing 24-ppm gaseous nicotine. The tested fabric size varied from 28 to 144. The isotherm test was controlled at 25 degree Celsius. Results show that the Frueundlich model was able to describe the fabric-nicotine sorption. At an

nicotine concentration of 0.01 ppm, the undyed and unwashed silk sorbed nicotine 300 times greater than the unwashed cotton and 3000 times greater than chemically dyed and unwashed silk. After washing with the concentrated softener, the nicotine sorption capacity for the undyed silk reduced by 107 times comparing with the unwashed condition, while the sorption capacity for the cotton and chemically dyed silk was unchanged. Lastly, an examination of the fabric surfaces for their physical and chemical properties revealed that the natural fiber fabrics have higher surface polarity than the synthetic fiber fabrics, resulting in the greater sorption capacity for nicotine.

Keyword : volatile organic compounds; fabric; fabric softener; nicotine; sorption



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จด้วยดี ด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.มณีรัตน์ องค์วรรณดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหลาภ หอมวุฒิวังค์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะ อ่ำไพลวงศ์ ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือ สนับสนุน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการจัดทำวิจัย และวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิดา ชัยมูล ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ต่างๆ รวมทั้งสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท และตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนช่วยเหลือ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ขอขอบคุณครอบครัวชาติสุวรรณ และมงคลพิศ ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตา แต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ทัฬหีมิ ชาติสุวรรณ

พหุณฺ ปณฺ ทิโต ชีเว

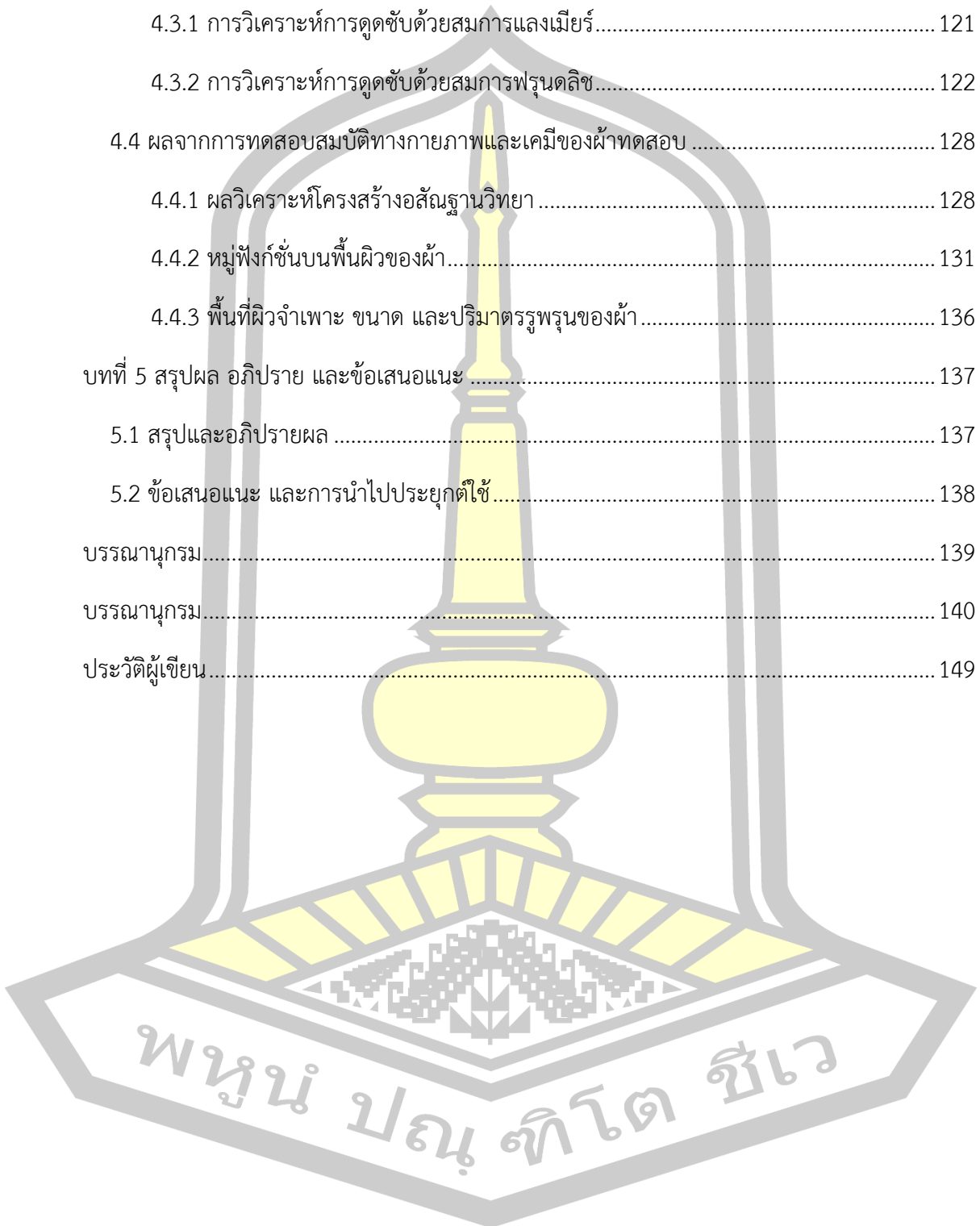
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 มลพิษอากาศภายในอาคาร (indoor air pollutants).....	6
2.1.1 สารมลพิษ และแหล่งกำเนิดสารมลพิษ.....	7
2.2 สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs).....	10
2.3 การเคลื่อนที่ (transport) ของสารมลพิษอินทรีย์ระเหย.....	12
2.4 การดูดซับมลพิษ (sorption of pollutants).....	14
2.4.1 การดูดซับทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	15
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหย.....	17
2.4.3 ประเภทของแรงการดูดซับ.....	19
2.4.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherms).....	21

2.5 การดูดซับสารมลพิษอินทรีย์บนวัสดุอากาศ และสิ่งทอ .....	23
2.5.1 ประเภทวัสดุอากาศ .....	23
2.5.2 สิ่งทอ (Textiles) และเส้นใย (Fibres).....	26
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถผ้าในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหย .....	27
2.5.4 วิธีทดสอบสิ่งทอ .....	29
2.6 การทำสกปรกบนพื้นผิววัสดุภายในอาคาร .....	30
2.6.1 การทำสกปรกด้วยการให้สัมผัสกับอากาศ .....	31
2.6.2 การทำสกปรกด้วยการให้สัมผัสสารมลพิษควันบุหรี่ และสารมลพิษ.....	31
2.6.3 การทำสกปรกด้วยผลิตภัณฑ์ซักผ้า .....	31
2.7 เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอ็กแทรกชัน (solid phase micro extraction, SPME).....	34
2.7.1 องค์ประกอบของอุปกรณ์ SPME .....	34
2.7.2 ชนิดไฟเบอร์ .....	35
2.7.3 การเก็บตัวอย่างสารมลพิษในอากาศ.....	37
2.7.4 ปัจจัยที่อาจมีผลต่อการดูดซับด้วยเทคนิค SPME.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	75
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	76
3.2 การประเมินสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บ และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วย เทคนิค SPME และ GC-MS .....	78
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ทดสอบ.....	79
3.2.2 การเตรียมวัสดุทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ .....	79
3.3 การตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากผ้า.....	81
3.3.1 ผ้าทดสอบ การเตรียมผ้าทดสอบ และน้ำยาปรับผ้านุ่ม .....	82
3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง .....	87
3.3.3 การสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐานและการปรับเทียบ .....	88

3.4 การทดสอบผลของความสกปรกต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับนิโคติน .....	89
3.4.1 สารเคมี วัสดุทดสอบ การเตรียมวัสดุทดสอบ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	89
3.4.2 แผนการดำเนินการทดลอง .....	92
3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	93
3.4.4 การสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐานและการเปรียบเทียบ .....	94
3.5 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การดูดซับ .....	95
3.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของพื้นผิวของผ้า .....	96
3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยา (morphology) .....	96
3.6.2 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area, SSA) .....	96
3.6.3 วิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชัน (functional groups) .....	97
3.7 การประกันคุณภาพการวิจัย .....	97
3.7.1 การเลือกขนาดผ้าทดสอบ .....	97
3.7.2 การทดสอบการรั่วของขวดเก็บตัวอย่าง (sampling leak) .....	97
3.7.3 การทดสอบรูปแบบการแขวนผ้าทดสอบภายในขวดเก็บตัวอย่าง .....	99
3.7.4 การทดสอบหาระยะเวลาการดูดซับ .....	100
3.8 สรุปรายละเอียดการดำเนินการวิจัย .....	101
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการอภิปราย .....	104
4.1 ผลการประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS .....	104
4.2 ชนิด และปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ .....	108
4.2.1 ชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ .....	108
4.2.2 ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (TVOC) ที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบ .....	114
4.2.3 ชนิด และปริมาณของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม .....	119

4.3 ความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน.....	121
4.3.1 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์.....	121
4.3.2 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการฟรุนดลิช.....	122
4.4 ผลจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของผ้าทดสอบ .....	128
4.4.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างอสังฐานวิทยา .....	128
4.4.2 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผ้า.....	131
4.4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของผ้า.....	136
บทที่ 5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ .....	137
5.1 สรุปและอภิปรายผล .....	137
5.2 ข้อเสนอแนะ และการนำไปประยุกต์ใช้.....	138
บรรณานุกรม.....	139
บรรณานุกรม.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	149



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 การจำแนกประเภทสารอินทรีย์.....	10
ตาราง 2 สารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบภายในอาคาร และแหล่งกำเนิดภายในอาคาร .....	11
ตาราง 3 ประเภทของวัสดุที่นิยมใช้ภายในห้อง/อาคาร .....	24
ตาราง 4 การศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนวัสดุอาคาร .....	25
ตาราง 5 สมบัติเส้นใย .....	27
ตาราง 6 สูตรน้ำยาปรับผ้านุ่มโดยทั่วไป .....	34
ตาราง 7 ชนิดของไฟเบอร์.....	36
ตาราง 8 การเปรียบเทียบวิธีเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ด้วย SPME และ หลอดดูดซับ.....	37
ตาราง 9 การเปรียบเทียบข้อดีของวิธี SPME เทียบกับแบบหลอดดูดซับ .....	38
ตาราง 10 งานวิจัยการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME.....	40
ตาราง 11 สารอินทรีย์และอุปกรณ์สำหรับทดสอบ.....	79
ตาราง 12 สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS และ GC-FID .....	80
ตาราง 13 การปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหยจากผงสีย้อม.....	83
ตาราง 14 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของผ้าทดสอบ .....	84
ตาราง 15 องค์ประกอบของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ทดสอบ.....	86
ตาราง 16 สมบัติทางเคมีของนิโคตินที่ใช้ในการทดสอบ .....	89
ตาราง 17 จำนวนตัวอย่างสำหรับทดสอบหาไอโซโทมการดูดซับ.....	94
ตาราง 18 ค่าสารมาตรฐานสำหรับปรับเทียบนิโคติน.....	95
ตาราง 19 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารโกลูอิน.....	98
ตาราง 20 ตัวแปรในการทดลอง.....	102
ตาราง 21 สภาวะทดสอบสำหรับการวิเคราะห์สารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME .....	106

ตาราง 22 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าไหมไม่ย้อม .....	110
ตาราง 23 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติ .....	110
ตาราง 24 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสีเคมี .....	111
ตาราง 25 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าฝ้าย .....	112
ตาราง 26 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าโพลีเอสเตอร์.....	113
ตาราง 27 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าเรยอน .....	113
ตาราง 28 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าที่/ซี .....	113
ตาราง 29 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารมลพิษอินทรีย์ระเหย .....	115
ตาราง 30 ปริมาณ TVOC ที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบ .....	116
ตาราง 31 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจากสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับนิโคตินด้วยผ้า .....	126
ตาราง 32 ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด พันธะ และกลุ่มฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวผ้า .....	135
ตาราง 33 พื้นผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด .....	136



## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ควันบุหรีกระแสดหลัก และควันบุหรีกระแสรอง และผู้ที่สูบบุหรี.....	8
ภาพประกอบ 2 การรับสัมผัสควันกระแสรอง หรือควันบุหรีมือสอง.....	9
ภาพประกอบ 3 การเคลื่อนที่ของสารมลพิษอินทรีย์ควันบุหรี.....	9
ภาพประกอบ 4 แหล่งกำเนิด และการเปลี่ยนแปลงสารมลพิษในอากาศภายในอาคาร.....	13
ภาพประกอบ 5 กลไกการดูดซับ และการดูดกลืนของสารมลพิษ.....	14
ภาพประกอบ 6 โครงสร้างของสารไดสเทียริลโดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์.....	32
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียม.....	33
ภาพประกอบ 8 การสกัดและการคายของสารมลพิษในอากาศ.....	35
ภาพประกอบ 9 แผนการดำเนินการทดลอง.....	77
ภาพประกอบ 10 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับเก็บและ.....	78
ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการสกัดและวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS.....	80
ภาพประกอบ 12 แผนผังขั้นตอนการตรวจวัดสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากผ้า.....	82
ภาพประกอบ 13 สารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหยจากน้ำยาปรับผ้านุ่มทั้งสูตรธรรมดาและสูตรเข้มข้น... ..	87
ภาพประกอบ 14 ขั้นตอนการตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ.....	88
ภาพประกอบ 15 ถุงเก็บก๊าซตัวอย่างขนาด 2 L.....	90
ภาพประกอบ 16 อุปกรณ์สร้างไอระเหย.....	91
ภาพประกอบ 17 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ.....	91
ภาพประกอบ 18 แผนผังขั้นตอนการทดสอบหาความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน... ..	92
ภาพประกอบ 19 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับนิโคตินบนผ้า.....	94
ภาพประกอบ 20 ขั้นตอนการทดสอบการรั่วของขวดเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME และ GC-FID.....	98
ภาพประกอบ 21 ขั้นตอนการทดสอบรูปแบบการแขวนผ้าทดสอบ.....	99

ภาพประกอบ 22	ขั้นตอนการทดสอบหาระยะเวลาการดูดซับ .....	100
ภาพประกอบ 23	ความเข้มข้นไอระเหยโทลูอินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	101
ภาพประกอบ 24	โครมาโทแกรมของสารโทลูอินที่ (A) ระยะเวลากัก และ (B) ระยะเวลาการคาย .....	105
ภาพประกอบ 25	การเปรียบเทียบค่า TVOC ของผ้าทดสอบ ที่สภาวะทดสอบ 4 สภาวะ (a) ผ้าสภาพ .....	117
ภาพประกอบ 26	แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลง TVOC ของผ้าทั้ง 7 ชนิด ที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม .....	118
ภาพประกอบ 27	สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบทั้งหมดที่ผ่านการซักด้วยน้ำยา .....	119
ภาพประกอบ 28	สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบทั้งหมดที่ผ่านการซักด้วยน้ำยา .....	120
ภาพประกอบ 29	การทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์ผ้าใหม่ (A) และผ้าฝ้าย (B) .....	122
ภาพประกอบ 30	ลักษณะการดูดซับสารนิโคตินบนผ้าโพลีเอสเตอร์.....	123
ภาพประกอบ 31	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยสมการฟรุนดลิชของผ้าใหม่.....	124
ภาพประกอบ 32	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยสมการฟรุนดลิชของผ้าใหม่ย้อมเคมี .....	124
ภาพประกอบ 33	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยสมการฟรุนดลิชของผ้าฝ้าย.....	125
ภาพประกอบ 34	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผ้า.....	130
ภาพประกอบ 35	แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าใหม่ด้วยเครื่อง FT-IR.....	132
ภาพประกอบ 36	แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าใหม่ย้อมสีเคมี.....	132
ภาพประกอบ 37	แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าฝ้าย.....	133
ภาพประกอบ 38	แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าโพลีเอสเตอร์.....	133
ภาพประกอบ 39	แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าที/ซี.....	134
ภาพประกอบ 40	แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าเรยอน.....	134

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากรูปแบบการดำเนินชีวิตของคนในแต่ละวันโดยส่วนใหญ่พบว่าร้อยละ 80-90 มักอาศัยภายในบริเวณพื้นที่ปิด เช่น อาคาร สำนักงาน โรงเรียน โรงพยาบาล อพาร์ทเมนต์ ห้องพัก บ้าน รวมทั้งในยานพาหนะ มากกว่าบริเวณพื้นที่โล่งแจ้ง [1] [2] ด้วยเหตุนี้อาการป่วยด้วยโรคอาคาร (sick building syndrome, SBS) เช่น อาการคลื่นไส้ อาเจียน เวียนศีรษะ ระบายเคืองต่อดวงตา จมูก และลำคอ อาการเหนื่อยล้า จึงมักเกิดขึ้นบ่อยครั้งกับกลุ่มพนักงานหรือผู้ที่อาศัยภายในอาคารเป็นระยะเวลานาน กลุ่มสารมลพิษที่มักตรวจพบภายในอาคาร โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารอะลิฟาติก (aliphatic) อะโรมาติก (aromatics) แอลคิลเบนซีน (alkyl benzenes) คีโตน (ketones) และ คลอรีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbons)

วัสดุภายในอาคารจัดว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่สำคัญทั้งการปลดปล่อยมลพิษออกจากอากาศในอาคาร (source) และยังเป็นแหล่งรองรับสารมลพิษอากาศอื่นด้วย (sink) การวิจัยที่ผ่านมา กล่าวสรุปชัดเจนว่าระดับสารมลพิษอินทรีย์ที่ตรวจพบในบรรยากาศภายในอาคารมีความสัมพันธ์กับจำนวนหรือพื้นที่การใช้งานของวัสดุอาคารที่ใช้ภายในอาคาร เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์วัสดุอาคารต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์น้ำมันเคลือบเงาที่ใช้สำหรับเคลือบโต๊ะ เก้าอี้ เฟอร์นิเจอร์ต่างๆ ปลดปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) น้ำมันเคลือบเงา น้ำมันขัดเงา ปลดปล่อยสารอะซิโตน (acetone), แอลกอฮอล์ กาวอุดรอยร้าว ปลดปล่อยสารโทลูอีน (toluene) และเบนซีน (benzene) เป็นต้น [3] [4] [5] นอกจากนี้วัสดุอาคารไม่เพียงแต่ปลดปล่อยสารที่มีอยู่เดิมในวัสดุเท่านั้น วัสดุอาคารสามารถเป็นแหล่งสะสม หรือดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ในอากาศได้เช่นเดียวกัน (sorption) พร้อมทั้งสามารถปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์กลับคืนได้ (re-emission) สู่บรรยากาศได้ ปัจจุบันมีการวิจัยหลากหลายที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับหรือดูดซับของสารมลพิษอินทรีย์บนพื้นผิววัสดุอาคาร [6] [7] [8] [9] [10] [11] [10] [12]

วัสดุอาคาร ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มวัสดุที่ไม่ยอมให้โมเลกุลอื่นซึมผ่านได้ (impermeable) เช่น โลหะ แก้ว เซรามิก กระเบื้อง เป็นต้น และกลุ่มที่ยอมให้โมเลกุลอื่นซึมผ่านได้ (permeable) เช่น วัสดุเนื้อแข็ง วัสดุน้ำ/เปตาดิน วัสดุผ้า เป็นต้น วัสดุอาคารที่มักนิยมนำมาใช้

ภายในห้องพักอาศัย/อาคาร โดยคิดเป็นอัตราส่วนของการใช้วัสดุอาคารต่อปริมาตรห้อง พบว่า วัสดุประเภทห่อหุ้มมีพื้นที่การใช้งานมากที่สุด คือ ผนังสี ผนังกระดาน วอลล์เปเปอร์ เพดาน รองลงมา คือ วัสดุประเภทเนื้อแข็ง เช่น เติง แก้ว ไม้ และวัสดุประเภทผ้า เช่น ผ้าม่านผ้าม่าน ใ้หุ้มเก้าอี้ ตุ๊กตา ผ้าม่าน ผ้าม่าน พรม เสื้อผ้า [13] วัสดุประเภทผ้า (ในที่นี้กล่าวถึงเครื่องนุ่งห่ม/แต่งกาย หรือเสื้อผ้า) เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจ เนื่องจาก ร้อยละ 85 ของผิวมนุษย์ถูกปิดด้วยเครื่องนุ่งห่ม [14] เพื่อป้องกันสารมลพิษในอากาศสัมผัสกับผิวหนังของมนุษย์ [15] [16] [17] [18] นอกจากนี้วัสดุผ้าไม่เพียงแต่ปกป้องผิวหนังไม่ให้สัมผัสกับสารมลพิษอินทรีย์ในอากาศเท่านั้น จากการวิจัยของ [19] ชี้ให้เห็นว่าวัสดุผ้าดั้งเดิม หรือผ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งานก็สามารถปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ได้ เช่นเดียวกัน โดยพบว่าสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมานั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มสารไฮโดรคาร์บอน เช่น ออกเทน (octane) โนเนน (nonane) และเตตระเดเคน (tetradecane) กลุ่มอะโรมาติก เช่น โทลูอิน (toluene) ไตรเมทิลเบนซีน (trimethyl benzenes) เป็นต้น นั้นหมายความว่าผู้ที่สวมใส่เสื้อผ้าอาจได้รับการสัมผัสสารมลพิษอินทรีย์ระเหยได้โดยตรง และมีผลทำให้เกิดอาการระคายเคืองผิวของผู้ที่สวมใส่ได้ และในขณะเดียวกันเสื้อผ้าหรือเครื่องนุ่งห่มเองก็สามารถเป็นแหล่งสะสมสารมลพิษได้เป็นอย่างดีเช่นเดียวกัน งานวิจัยของ [19] ตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากการปลดปล่อยจากผ้าชนิดต่างๆ ที่ผ่านการสัมผัสควันบุหรี่ โดยพบว่าผ้าทุกชนิดที่ผ่านการสัมผัสควันบุหรี่จะปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยออกมา 7 ชนิด และผ้าฝ้ายสามารถปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยมากถึง 23 ชนิด เมื่อเทียบกับผ้าชนิดอื่น งานวิจัยของ [20] พบว่าวัสดุผ้าที่ผ่านการสัมผัสอากาศสามารถดูดซับสารมลพิษได้ดีกว่าวัสดุผ้าสะอาด (ไม่ผ่านการสัมผัสอากาศ) อีกทั้งยังมีความสามารถในการแทรกตัวของสารมลพิษเข้าสู่ผิวหนังของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเชิงสุขภาพในระยะยาวต่อผู้ที่สวมใส่เครื่องนุ่งห่ม

ผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ (natural fibres) เช่น ผ้าฝ้าย (cotton) ผ้าขนสัตว์ (wool) ผ้าไหม (silk) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) เป็นองค์ประกอบหลัก และผ้าที่ได้จากเส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (man-made fibres) เช่น ผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารเคมี ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ (polyester) ไนลอน (nylon) และอะคริลิก (acrylic) ซึ่งมีกรดเทอริพทาลิก (terephthalic acid) เป็นองค์ประกอบ และผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์จากเซลลูโลส (man-made cellulose fibres) เช่น ผ้าเรยอน (rayon) อะซีเตด (acetate)

ปัจจัยที่อาจมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ไม่เพียงแต่การปรับสภาพผ้าด้วยวิธีการสัมผัสกับอากาศ การสัมผัสควันบุหรี่ หรือการสัมผัสมลพิษอินทรีย์เท่านั้น การซักล้างทำ

ความสะอาดเครื่องนุ่งห่มในชีวิตประจำวันก็อาจสามารถเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพ และเคมีของวัสดุผ้าได้เช่นกัน เนื่องจากการใช้น้ำยาทำความสะอาดรวมถึงน้ำยาปรับผ้านุ่มซึ่งมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์หลายประเภทที่สามารถติดหรือสะสมบนเนื้อผ้าได้ การปรับสภาพพื้นผิวผ้าทำให้วัสดุเปลี่ยนสมบัติไปจากเดิม ลักษณะพื้นผิวผ้าที่เปลี่ยนแปลงไปอาจมีผลทำให้พฤติกรรมการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาผลจากการปรับสภาพผ้าด้วยการใช้น้ำยาปรับผ้านุ่มต่อความสามารถในการดูดซับนิโคติน โดยหาค่าความสามารถในการดูดซับนิโคตินของผ้าแต่ละชนิด ที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างกัน ณ สภาวะสมดุล (equilibrium capacity adsorption,  $q_e$ ) พร้อมทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของพื้นผิวผ้าด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิว เพื่อใช้ประกอบการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยแรงดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารมลพิษและพื้นผิวผ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยแบ่งวัตถุประสงค์การวิจัยออกเป็น 2 วัตถุประสงค์การวิจัย ได้แก่

### 1.2.1 วัตถุประสงค์หลักของการวิจัย

1.2.1.1 เพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าชนิดต่างๆ ในสภาพดั้งเดิม และสภาพที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม

1.2.1.2 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การดูดซับนิโคตินบนผ้าชนิดต่างๆ ในสภาพดั้งเดิมและสภาพที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม

### 1.2.2 วัตถุประสงค์รองของการวิจัย

1.2.2.1 เพื่อประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน (solid phase micro extraction, SPME) โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์สาร เพื่อใช้ประกอบในการทดลองการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้า และวัดค่าความสามารถในการดูดซับนิโคตินบนผ้าชนิดต่างๆ

1.2.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของพื้นผิวผ้า เพื่อใช้ประกอบการอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้น และปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการดูดซับ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ผู้วิจัยแบ่งขอบเขตของการทดลองเพื่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยและการดูดซับนิโคตินบนผ้าชนิดต่างๆ โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย

#### 1.3.1 ตัวแปรต้น

1.3.1.1 ชนิดของผ้าทดสอบ ได้แก่ ผ้าที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ (natural fibres) ได้แก่ ผ้าไหม (silk) และผ้าฝ้าย (cotton) ผ้าที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์จากสารเคมี (synthetic fibres) ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ (polyester) และผ้าที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์เซลลูโลส (semi-synthetic fibres) ได้แก่ ผ้าทีซี (T/C) และผ้าเรยอน (rayon)

1.3.1.2 ชนิดของน้ำยาปรับผ้านุ่มทดสอบ ได้แก่ น้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น

#### 1.3.2 ตัวแปรตาม

การปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าชนิดต่างๆ ในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณและพารามิเตอร์จากการดูดซับ

#### 1.3.3 ตัวแปรควบคุม

1.3.3.1 พื้นที่ของผ้าชนิดต่างๆ

1.3.3.2 สภาวะแวดล้อมทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ ควบคุมอุณหภูมิที่  $25^{\circ}\text{C}$  และความดันบรรยากาศ  $1\text{ atm}$

1.3.3.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME-GCMS และ SPME-GCFID

#### 1.3.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุผ้า

1.3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยา (morphology): ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopic, SEM)

1.3.4.2 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area, SSA): ด้วยเทคนิคของบรูเนอร์-เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller, BET)

1.3.4.3 การวิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชัน (functional groups): ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานซฟอร์มอินฟราเรด (fourier transform infrared spectroscope, FT-IR)

## 1.4 สมมติฐานของการวิจัย

ผู้วิจัยตั้งข้อสมมติฐานตามหลักทางทฤษฎีของการดูดซับที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งประกอบด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) และแรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) หรือแรงกระทำกรด-เบสลิวิส (Lewis acid-base interactions) ซึ่งแรงกระทำนี้อาจมีผลต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินบนผ้าชนิดต่างๆ นอกจากนี้ถ้าผ้ามีลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนไปจากพื้นผิวเดิม อาจมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนิโคตินกับพื้นผิวผ้า และส่งผลต่อค่าการดูดซับ,  $q_e$  เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน

ข้อสมมติฐานโดยการพิจารณาพื้นผิวดำดั้งเดิมเป็นหลัก

1.4.1. พื้นผิวดำดั้งเดิมของผ้าทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน จะมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินต่างกัน เนื่องจากผ้าทั้ง 5 ชนิด มีสมบัติต่างกัน (ดัง ตาราง 17 ของบทที่ 3) แรงการดูดซับที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงกระทำกรด-เบสลิวิส ระหว่างพื้นผิวผ้ากับโมเลกุลนิโคตินย่อมมีค่าไม่เท่ากัน นั่นหมายความว่าค่าความสามารถในการดูดซับของผ้าแต่ละชนิดต้องมีค่าไม่เท่ากัน

ข้อสมมติฐานโดยการพิจารณาพื้นผิวผ้าสภาพที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม

1.4.2 พื้นผิวทั้ง 5 ชนิด ที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มเมื่อเทียบกับผ้าที่ซักด้วยน้ำกลั่นจะมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินต่างกัน เนื่องจากสารในน้ำยาปรับผ้านุ่มสะสมหรือติดพื้นผิวผ้า ซึ่งอาจเป็นการเพิ่ม หรือลดแรงกระทำกรด-เบสลิวิส ที่พื้นผิวผ้า ดังนั้นปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวผ้าแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน และมีผลให้ค่าความสามารถการดูดซับไม่เท่ากัน

พหุ ประถมศึกษา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วย

- 2.1 มลพิษอากาศภายในอาคาร
- 2.2 สารอินทรีย์ระเหย
- 2.3 การเคลื่อนที่ของสารมลพิษ
- 2.4 การดูดซับสารมลพิษ
- 2.5 การดูดซับสารมลพิษอินทรีย์บนวัสดุอาคาร และสิ่งทอ
- 2.6 การทำสกปรกบนพื้นผิววัสดุภายในอาคาร
- 2.7 เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน

#### 2.1 มลพิษอากาศภายในอาคาร (indoor air pollutants)

“มลพิษอากาศภายในอาคาร” ถูกจัดอยู่ใน 5 อันดับแรกของความเสียหายทางสุขภาพของมนุษย์ โดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, US EPA) [21] จากการยืนยันรูปแบบการดำเนินชีวิตของคนในแต่ละวันโดยส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 80-90 มักอาศัยภายในบริเวณพื้นที่ปิด เช่น อาคาร สำนักงาน โรงเรียน โรงพยาบาล อพาร์ทเมนท์ ห้องพัก บ้าน เป็นต้น มากกว่าบริเวณพื้นที่โล่งแจ้ง [1] [2] โดยเวลาเฉลี่ยที่อาศัยภายในบริเวณพื้นที่ปิดร้อยละ 87 ในยานพาหนะระหว่างการเดินทางร้อยละ 7 และในพื้นที่โล่งแจ้งร้อยละ 6 [22] คุณภาพอากาศภายในอาคาร มีบทบาทสำคัญไม่เพียงแต่ต่อความสบายของผู้ที่อาศัยเท่านั้น แต่ยังสามารถกระทบต่อสุขภาพอนามัยด้วย ด้วยเหตุนี้อาการป่วยด้วยโรคอาคาร (sick building syndrome, SBS) เช่น อาการคลื่นไส้ อาเจียน เวียนศีรษะ ระคายเคืองต่อดวงตา จมูก และลำคอ เหนื่อยล้า เป็นต้น จึงมักเกิดขึ้นบ่อยครั้งกับกลุ่มพนักงาน หรือผู้ที่อาศัยภายในอาคารเป็นระยะเวลาอันยาวนาน กลุ่มอาการป่วยด้วยโรคอาคารมีความสัมพันธ์กับสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบภายในอาคารอย่างชัดเจน แม้ว่า

สารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดโดยหน่วยงานด้านชีวอนามัยก็ ตาม [23] [24]

### 2.1.1 สารมลพิษ และแหล่งกำเนิดสารมลพิษ

สารมลพิษอากาศในอาคาร แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ 1) สารมลพิษอากาศอนินทรีย์ (inorganic air pollutants) 2) สารมลพิษอากาศอินทรีย์ (organic air pollutants) หรืออนุภาค (ที่ไม่ใช่อนุภาคทางชีวภาพ) 3) สารมลพิษทางชีวภาพ (biogenic particles) 4) ควันบุหรือจาก สิ่งแวดล้อม (environmental tobacco smoke, ETS)

2.1.1.1 สารมลพิษอากาศอนินทรีย์ (inorganic air pollutants) ได้แก่ อนุภาคขนาดเล็ก (particulate matter) ก๊าซโอโซน (ozone) หรือสารอื่น ๆ ที่อาจจะถูกดึงเข้าสู่อาคารจากภายนอก และอาจมาจากกิจกรรมที่เกิดขึ้นในอาคาร เช่น การก่อสร้าง การพิมพ์งาน การถ่ายเอกสาร การใช้งานเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น

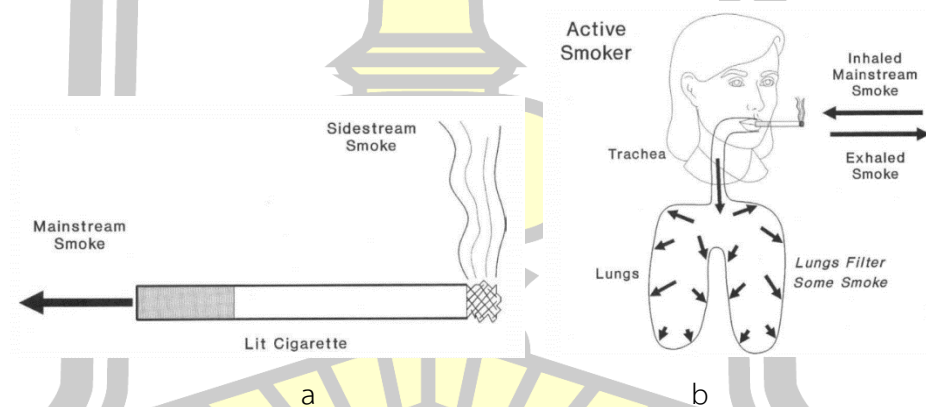
2.1.1.2 สารมลพิษอากาศอินทรีย์ (organic air pollutants) หรืออนุภาค (ที่ไม่ใช่อนุภาค ทางชีวภาพ) ได้แก่ สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) หรือไอระเหยต่าง ๆ ที่ปล่อยจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอาคาร เช่น อุปกรณ์สำนักงาน เฟอร์นิเจอร์ วัสดุปูพื้น สารฆ่าแมลง สาร ทำความสะอาด หรืออุบัติเหตุสารเคมีหกรั่วไหล และสารมลพิษที่เกิดการกิจกรรมของมนุษย์ภายใน อาคาร เป็นต้น

2.1.1.3 สารมลพิษอากาศทางชีวภาพ (biogenic particles) ได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อรา ไรฝุ่น สะเก็ดผิวหนังของสัตว์ ละอองเกสร เป็นต้น

2.1.1.4 ควันบุหรือจากสิ่งแวดล้อม (environmental tobacco smoke, ETS) ควันบุหรือ จากสิ่งแวดล้อม หมายถึง ควันบุหรือที่มีอยู่ในอาคาร/บ้าน หรือนอกอาคาร/บ้าน เป็นควันบุหรือที่อยู่ใน อากาศภายในพื้นที่ต่างๆ อาคาร ที่พักอาศัย และควันบุหรือมือ โดยการเกิดควันบุหรือแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ควันบุหรือกระแสหลัก (mainstream smoke) และควันบุหรือกระแสรอง (sidestream smoke) หรือควันบุหรือมือสอง (second-hand smoke) แสดงดังภาพประกอบ 1 (a)

ควันบุหรือกระแสหลัก คือ เมื่อผู้สูบบุหรี่จุดไฟเพื่อสูบบุหรี่ที่ปลายมวนบุหรี่ กระแสของควัน บุหรี่ไหลผ่านตัวกรองเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของผู้สูบบุหรี่ จากนั้นควันบุหรือถูกพ่นออกจากจุ่มก กระแสควันบุหรือนี้ เรียกว่ากระแสควันบุหรือหลัก แสดงดังภาพประกอบ 1 (b) ส่วนกระแสควันบุหรือรอง คือ ควันบุหรือที่เกิดจากการรอสูดบุหรี่ในครั้งต่อไป ควันบุหรือกระแสรองที่เกิดขึ้นถูกปล่อยออกสู่อากาศโดยรอบโดยไม่

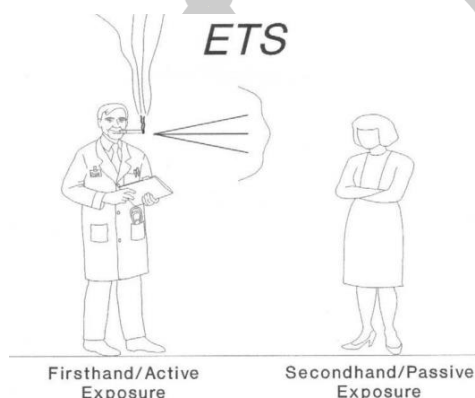
ผ่านตัวกรอง ซึ่งโดยปกติจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษอินทรีย์จากการเผาไหม้ที่สูงกว่าควันหลัก [25] สารมลพิษอินทรีย์ที่ตรวจพบจากควันบุหรี่ ประกอบไปด้วย สารในกลุ่มแอลดีไฮด์ (aldehydes) เช่น แอซีทาลดีไฮด์ (acetaldehyde), ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde), กลุ่มคีโตน (ketones) เช่น อะซีโตน (acetone), กลุ่มสารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (nitrogen compounds) เช่น อะซีโตไนไตรล์ (acetonitrile), กลุ่มอะโรมาติก (aromatic hydrocarbons) เช่น เบนซีน (benzene), โทลูอีน (toluene), ไซลีน (xylenes), กลุ่ม แอลคีน (alkenes) เช่น ลิโมนีน (limonene), เทอร์ปีน (terpenes), สารในกลุ่มที่มีเฮเทอโรไซคลิกเป็นองค์ประกอบ (heterocyclics compound) เช่น ไพริดีน (pyridine) และสารในกลุ่มเอมีน (amine) เช่น นิโคติน (nicotine) สารนิโคตินเป็น 1 ใน 3 ของสารที่ปล่อยสู่บรรยากาศในปริมาณมากเมื่อเทียบกับสารมลพิษอินทรีย์ชนิดอื่น นิโคตินจัดเป็นสารในกลุ่มเอมีน (amine) เป็นสารกึ่งระเหย เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายจะมีผลต่อระบบประสาท หัวใจ และเลือด



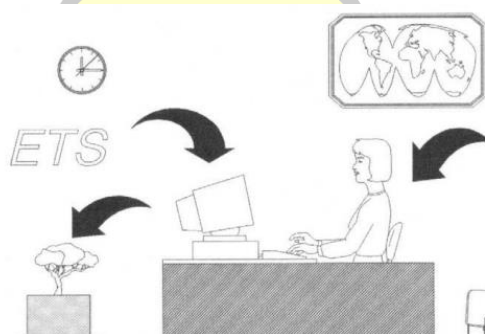
ภาพประกอบ 1 ควันบุหรี่กระแสหลัก และควันบุหรี่กระแสรอง และผู้ที่สูบบุหรี่

ควันบุหรี่ที่มีในอากาศโดยรอบสามารถเคลื่อนที่จากอากาศเข้าสู่ร่างกายของคนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับผู้สูบบุหรี่ แสดงดังภาพประกอบ 2 หรือเคลื่อนที่สู่พื้นผิววัสดุภายในอาคาร และติดที่ผิววัสดุอาคาร นอกจากนี้โอกาสการได้รับสัมผัสสารมลพิษอินทรีย์จากควันบุหรี่เข้าสู่ร่างกายอาจมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการคายตัวสู่บรรยากาศของสารมลพิษอินทรีย์ควันบุหรี่ที่ติดวัสดุอาคาร อย่างไรก็ตามเสื้อผ้า/เครื่องแต่งกายเองก็สามารถเป็นแหล่งดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ควันบุหรี่ได้เป็นอย่างดี

เช่นเดียวกัน การวิจัยของ [26] ตรวจวัดสารนิโคตินที่ดูดติดบนวัสดุพรม ซึ่งเป็นวัสดุภายในอาคาร พบว่า สารนิโคตินที่ดูดติดที่พรมใช้เวลาานกว่า 3 ปี เพื่อคายตัวกลับสู่บรรยากาศ นั้นหมายความว่า ผู้ที่อาศัยอยู่ใกล้บริเวณที่มีการสูบบุหรี่ หรือเคยมีการสูบบุหรี่ เช่น ห้องพักโรงแรม อาคาร บ้านพักอาศัย อาจเสี่ยงต่อการได้รับสารนิโคตินตลอดเวลา



ภาพประกอบ 2 การรับสัมผัสควันกระแสรอง หรือควันบุหรีมือสอง



ภาพประกอบ 3 การเคลื่อนที่ของสารมลพิษอินทรีย์ควันบุหรี

พหุบัน ปณ กิโต ชีเว

## 2.2 สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs)

คือ สารอินทรีย์ที่สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักของสาร ได้แก่ อะตอมของธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจน และอาจมีองค์ประกอบของธาตุอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน แบ่งออกเป็น 4 ประเภท โดยองค์การอนามัยโลก [27] ที่จำแนกสารอินทรีย์ตามจุดเดือด ดังตาราง 1

ตาราง 1 การจำแนกประเภทสารอินทรีย์

ประเภท	ตัวย่อ	จุดเดือด (°C)	ตัวอย่างสารอินทรีย์
1. สารอินทรีย์ระเหยง่าย (very volatile organic compounds)	VOCs	<50	มีเทน (methane) ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)
2. สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds)	VOCs	50-260	โทลูอีน (toluene) เดกเคน (decane) ฟีนอล (phenol)
3. สารอินทรีย์กึ่งระเหย (semi volatile organic compounds)	SVOCs	260-400	ฟิแนนทริน (phenanthrene) นิโคติน (nicotine)
4. อนุภาคสารอินทรีย์ (particulate organic matter)	POM	>400	เบนโซไพเร็น (benzopyrene)

กลุ่มสารมลพิษที่มักตรวจพบภายในอาคาร โดยส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) ได้แก่ อะโรมาติก (aromatics) แอลคิลเบนซีน (alkyl benzenes) คีโตน (ketones) อะลิฟาติก (aliphatic) และ คลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbons) เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยถูกใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์วัสดุตกแต่งอาคาร เช่น ผนังห้องพอร์ซิเจอร่า พรม สีเคลือบผนัง วัสดุปูพื้น ฝ้าเพดาน วัสดุพอลิเมอร์ วอลล์เปเปอร์ สีทาบ้าน และน้ำยาทำความสะอาด เป็นต้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องพิมพ์ และเครื่องถ่ายเอกสาร เป็นต้น วัสดุก่อสร้างอาคาร เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้อัด ผนังที่ฉาบด้วยปูน สีเคลือบ และน้ำมันเคลือบเงา เป็นต้น [28] รวมถึงการทำกิจกรรมต่างๆ ของผู้ที่อาศัย เช่น การสูบบุหรี่ การ

ทำครัว การใช้สารเคมีทำความสะอาด หรืออุบัติเหตุสารเคมีหกรั่วไหล ซึ่งจัดว่าเป็นแหล่งกำเนิดสารมลพิษสำคัญเช่นเดียวกัน ตาราง 2 แสดงแหล่งกำเนิด และสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบภายในอาคาร

ตาราง 2 สารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบภายในอาคาร และแหล่งกำเนิดภายในอาคาร

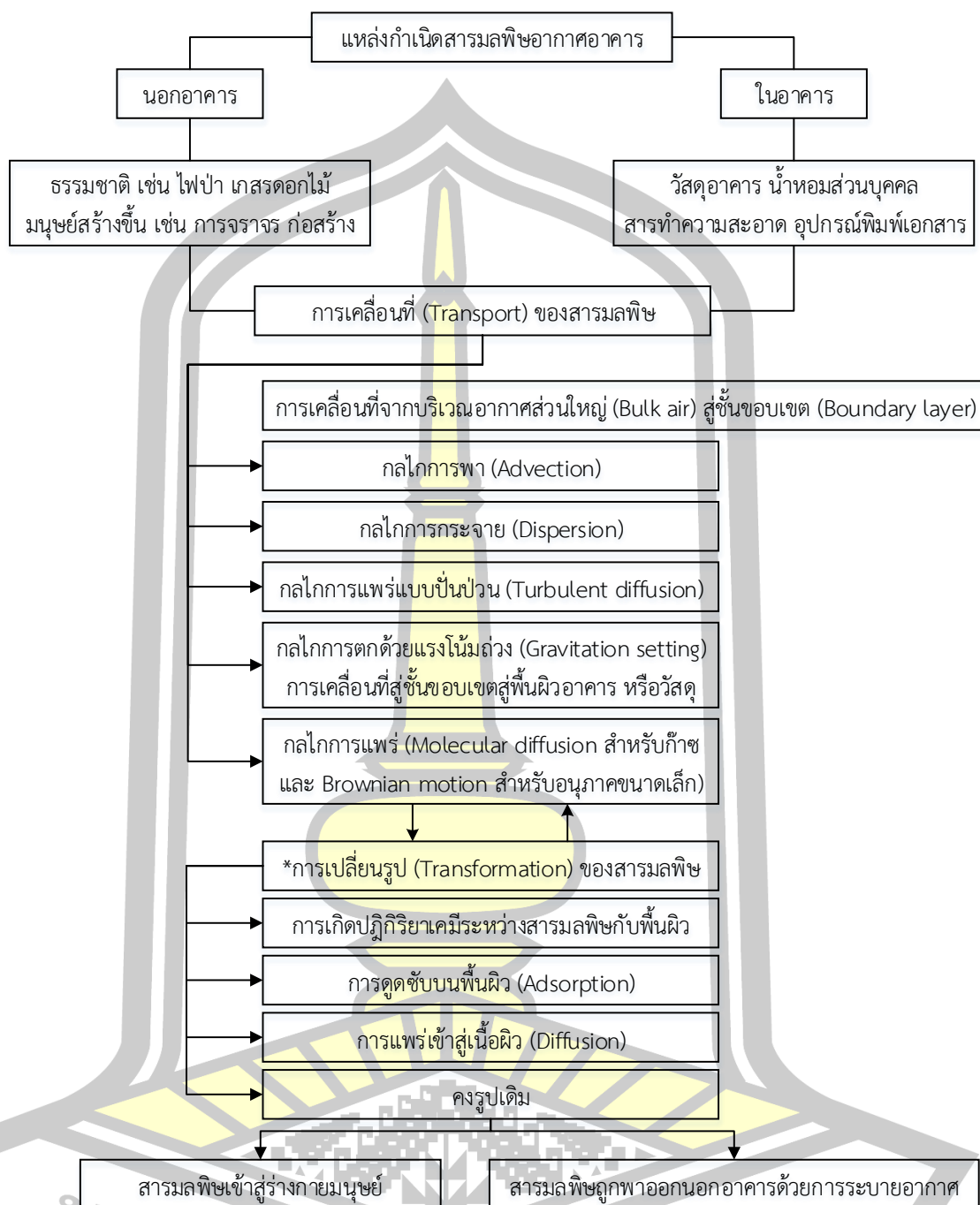
กลุ่มสารอินทรีย์ระเหย	สารอินทรีย์ระเหย	แหล่งกำเนิดภายในอาคาร
แอลกอฮอล์ (alcohols)	เมทานอล (methanol) เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol)	น้ำยาฆ่าเชื้อ, สารกันบูด หรือวัตถุ กันเสีย, เครื่องสำอาง และ ผลิตภัณฑ์ส่วนบุคคล
แอลดีไฮด์ (aldehydes)	ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) อะซีทอลดีไฮด์ (acetaldehyde)	วัสดุตกแต่งอาคาร, วัสดุก่อสร้าง, เครื่องสำอาง, กาวสำหรับติดผ้า
แอลคีน (alkenes)	โพรพิลีน (propylene) เอทิลีน (ethylene)	ผลิตภัณฑ์น้ำมันเคลือบเงา, พลาสติก หรือเรซินสังเคราะห์
อะโรมาติก (aromatic compounds)	เบนซีน (benzene) โทลูอิน (toluene) เอทิลเบนซีน (ethylbenzene)	แลคเกอร์, กาวอุดรอยรั่ว แว็กซ์ถูพื้น, สารย้อมไม้
กลุ่มสารอินทรีย์ระเหยที่มี ธาตุคลอรีนในโมเลกุล (halogenated VOCs)	คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) ไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) เตตราคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene) ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane)	สีลาเท็กซ์, กาว, โพลีเมอร์ สังเคราะห์ ลูกเหม็นดับกลิ่น
คีโตน (ketones)	อะซีโตน (acetone) บิวทิลเอทิลคีโตน (ethyl butyl ketone)	น้ำมันขัดเงา/น้ำมันเคลือบเงา, ทินเนอร์, กาว, ปาติเกิล

ที่มา [3] [4] [5]

### 2.3 การเคลื่อนที่ (transport) ของสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

สารมลพิษอากาศภายในอาคาร (bulk air) อาจสูญหายออกนอกอาคารด้วยการระบายอากาศทางกล (mechanical ventilation) หรือการได้รับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายของผู้ที่อาศัยภายในอาคารด้วยการหายใจ หรือสัมผัสทางผิวหนัง นอกจากนี้สารมลพิษในอากาศอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันหรือมีการเคลื่อนที่ไปติดที่วัสดุอาคารและอาจมีปฏิกิริยาพื้นผิวร่วมด้วย [8] โมเลกุลสารมลพิษที่เคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุอาคาร (sorption) อาจคายตัวกลับสู่อากาศภายในอาคาร (desorption) หรือแพร่ (diffusion) หรือแทรกตัว (permeate) เข้าไปในเนื้อวัสดุอาคาร ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปแบบการได้รับสัมผัสสารมลพิษอากาศ (exposure) ของผู้อาศัยภายในอาคารได้ ภาพประกอบ 4 แสดงแหล่งกำเนิด และการเปลี่ยนแปลงของสารมลพิษอาคาร [29]





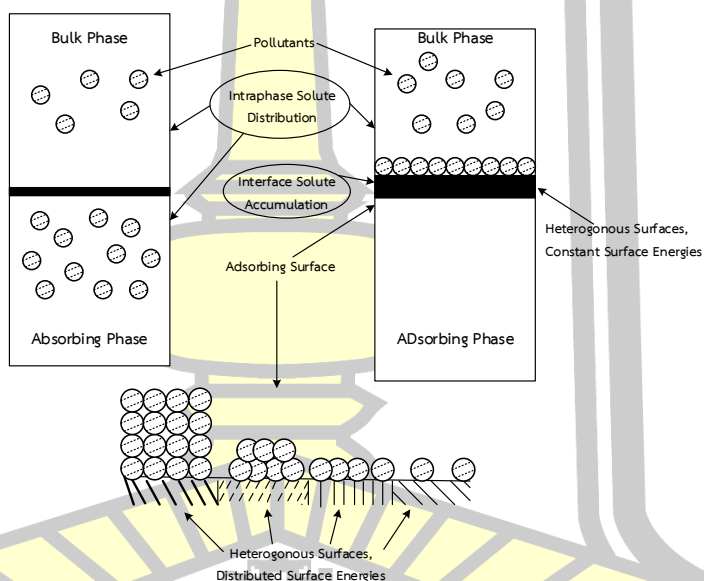
\*การเปลี่ยนรูปของสารมลพิษสามารถเกิดขึ้นพร้อมกับการเคลื่อนที่ [29]

ภาพประกอบ 4 แหล่งกำเนิด และการเปลี่ยนแปลงสารมลพิษในอากาศภายในอาคาร

## 2.4 การดูดซับมลพิษ (sorption of pollutants)

การเคลื่อนที่ (transport) และการเปลี่ยนแปลงรูป (transformation) ของสารมลพิษอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในอาคารนั้น มีผลต่อรูปแบบการแบ่งส่วนของสารมลพิษในอากาศ และพื้นผิววัสดุ ซึ่งมีผลต่อรูปแบบการได้รับสัมผัสสารมลพิษของผู้อยู่อาศัย ภาพประกอบ 5 แสดงกลไกการดูดซับ (sorption) ของสารมลพิษที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลไก หลักๆ คือ

- 1) การดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารมลพิษจากเฟสก๊าซ (bulk air) ดูดซับบนพื้นผิววัสดุ หรือพื้นผิวที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มน้ำ/สิ่งสกปรก
- 2) การดูดกลืน (absorption) เป็นการดูดกลืน หรือการละลายของโมเลกุลสารมลพิษบนพื้นผิววัสดุเนื้อวัสดุ หรือถูกกลืนด้วยชั้นฟิล์มน้ำ/สิ่งสกปรก



ภาพประกอบ 5 กลไกการดูดซับ และการดูดกลืนของสารมลพิษ

ในที่นี้จะเจาะจงเฉพาะการดูดซับของสารมลพิษ (adsorption) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่สารมลพิษอากาศอยู่ในอาคารก่อนถูกพาออกนอกอาคารด้วยการระบายอากาศ [30]

#### 2.4.1. การดูดซับทางเทอร์โมไดนามิกส์

การกระจายตัวของโมเลกุลสารมลพิษ ( $i$ ) ระหว่างเฟสก๊าซกับเฟสพื้นผิวมักอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างโมเลกุลสารมลพิษที่ผิววัสดุต่อโมเลกุลสารมลพิษที่อยู่ในอากาศ ณ สภาวะสมดุล (equilibrium partitioning coefficient,  $K_{part,surface/gas}$ ) ซึ่งค่า  $K_{part,surface/gas}$  จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่เกิดขึ้นจากการดูดซับโมเลกุลสารมลพิษที่พื้นผิววัสดุ (adsorption Energy,  $\Delta G_{ads}^\circ$ ) [31] สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$K_{part,surface/gas} = \frac{\text{concentration of } i \text{ at surface (ug} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}}{\text{concentration of } i \text{ at gas phase (ug} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}} = e^{-\Delta G_{ads}^\circ / RT} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\Delta G_{ads}^\circ$  = พลังงานที่เกิดจากการดูดซับ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$R$  = ค่าคงที่ก๊าซ ( $\text{kJK}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

โดย  $\Delta G_{ads}^\circ$  มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน,  $K_{part,surface/gas}$  จากสมการ 2.2

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln [2.99 \times 10^8 (m^{-1})K] \quad (2.2)$$

โดยที่  $R$  = ค่าคงที่ก๊าซ ( $\text{kJK}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$2.99 \times 10^8$  = ค่าคงที่การดูดซับ [32]

โดยทั่วไปกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นที่ผิววัสดุ มักอธิบายแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำที่ผิวหน้าวัสดุ ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยใช้ค่าความดันไอ (vapor pressure,  $p_L$ ) ของสารนั้นเป็นตัวแทนของแรงแวนเดอร์วาลส์ การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน และความดันไอ แสดงดังสมการ 2.3 [33] [7]

$$\ln K_{part,surface/gas} = m \ln p_L + const \quad (2.3)$$

โดยที่  $m$  = ค่าความชัน

$const$  = ค่าคงที่

จากสมการ 2.3 สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน,  $K_{part,surface/gas}$  ได้ดีในกรณีของสารมลพิษมีสมบัติไม่มีขั้ว (apolar) เท่านั้น เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากการดูดซับระหว่างโมเลกุลสารมลพิษกับพื้นผิววัสดุที่กระทำต่อกันมีเพียงแต่แรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น แต่ยังมีแรงกระทำที่เกิดจากแรงกรด-เบส ตามนิยามของตามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ที่สามารถกระทำระหว่างกันได้ ในกรณีของสารมลพิษที่มีขั้วเดียว (monopolar) หรือสองขั้ว (bipolar) จากการวิจัยของ [34] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่ง,  $K_{part,Oliveoil/air}$  ระหว่างสารไดเมทิลอะนิลีน (N,N-dimethylaniline) และสารเฮกซะนอล (hexanol) ต่างกันถึง 100 เท่า ในขณะที่สารทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่า  $p_L$  ใกล้เคียงกัน ดังนั้นต่อมา [34] จึงได้จำแนกประเภทสารมลพิษ โดยพิจารณาความสามารถสมบัติการมีขั้ว (polar) ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ด้วย โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

1) สารในกลุ่มไม่มีขั้ว (apolar) เป็นสารมลพิษที่ไม่มีแรงกระทำกรด-เบสตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อพื้นผิววัสดุผ่านเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น

2) สารในกลุ่มมีขั้วเดียว (monopolar) มีสมบัติเป็นเบส (base) หรือหมายถึงเป็นสารมลพิษที่มีแรงกระทำเบส (base H-accepter หรือ e-donor) ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อพื้นผิววัสดุไม่เพียงแต่ผ่านเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น ยังมีแรงกระทำเบสด้วยถ้าพื้นผิวที่ดูดซับมีสมบัติเป็นกรด

3) สารในกลุ่มขั้วเดียว (monopolar) มีสมบัติเป็นกรด (acid) หรือหมายถึงเป็นสารมลพิษที่มีแรงกระทำกรด (acid H-donor หรือ e-accepter) ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อพื้นผิววัสดุไม่เพียงแต่ผ่านเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น ยังมีแรงกระทำกรดด้วยถ้าพื้นผิวที่ดูดซับมีสมบัติเป็นเบส

4) สารในกลุ่มสองขั้ว (bipolar) เป็นสารมลพิษที่มีแรงกระทำทั้งกรดและเบส ตามนิยามของลิวอิส (e-accepter and e-donor) ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อพื้นผิววัสดุผ่านทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงกระทำทั้งกรดและเบสถ้าพื้นผิวที่ดูดซับมีสมบัติเป็นทั้งกรดและเบส

จะเห็นได้ว่าความสามารถของสมบัติการมีขั้วของสารมลพิษมีความน่าสนใจ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสารมลพิษกับพื้นผิวมีความเฉพาะเจาะจงยิ่งขึ้น

#### 2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

ปัจจัยที่อิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับมลพิษประกอบด้วยปัจจัยหลายอย่าง ทั้งลักษณะทางกายภาพ และเคมีของสารมลพิษและผิววัสดุ ความหยาบ ความมีรูพรุน มีผลต่อความจุในการดูดซับสารมลพิษ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ มีผลต่อการสร้างชั้นฟิล์มน้ำบนผิววัสดุ สิ่งสกปรกบนผิววัสดุ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ และเคมีของผิววัสดุเดิม การมีอยู่ของก๊าซอื่นในบรรยากาศ ซึ่งสามารถแย่งพื้นที่ดูดซับผิว กับสารมลพิษ งานวิจัย [35] แสดงให้เห็นว่าก๊าซแอมโมเนียสามารถแย่งพื้นที่การดูดซับบนผิวเซอร์โคเนียมซิลิเกตกับสารถูกดูดซับ เช่น ไตรเมธิลอะมีน ซึ่งเป็นสารประเภทเอมีนเช่นเดียวกับนิโคติน งานวิจัยของ [9] ได้ศึกษาค่าความจุของการดูดซับนิโคตินบนแผ่นวัสดุภายในอาคาร ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม พรม และผ้าปูที่นอน ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0, 50 และ 90 และมีการผสมก๊าซแอมโมเนียร่วมด้วย พบว่าค่าความจุในการดูดซับนิโคตินเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความชื้นในอากาศจากร้อยละ 0 เป็น 90 พบว่าค่าความจุของเหล็กกล้าไร้สนิมในการดูดซับนิโคตินเพิ่มขึ้นร้อยละ 122, ผ้าปูที่นอนร้อยละ 46 และพรมร้อยละ 53 และเมื่อมีการใช้ก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 20 และ 40 พีพีเอ็มร่วมด้วย พบว่าค่าความจุในการดูดซับนิโคตินของพรมลดลงร้อยละ 15-35 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแย่งพื้นที่ดูดซับผิวระหว่างโมเลกุลนิโคติน และแอมโมเนีย และงานวิจัยของ [10] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุอาคารต่อการดูดซับอินทรีย์ พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์มีค่าอยู่ในช่วง  $10^0$ - $10^4$  ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 50 และ 90 พบว่า โทลูอีนมีค่าการดูดซับลดลง 14 เท่า เดกเคนลดลง 40 เท่า ในขณะที่นิโคตินมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 และจากการศึกษาผลของความสกปรกที่ผิววัสดุอาคาร อันเกิดจากการสัมผัสอากาศภายในอาคารที่มีลักษณะต่างกัน พบว่าแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานที่ปิดทึบ มีอัตราการระคายอากาศค่อนข้างต่ำมีค่าการดูดซับโทลูอีนลดลงร้อยละ 64 เมื่อเทียบกับการดูดซับของแผ่นวัสดุสะอาด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ระดับความเข้มข้นสารมลพิษในอากาศ เป็นต้น ที่สามารถเพิ่มหรือลดความจุของวัสดุอาคารในการดูดซับสารมลพิษ

การอธิบายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยง่ายมักจะอธิบายด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่า  $p_L$  ของสารมลพิษ กับค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน,  $K_{part,surface/gas}$  แต่ทว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความจุในการดูดซับสารมลพิษที่ผิววัสดุ ลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสารมลพิษกับพื้นผิววัสดุ และแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสาร

มลพิษที่พื้นผิววัสดุ ดังนั้น [31] จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นผิววัสดุ โดยพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ ( $\Delta G_{ads}^\circ$ ) เป็นผลรวมที่ได้จากแรงวนเตอร์วาลส์ที่กระทำที่พื้นผิววัสดุ ( $\Delta G^{vdW}$ ) และแรงกระทำที่เกิดจากกรด-เบส ( $\Delta G^{AB}$ ) ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ซึ่งลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน (adhesion) ดังสมการ 2.4 [36]

$$\Delta G_{ads}^\circ = \Delta G^{vdW} + \Delta G^{AB} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\Delta G_{ads}^\circ$  คือพลังงานที่เกิดจากการดูดซับ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )  
 $\Delta G^{vdW}$  คือพลังงานการดูดซับที่เกิดจากแรงวนเตอร์วาลส์  
 $\Delta G^{AB}$  คือพลังงานการดูดซับที่เกิดจากแรงกระทำกรด-เบส ตามนิยามของลิวอิส

จากสมการ 2.1 และ 2.4 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน,  $K_{part,surface/gas}$  ของโมเลกุลสารมลพิษ (i) ดังสมการ 2.5 [31]

$$K_{part,surface/gas} = a(vdW_i)(vdW_{surface}) + b(ED_i)(EA_{surface}) + c(EA_i)(ED_{surface}) + d \quad (2.5)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{van der Waal interaction}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{e - donor/ e - acceptor interactions}}$   
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{pollutant} \leftrightarrow \text{surface}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{pollutant} \leftrightarrow \text{surface}}$

จากสมการ 2.4 เทอมแรก คือ ปฏิกริยาการดูดซับอันเนื่องมาจากแรงกระทำวนเตอร์วาลส์โดยค่าตัวเลขเชิงปริมาณของแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลสารมลพิษ ( $vdW_i$ ) สามารถแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารมลพิษอากาศที่กำลังพิจารณา (i) ระหว่างของเหลวสารเฮกซาเดเคน (hexadecane) ต่ออากาศ,  $K_{i,hexadecane/air}$  แทนค่า  $p_L$  ในขณะเดียวกัน  $vdW_{surface}$  คือ แรงกระทำวนเตอร์วาลส์จากพื้นผิววัสดุดูดซับ ส่วนเทอมที่สอง และสาม คือ ปฏิกริยาอันเนื่องมาจากแรงกระทำกรด-เบส ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) ซึ่ง  $ED_i$  และ  $EA_i$  แทนด้วยค่า H-acceptor, e-acceptor และ H-donor, e-acceptor ซึ่งได้จากการวิจัยของ [37] และ  $ED_{surface}$  และ  $EA_{surface}$  ขึ้นอยู่กับค่า e-acceptor และ e-acceptor ของแรงตึงผิว (surface tension) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิววัสดุ [36] ส่วน a, b, c และ d คือ ค่าคงที่ซึ่งได้การวิเคราะห์เชิงถดถอย

### 2.4.3. ประเภทของแรงการดูดซับ

2.4.3.1 แรงวันเดอร์วาลส์ (van der Waals force) เป็นแรงดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (nonspecific intermolecular interaction) เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสารใกล้เคียง ซึ่งประกอบด้วยแรง 3 ชนิด คือ

1) แรงลอนดอน (London force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลโคเวเลนต์ที่ไม่มีขั้ว มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำเกิดจากอิเล็คตรอนคู่ร่วมพันธะที่อยู่ระหว่างอะตอมมีการเคลื่อนที่ไปรอบๆ อะตอมทำให้เกิดสภาพขั้วไฟฟ้าอ่อนๆ ขึ้นชั่วขณะ จึงทำให้โมเลกุลของสารดึงดูดเข้าหากันได้ สารที่มีแรงยึดเหนี่ยวประเภทนี้จึงเป็นสารที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำ

2) แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดระหว่างโมเลกุลของโคเวเลนต์ที่มีขั้วเกิดจากขั้วบวกของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดระหว่างขั้วนี้จะมีความแข็งแรงมากกว่าแรงลอนดอนดังนั้นสารที่มีแรงยึดเหนี่ยวชนิดนี้ จะมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงกว่าสารที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงลอนดอน

3) แรงขั้วคู่-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole) เป็นแรงที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วเหนี่ยวนำให้โมเลกุล หรืออะตอมตัวอื่นมีขั้วด้วย จากนั้นอะตอมหรือโมเลกุลดังกล่าวก็มีแรงกระทำต่อกันเกิดขึ้น ซึ่งแรงนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการมีขั้ว (polarizability) ของโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ จะมีความสามารถในการเกิดมีขั้วสูงกว่าอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก

พลังงานการดูดซับที่ได้จากแรงกระทำวันเดอร์วาลส์คำนวณได้จากสมการ 2.6

$$\Delta G^{vdw} = -2NCA(1 - r_0^2/D^2)\sqrt{0.95}\sqrt{\gamma_1^{vdw}}\sqrt{\gamma_2^{vdw}} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\gamma^{vdw}$  = พลังงานการดูดซับจากแรงกระทำวันเดอร์วาลส์

$N$  = ค่าคงที่อาโวคาโดร

$CA$  = พื้นที่สัมผัสของสารมลพิษ 1 โมล ที่พื้นผิว

$r_0$  = ระยะห่างระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิว

$D$  = ความหนาของหนึ่งโมเลกุลที่ดูดซับ

$\gamma_1$  = พลังงานของสารมลพิษ

$\gamma_2$  = พลังงานที่พื้นผิว

จากสมการ 2.6 เทอมของ  $CA(\gamma_1^{vdW})^{1/2}$  ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารมลพิษ ที่มีสัดส่วนโดยตรงกับค่าลอการิทึมลอของความดันไออิ่มตัว เขียนสมการใหม่จะได้

$$\ln p_L^\circ \propto CA\sqrt{\gamma_1^{vdW}} \quad (2.7)$$

ดังนั้นแทนค่า  $CA(\gamma_1^{vdW})^{1/2}$  ด้วย  $\ln p_L^\circ$  ลงในสมการ 2.6 และ แทนค่า  $N$ ,  $(1-r_0^2/D^2)\sqrt{0.95}$  เป็นค่าคงที่ จะได้สมการใหม่เป็น

$$\Delta G^{vdW} = (b + m_1 \ln p_L^\circ)\sqrt{\gamma_2^{vdW}} \quad (2.8)$$

จากสมการ 2.8 ค่า  $\ln p_L^\circ$  อาจถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายแรงกระทำวันเดอร์วาลส์ของสารมลพิษกับพื้นผิวใดๆ ได้เฉพาะในกรณีของสารมลพิษนั้นมีสมบัติไม่มีขั้ว

2.4.3.2 แรงกระทำกรด-เบส ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions) เป็นแรงดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific intermolecular interactions) เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสารใกล้เคียงด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) กล่าวคือ กรด หรือสารที่รับคู่อิเล็กตรอน (Electron acceptor,  $e$ -acceptor) ส่วนเบส คือ สารที่ให้คู่อิเล็กตรอน (Electron donor,  $e$ -donor) สมการสำหรับหาพลังงานจากแรงกระทำกรด-เบส แสดงดังสมการ 2.9

$$\Delta G^{AB} = -2NCA'(\sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} + \sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+}) \quad (2.9)$$

โดยที่  $\gamma_1^+$  และ  $\gamma_1^-$  เป็นตัวแทนของสมบัติการให้ และรับอิเล็กตรอนของสารมลพิษ ต่อมาการวิจัยของ [37] เปลี่ยนพารามิเตอร์  $\gamma_1^+$  และ  $\gamma_1^-$  เป็น  $\alpha$  แทน  $e$ -acceptor และ  $\beta$  แทน  $e$ -donor แทนความสัมพันธ์ของ  $CA'\sqrt{\gamma_1^+}$  และ  $CA'\sqrt{\gamma_1^-}$  และแทนค่า  $N$  เป็นค่าคงที่ จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\Delta G^{AB} = m_2\beta\sqrt{\gamma_2^+} + m_3\alpha\sqrt{\gamma_2^-} \quad (2.10)$$

โดยที่  $m_2$  และ  $m_3$  คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงทดลอง

2.4.3.3 แรงกระทำที่เกิดขึ้นทั้งแรงวันเดอร์วาลส์ (van der Waals force) และแรงกระทำกรด-เบส (lewis acid-base interactions) หาได้จาก 2.11 โดยการแทนค่าสมการ  $\Delta G^{vdW}$  ที่ได้จากสมการ 2.8 และ  $\Delta G^{AB}$  จากสมการ 2.10 ลงในสมการ 2.4

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = (b + m_1 \ln p_L^{\circ}) \sqrt{\gamma^{vdW}} + m_2 \beta \sqrt{\gamma_2^+} + m_3 \alpha \sqrt{\gamma_2^-} \quad (2.11)$$

#### 2.4.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherms)

##### 2.4.4.1 ไอโซเทอมแลงเมียร์ (Langmuir isotherms)

แลงเมียร์ (Langmuir) สมมติให้การดูดซับนี้ เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุ สารดูดซับและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกัน นอกจากนี้พลังงานการดูดซับสม่ำเสมอ พื้นผิวสารดูดซับเป็นเนื้อเดียวกัน แบบจำลองนี้พิจารณาว่าอัตราการดูดซับ (adsorption rate) แปรผันพื้นที่ผิวที่ยังไม่มีการดูดซับ  $(1 - \theta)$  และความเข้มข้นของก๊าซสารดูดซับ ( $C_e$ ) ส่วนอัตราการคาย (desorption rate) ขึ้นกับพื้นที่ผิวที่มีการดูดซับแล้ว ( $\theta$ ) และพลังงานการกระตุ้น (activation energy,  $E$ ) เมื่อการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลอัตราการดูดซับจะเท่ากับอัตราการคายดังแสดงในสมการ

$$k_a C_e (1 - \theta) = k_d \theta \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2.12)$$

โดยที่  $k_a$  และ  $k_d$  คือค่าอัตราการดูดซับและค่าคงที่ของการคาย ตามลำดับ จากนั้นจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\theta = \frac{b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.13)$$

โดยที่  $b = \frac{k_a}{k_d} \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$  และสัดส่วนของพื้นที่ผิวที่มีการดูดซับแล้ว ( $\theta$ ) ในสมการ (2.13) สามารถเขียนแทนที่ด้วยอัตราส่วนระหว่างจำนวนของก๊าซที่ถูกดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิวดูดซับ ( $q_e$ ) และค่าความจุสูงสุดที่สามารถดูดซับได้ ( $Q_a^{\circ}$ ) ดังแสดงในสมการ 2.14

$$q_e = \frac{Q_a b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.14)$$

กรณีที่ก๊าซหรือสารถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำจะสามารถสมมุติได้ว่า พื้นที่ผิวที่มีการดูดซับแล้วมีค่าต่ำกว่าพื้นที่ผิวที่ยังไม่มีการดูดซับและจำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิว ( $M_e$ ) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $\theta$  ดังสมการ (2.12) สามารถทำให้เป็นสมการอย่างง่าย ณ อุณหภูมิคงที่ ดังสมการ 2.15

$$k_a C_e = k_d M_e \quad (2.15)$$

โดยที่ สัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน ณ สภาวะสมดุล ( $k_e$ ) สามารถหาได้จากสมการ 2.16

$$k_e = \frac{k_a}{k_d} = \frac{M_e}{C_e} \quad (2.16)$$

#### 2.4.4.2 ไอโซเทอมบีอีที (BET isotherms)

ไอโซเทอมบีอีทีถูกพัฒนาโดย สตีเฟน บรุนเนอร์ (Stephen Brunauer) พอล ฮิวจ์ เอ็มเมตต์ (Paul Hugh Emmett) และเอดเวิร์ด เทลเลอร์ (Edward Teller) ซึ่งขยายจากแบบจำลองของแลงมัวร์ โดยกำหนดให้การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้นโมเลกุล และสมมุติให้ชั้นแรกของการดูดซับเป็นเหมือนกับการดูดซับชั้นเดียวของแบบจำลองแลงมัวร์ ส่วนชั้นถัดไปมีปฏิกิริยาแบบการควบแน่นเป็นของเหลว (condensation or liquid -faction reaction) สมการบีอีที หาได้จากสมการ 2.17

$$q_e = \frac{Q_a b C_e}{(C_s - C_e) \left[ 1 + (b-1) \left( \frac{C_e}{C_s} \right) \right]} \quad (2.17)$$

โดยที่  $C_s$  คือความดันไออิ่มตัว และ  $b \approx \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right)$

$E_1$  คือพลังงานการดูดซับชั้นเดียว

$E_L$  คือพลังงานที่ทำให้เป็นของเหลว

### 2.4.4.3 ไอโซเทอมฟรอนด์ลิช (freundlich isotherm)

ฟรอนด์ลิช (freundlich) พบว่าการดูดซับที่ได้จากการทดลอง (empirical model) ดังสมการ 2.18

$$q_e = K_f C_e^n \quad (2.18)$$

โดยที่  $K_f$  คือสัมประสิทธิ์การดูดซับ (adsorption coefficient) ณ ความเข้มข้นของสารดูดซับค่าหนึ่งๆ ในขณะที่ค่า  $n$  แสดงถึงค่ายกกำลัง และการกระจายของพลังงานซึ่งมีความเกี่ยวข้องสำหรับปฏิกิริยาการดูดซับโดยเฉพาะ

## 2.5 การดูดซับสารมลพิษอินทรีย์บนวัสดุอาคาร และสิ่งทอ

จากการศึกษารูปแบบการดำเนินชีวิตของคนในแต่ละวันโดยส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 80-90 มักอาศัยภายในอาคาร วัสดุอาคารจึงมีบทบาทสำคัญต่อรูปแบบการได้รับสัมผัสสารมลพิษของผู้ที่อาศัยภายในอาคาร เนื่องจากวัสดุอาคารเป็นแหล่งรองรับสารมลพิษอากาศ (sink) ในขณะเดียวกันก็สามารถปล่อยสารอินทรีย์ระเหยที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศในอาคาร (source) ได้

### 2.5.1 ประเภทวัสดุอาคาร

สามารถแบ่งหมวดหมู่หลัก และหมวดหมู่ย่อย เพื่อใช้อธิบายวัสดุในห้อง/อาคาร ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มวัสดุที่ไม่ยอมให้โมเลกุลอื่นซึมผ่านได้ (impermeable) และกลุ่มที่ยอมให้โมเลกุลอื่นซึมผ่านได้ (permeable) แสดงดังตาราง 3

พหุบัน ปณ จิต โตะ ชีเว

ตาราง 3 ประเภทของวัสดุที่นิยมใช้ภายในห้อง/อาคาร

ซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable)	ซึมผ่านได้ (Permeable)			
	วัสดุเนื้อแข็ง	วัสดุผนัง/เพดาน	วัสดุผ้า	อื่นๆ
โลหะ	ลามิเนตสำเร็จรูป	ปูนเคลือบสี	ผ้า	เครื่องจักสาน
แก้ว	ไม้ที่ไม่ผ่านการแปรรูป	ผนังเคลือบสี	พรม	กระดาศ
เซรามิก	วัสดุไม้เคลือบด้วยสี	วอลล์เปเปอร์	หมอนอิง	
เครื่องลายคราม	พลาสติก	ผนัง	เบาะหุ้ม	
กระเบื้อง	ไม้			

ที่มา [13]

จากการศึกษาอัตราส่วนของการใช้วัสดุต่อปริมาตรห้องพักอาศัย ของ [13] พบว่าวัสดุที่มีพื้นที่การใช้สูงสุด คือ วัสดุประเภทห่อหุ้ม เช่น ผนังสี ผนังกระดาน วอลล์เปเปอร์ เพดาน รองลงมา คือ วัสดุประเภทเนื้อแข็ง เช่น เติง แก้ว ตู้ครัว และวัสดุประเภทผ้า เช่น ผ้าม่าน ใ้หุ้มเก้าอี้ ตุ๊กตา ผ้าขนหนู ผ้าม่าน พรม เสื้อผ้า วัสดุประเภทผ้า (ในที่นี้กล่าวถึงเครื่องนุ่งห่ม/แต่งกาย หรือ เสื้อผ้า) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากร้อยละ 85 ของผิวมนุษย์จะถูกปิดด้วยเครื่องนุ่งห่ม [14] เพื่อป้องกันสารมลพิษในอากาศสัมผัสกับผิวหนังมนุษย์ [38] [16] [17] [18] แต่ทว่าวัสดุผ้าไม่เพียงแต่ป้องกันการรับสัมผัสสารมลพิษเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามวัสดุผ้าสามารถเป็นแหล่งสะสมสารมลพิษได้เช่นเดียวกัน นั้นหมายความว่าโอกาสของการรับสัมผัสสารมลพิษอาจมีเพิ่มขึ้นจากการแทรกตัวของโมเลกุลสารมลพิษที่ผิวเข้าสู่ชั้นผิวหนังมนุษย์ [20] ตาราง 4 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนวัสดุอาคาร

พหุบัน ปณุ สกิตโต ชีเว

ตาราง 4 การศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยบนวัสดุอาคาร

ห้องทดสอบ	สภาวะทดสอบ	วัสดุทดสอบ	สารอินทรีย์	$^a k_e$	$^b K_{part}$	$^c K_{part}$	อ้างอิง
50 m <sup>3</sup>	RH 42-59 % Temp 21 °C ACH 0.01 h <sup>-1</sup>	*Aged Wallboard	สาร DMMP	-	-	10	[6]
		** Hard Surface	สาร DEEP	-	-	14	
		Furnishings	สาร TEP	-	-	15	
50 m <sup>3</sup>	RH 58-63 % Temp 21 °C ACH 0.16-6 h <sup>-1</sup>	พรม, ผ้า, พนักทาสี	สารในกลุ่มแอลเคน (n-alkane)	-	2-18	-	[7]
		ไม้, พลาสติก และ กระดาษ	และกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic)	-	3.1-31	-	
10 L	RH 50 % Temp 24 ± 3 °C ACH 3.2 h <sup>-1</sup>	พรม	ไตรเมทิลามีน (Trimethylamine)	6.6 ± 0.4	-	-	[8]
		แผ่นพนักทาสี		0.55 ± 0.12	-	-	
10 L	RH 50 % Temp 25 ± 2 °C ACH 1.2 h <sup>-1</sup>	เหล็กกล้าไร้สนิม	นิโคติน (Nicotine)	11.8	-	-	[9]
		พรม		685.7	-	-	
		ผ้าม่าน		93.5	-	-	
25 L	RH 50 % Temp 24.8 ± 0.8 °C ACH 1.2 h <sup>-1</sup>	พอลิโพรพิลีน	Toluene	-	-	3813	[10]
		พอลิไวนิลคลอไรด์		-	-	44	

RH=Relative humidity, Temp=Temperature, ACH= Air changes per hour, \*Aged Wallboard=แผ่นยิปซัมบอร์ดเก่า, \*\* Hard Surface Furnishings =ภายในห้องทดสอบประกอบด้วยวัสดุเนื้อแข็ง

$^a k_e$  =หาได้จากแบบจำลองของ [39]  $^b K_{part}$  =หาได้จากแบบจำลองของ [40] และ  $^c K_{part}$  =หาได้จากแบบจำลองของ [6]

## 2.5.2 สิ่งทอ (Textiles) และเส้นใย (Fibres)

2.5.2.1 เส้นใยธรรมชาติ (natural fibres) แบ่งออกเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช เช่น ฝ้าย (cotton) นุ่น (kapok) ลินิน (linen) ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibres) ร้อยละ 88-96 [41] ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส ประกอบไปด้วยกลูโคสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) เส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติมีขี้ผึ้ง และมีกลุ่มฟังก์ชัน (functional groups) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นได้ [12] และเส้นใยที่ได้จากสัตว์ เช่น ขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ประกอบด้วยเส้นใยโปรตีน (proteins fibres) มีโมเลกุลสารในกลุ่มเอไมด์ (amide) เป็นส่วนประกอบ

2.5.2.2 เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (man-made fibres) ประกอบด้วย เส้นใยอะซิเตด (acetate) และไตรอะซิเตด (triacetate) เส้นใยเรยอน (rayon) โพลีเอสเตอร์ (polyester) ไนลอน (nylon) อะคริลิก (acrylic) เส้นใยโพลีเอสเตอร์นิยมนำมาใช้กันมากที่สุด มีส่วนประกอบของกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) และอะโรมาติก (aromatic group) ซึ่งอาจมีคุณสมบัติมีขี้ผึ้งต่ำกว่าเส้นใยธรรมชาติ [42] ตาราง 5 แสดงสมบัติของเส้นใย



ตาราง 5 สมบัติเส้นใย

เส้นใย (Fibres)	องค์ประกอบหลัก <sup>a</sup>	ความชื้น (Moisture regain, %) <sup>b</sup>
<b>ธรรมชาติ</b>		
พืช		
ฝ้าย	หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl)	8.5
ลินิน	และหมู่เอไมด์ (amide)	12
สัตว์		
ไหม		11
ขนสัตว์		13.6-16
<b>มนุษย์สร้างขึ้น</b>		
ไหมสังเคราะห์	โพลิเมอร์ไวนิลคลอไรด์ ไรต์ (addition polymers of vinyl chloride)	11.6-16
อะซีเตด	โพลิเอสเตอร์ของเซลลูโลส	6.5
ไตรอะซีเตด	(polyester of cellulose)	3.2-3.5
โพลิเอสเตอร์	ไดไฮดริกแอลกอฮอล์ (ester of dihydric alcohols) และเทอริฟทาลิก (terephthalic acid)	0.4

ที่มา <sup>a</sup>[42], <sup>b</sup>[43]

### 2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถผ้าในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์บนวัสดุผ้า ประกอบด้วยสมบัติทางกายภาพ (physical properties) เช่น น้ำหนัก (weight) การทอ (weave) ขนาดรูพรุน (pore size) โครงสร้าง และสมบัติทางเคมี (chemical properties) เช่น การย้อม (dye) การเติมแต่ง (finish) แรงยึดกันระหว่างโมเลกุล (bond) ความหนาแน่น (density) และโครงสร้างผ้า (fabric structure)

งานวิจัยของ [44] ศึกษาการดูดซับสารมลพิษควันบุหรี่ด้วยวัสดุผ้า ประกอบด้วยผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าขนสัตว์ ผ้าฝ้าย และผ้าไหม ผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ ทำการทดสอบภายในห้องทดสอบที่ปิดสนิท ขนาด 19 L ภายในห้องทดสอบประกอบไปด้วยผ้าที่ใช้ทดสอบขนาด 2×10 m<sup>2</sup> แขนวนบนตะแกรง เริ่มการทดลองโดยการจุดบุหรี่ทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้สารควันบุหรี่ติดบนผิววัสดุ จากการศึกษาพบว่าผ้าโพลีเอสเตอร์มีค่าการดูดซับสารควันบุหรี่ได้น้อยกว่าผ้าชนิดอื่น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผ้าโพลีเอสเตอร์กับผ้าลินินซึ่งมีน้ำหนักผ้าก่อนทดสอบใกล้เคียงกัน พบว่าผ้าลินินมีความสามารถในการดูดซับสารควันบุหรี่สูงกว่าผ้าโพลีเอสเตอร์ถึง

งานวิจัยของ [19] ตรวจสอบสารมลพิษที่ปล่อยออกจากผ้าที่ผ่านการดูดซับสารควันบุหรี่ รวมถึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับมลพิษควันบุหรี่ ได้แก่ ผลของโครงสร้างผ้า (fabric structure) ผลของการย้อมสี (dye) และผลของระยะเวลาสัมผัส (contact time) ด้วยเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน (solid-phase micro extraction, SPME) และแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) จากผลการทดลองระบุว่าจำนวนสารเคมีที่ระเหยออกมาจากผ้าที่ผ่านการสัมผัสมลพิษควันบุหรี่แต่ละชนิดอยู่ในช่วง 13-23 สาร ซึ่งผ้าโพลีเอสเตอร์ และผ้าอะซีเตด ปล่อยสารมลพิษออกมาน้อยที่สุดเท่ากับ 13 สาร ส่วนผ้าลินินปล่อยสารมลพิษออกมาสูงที่สุดเท่ากับ 23 สาร เมื่อเทียบกับผ้าชนิดอื่น ผ้าทุกชนิดโดยส่วนใหญ่มีการปล่อยสารเฟอร์ฟูรัล (furfural) ไพริดีน (pyridine) ฟีนอล (phenol) เบนโซไนไตรล์ (benzotrile) ลิโมนีน (D-limonene) แนฟทาลีน (naphthalene) เดกเคน (decanal) กรดเตตราดีคาโนอิก (tetradecanoic acid) และ กรดเฮกซะเดคาโนอิก (n-Hexadecanoic acid) นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างผ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษควันบุหรี่ เนื่องจากรูปแบบการทอของผ้าเป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ส่วนการย้อมสี และการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสสารมลพิษมีผลต่อผ้าฝ้ายและผ้าลินิน แต่ไม่มีผลต่อผ้าโพลีเอสเตอร์ จะเห็นได้ว่าเส้นใยแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษต่างกัน เนื่องจากการผลิตผ้า และการตกแต่งผ้าในกระบวนการสุดท้ายอาจเพิ่มคุณสมบัติในการดูดซับสารมลพิษของผ้าได้ เช่น การทอผ้าเนื้อหลวมหรือการตกแต่งให้ผ้ามีขนฟูอาจดูดซับสารมลพิษได้ดีกว่าผ้าที่ทอแบบแน่น และเนื้อเรียบ

งานวิจัยของ [12] ศึกษาสมบัติของเส้นใยฝ้าย และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างอณูฐานวิทยา (morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopic, SEM) การวิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชัน (functional groups) ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance, NMR) การหาความหนาแน่น (density) ที่สถานะมาตรฐาน การหาความหนา (thickness) ตามวิธีการของ [45] และการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area, SSA) ด้วยเทคนิค Brenauer-Emmett-Teller (BET) พบว่าผ้าฝ้ายซึ่งเป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยพืช ประกอบไปด้วยเซลลูโลส ส่วนผ้าโพลีเอสเตอร์ซึ่งเป็นผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี มีส่วนประกอบของสารกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) และอะโรมาติก (aromatic group) ซึ่งมีสมบัติมีขั้วต่ำกว่าเส้นใยธรรมชาติ

พิจารณาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยาของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยโพลีเอสเตอร์ พบว่าลักษณะเส้นใยภายนอกของผ้าฝ้ายมีการทอแน่น (dens weave) กว่าโพลีเอสเตอร์ ส่วนโครงสร้างภายในเส้นใยฝ้ายมีลักษณะบิดเป็นเกลียว พื้นผิวขรุขระ ในขณะที่เส้นใยโพลีเอสเตอร์มีผิวราบเรียบ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติผ้าโดยพิจารณาความหนาแน่น (density) ความหนา (thickness) และพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่างผ้าฝ้ายกับผ้าโพลีเอสเตอร์ พบว่าผ้าฝ้ายมีค่าความหนาแน่น ความหนา และพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าผ้าโพลีเอสเตอร์ เท่ากับ  $164 \pm 1.3$ ,  $45 \pm 0.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  หนา 0.05, 0.02 cm น้ำหนัก  $310, 510, 12, 720 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ  $0.72, 0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  [12] และจากการผลทดลองการดูดซับสารโพรลิตโบรมิเนตไดฟีนีลอีเทอร์ (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) บนวัสดุผ้าเส้นใยและผ้าโพลีเอสเตอร์ พบว่าผ้าฝ้ายมีค่าการดูดซับสาร PBDEs สูงกว่าผ้าโพลีเอสเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผ้า

#### 2.5.4 วิธีทดสอบสิ่งทอ

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) (thai industrial standard) ได้กำหนดมาตรฐานทดสอบสิ่งทอ ดังนี้

- 1) เลขที่ มอก. 121 เล่ม 2-2552 ความคงทนของสีต่อแสงซินอนอาร์ก
- 2) เลขที่ มอก. 121 เล่ม 3-2552 ความคงทนของสีต่อการซักด้วยสบู่ หรือ สบู่และโซดา
- 3) เลขที่ มอก.121 เล่ม 4-2552 ความคงทนของสีต่อเหงื่อ
- 4) เลขที่ มอก.121 เล่ม 5-2552 ความคงทนของสีต่อการขัดถู
- 5) เลขที่ มอก.121 เล่ม 6-2552 ขนาดเส้นด้าย
- 6) เลขที่ มอก.121 เล่ม 7-2552 เกลียวของเส้นด้าย
- 7) เลขที่ มอก.121 เล่ม 8-2553 แรงดึงและการยืดที่ทำให้เส้นด้ายขาด
- 8) เลขที่ มอก.121 เล่ม 9-2552 แรงดึงสูงสุดและการยืดของผ้าที่แรงดึงสูงสุดโดยวิธีดึงเต็มหน้ากว้างของชิ้นทดสอบ
- 9) เลขที่ มอก.121 เล่ม 10-2553 ความกว้างของผ้า
- 10) เลขที่ มอก.121 เล่ม 11-2553 ความยาวของผ้า
- 11) เลขที่ มอก.121 เล่ม 12-2553 มวลของผ้าต่อหน่วยความยาวและมวลของผ้าต่อหน่วยพื้นที่
- 12) เลขที่ มอก.121 เล่ม 13-2553 จำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวของผ้าทอ

- 13) เลขที่ มอก.121 เล่ม 14-2552 การประเมินการเปลี่ยนสีและการเปื้อนสีโดยใช้เก  
รย์สเกลและเครื่องมือ
- 14) เลขที่ มอก.121 เล่ม 16-2553 แรงดึงสูงสุดของผ้าโดยวิธีแกรบ
- 15) เลขที่ มอก.121 เล่ม 17-2553 แรงฉีกขาดของผ้าทอโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง  
ชนิดอัตรายืดคงที่
- 16) เลขที่ มอก.121 เล่ม 18-2553 แรงฉีกขาดของผ้าทอโดยใช้เครื่องทดสอบแบบเอล  
เมนดอร์ฟ
- 17) เลขที่ มอก.121 เล่ม 19-2553 ความทนแรงดันทะลุและระยะโป่งทะลุของผ้าโดย  
วิธีไฮดรอลิก
- 18) เลขที่ มอก.121 เล่ม 20-2552 การเปลี่ยนแปลงขนาดของผ้าเมื่อแช่น้ำเย็น
- 19) เลขที่ มอก.121 เล่ม 21-2552 การเปลี่ยนแปลงขนาดภายหลังการซักและทำให้  
แห้ง
- 20) เลขที่ มอก.121 เล่ม 22-2552 การต้านการเปียกน้ำของผิวผ้าโดยวิธีพ่นน้ำ
- 21) เลขที่ มอก.121 เล่ม 23-2552 ความต้านน้ำซึมโดยใช้เครื่องทดสอบแบบความดัน  
น้ำสถิต
- 22) เลขที่ มอก.121 เล่ม 24-2553 ความหนาของผ้า
- 23) เลขที่ มอก.121 เล่ม 25-2552 ความคงทนของสีต่อน้ำ
- 24) เลขที่ มอก.121 เล่ม 26-2552 ส่วนผสมของเส้นใย 2 ชนิด
- 25) เลขที่ มอก.121 เล่ม 27-2552 แรงดึงตะเข็บของผ้าและวัสดุสิ่งทอ
- 26) เลขที่ มอก.121 เล่ม 28-2552 ความต้านทานการลื่นของเส้นด้ายในผ้าทอที่ตะเข็บ
- 27) เลขที่ มอก.121 เล่ม 31-2553 การติดไฟของเสื้อผ้า

## 2.6 การทำสกปรกบนพื้นผิววัสดุภายในอาคาร

จากงานวิจัยหลายบทความที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม การดูดซับระหว่างโมเลกุลสารมลพิษ และพื้นผิววัสดุอาคารที่ผ่านการทำสกปรก เพื่อวัดค่าความสามารถของการดูดซับสารมลพิษบนวัสดุ ผ้าที่ผ่านการทำให้สกปรก บนพื้นฐานหลักทางทฤษฎีที่ว่าความสกปรกจะเคลือบ หรือสะสมบนเส้นใย ผ้าซึ่งทำให้วัสดุผ้ามีสมบัติทางกายภาพ และเคมีเปลี่ยนไปจากสมบัติดั้งเดิม การทำสกปรกมีหาก หลายวิธี เช่น

### 2.6.1 การทำสกปรกด้วยการให้สัมผัสกับอากาศ

งานวิจัยของ [10] ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ในอากาศ ด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องทำงาน (officer room) ร้านอาหาร (salon) และห้องครัว (kitchen) เป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน จากนั้นนำมาทดสอบดูดซับสารโพลีอินพบว่า สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับของสารโพลีอินอย่างชัดเจน โดยเฉพาะแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสในห้องทำงานซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน,  $K_{part}$  ลดลง 0.35 เท่า สำหรับแผ่น PP และเพิ่มขึ้น 64 เท่า สำหรับแผ่น PVC งานวิจัยของ [46] ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารพทาเลต (phthalate) บนวัสดุผ้าฝ้ายที่ผ่านการสัมผัสอากาศ 10 วัน

### 2.6.2 การทำสกปรกด้วยการให้สัมผัสสารมลพิษควันบุหรี่ และสารมลพิษ

งานวิจัยของ [44] ศึกษาการดูดซับสารมลพิษควันบุหรี่ด้วยวัสดุผ้า 26 ชนิด แบ่งออกเป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าขนสัตว์ ผ้าฝ้าย และผ้าไหม ผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารเคมี ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ งานวิจัยของ [19] ตรวจวัดสารมลพิษที่ปล่อยออกจากผ้าที่ผ่านการดูดซับสารควันบุหรี่ งานวิจัยของ [12] ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ออกจาก (re-emission) ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ ที่ผ่านการสัมผัส สารที่มีสารประกอบโบรมีน (brominated flame retardants, BFRs) และสารออร์โงะโนฟอสเฟต (organophosphate esters, OPEs) 30 วัน

### 2.6.3 การทำสกปรกด้วยผลิตภัณฑ์ซักผ้า

ผลิตภัณฑ์ซักผ้า ประกอบไปด้วย สารซักฟอก เช่น สบู่ (soap) ผงซักฟอก (synthetic detergent) น้ำยาซักแห้ง (dry cleaning solution) และน้ำยาปรับผ้านุ่ม ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะรายละเอียดของน้ำยาปรับผ้านุ่ม

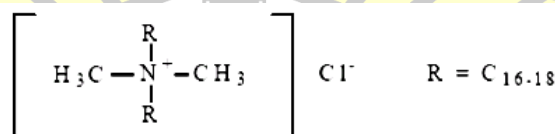
น้ำยาปรับผ้านุ่ม (fabric softener) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการโฆษณาของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ช่วยทำให้ผ้าไม่กระด้าง (antiharshness) ให้ความรู้สึกที่ดีเวลาสัมผัสเสื้อผ้า (fabric hand) ช่วยต้านไฟฟ้าสถิต (anti-static cling) ลดการดูดซับน้ำ/เหงื่อ และช่วยให้อมกิ่นหอม ผลดีต่อ เนื้อผ้า คือช่วยรักษารูปร่างของเสื้อผ้า (dimensional stability) ลดรอยย่น (wrinkle recovery) ช่วยกำจัดคราบ (stain release) ช่วยให้ผ้าแห้งเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ น้ำยาปรับผ้านุ่ม ก่อให้เกิดผลเสียบางอย่าง เช่น อาจทำให้เกิดอาการแพ้ที่ผิวหนัง ผลเสียต่อเนื้อผ้า ได้แก่ ทำให้เกิดเม็ดขน (pilling) ลดความแข็งแรงของผ้า (fabric strength) ลดความขาว (whiteness) เพิ่มความสามารถในการติดไฟ (flammability) เกิดการจับตัวเป็นก้อน (clump) เหนียวๆ ซึ่งทำให้ผาสะอาดน้อยลง

#### 2.6.3.1 หลักการทำงานของน้ำยาปรับผ้านุ่ม (mechanism of fabric softener)

ผงซักฟอกมีสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ (anionic) ช่วยให้ผาสะอาด หลังจากนั้น ประจุจะถูกผลักออกไปโดยประจุลบของผา สารออกฤทธิ์ของน้ำยาปรับผานุ่มเป็นสารประกอบไดส เตียร์ล ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (distearyl dimethyl ammonium chloride) ที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะปรากฏในรูปของถุงน้ำเล็กๆ (vesicle) ที่มีโครงสร้าง 2 ชั้นอยู่ในน้ำ สารออกฤทธิ์ของน้ำยาปรับ ผานุ่มเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (cationic surfactant) เมื่อสารลดแรงตึงผิวนี้อยู่บนผิว หนาของของเหลว แรงตึงผิวก็จะลดลง และแตกตัวเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของไขมันชนิดไฮโดรคาร์บอน (fatty hydrocarbon) ที่มีโมเลกุลเป็นไอออนประจุบวก มีลักษณะเป็นสายโซยาวๆ ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic chains) ซึ่ยื่นออกมา และมีส่วนที่เป็นน้ำมันเหมือนสารหล่อลื่นเป็นส่วนใหญ่ เคลือบเส้นใยของผา และติดกับผา ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) มีประจุลบ เป็นส่วนที่ทำให้ สารประกอบนี้กระจายตัวในน้ำ ผา ส่วนใหญ่มีประจุลบจึงดึงดูดประจุบวกของน้ำยาปรับผานุ่ม และ เกาะติดกันอย่างหนาแน่นบนผา

2.6.3.2 สมบัติส่วนประกอบหลักของน้ำยาปรับผานุ่ม (components of fabric softener)

น้ำยาปรับผานุ่ม ประกอบด้วย สารประกอบไดไฮโดรเจนเตททาโลวไดเมทิลแอมโมเนียม (dihydrogenated tallow dimethyl ammonium compounds) เป็นหนึ่งในสารประกอบของ ซัลเฟตควอเทอริแอมโมเนียม (sulfated quaternary ammonium compounds) และสารไดส เตียร์ลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (distearyl dimethyl ammonium chloride, DSDMAC) เป็น สายโซยาวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ประกอบด้วยหมูสเตียร์ล (stearyl groups) ที่เป็นหมูแสดง สมบัติของสารหล่อลื่น ดังภาพประกอบ 6

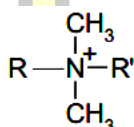


ภาพประกอบ 6 โครงสร้างของสารไดสเตียร์ลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์

2.6.3.3 สูตรน้ำยาปรับผานุ่ม (fabric softener formulations)

สูตรน้ำยาปรับผานุ่มประกอบไปด้วยสารต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) สารออกฤทธิ์ที่ทำให้ผาญม น้ำยาปรับผาญมจะประกอบด้วยสารออกฤทธิ์ประมาณ 3-7% สารออกฤทธิ์ที่ใช้น้ำยาปรับผาญมมีหลายชนิด ที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เช่น สารประกอบควอเทอนารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium compound) แสดงดังภาพประกอบ 7 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกที่ใช้น้ำยาปรับผาญม ไดแก ไดทาโลวไดเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ (ditallow dimethyl ammonium chloride, DTDMAC)



Quaternary ammonium salts

R, R' = C16 - C18

ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของสารประกอบควอเทอนารีแอมโมเนียม

2) ตัวทำอิมัลชัน (emulsifiers) สารออกฤทธิ์ชนิดนี้สามารถใช้ร่วมกับสารอื่นๆ ที่เป็นตัวเสริมสารออกฤทธิ์ และเป็นตัวทำอิมัลชันให้สารออกฤทธิ์ สารที่ช่วยเสริมสารออกฤทธิ์มีหลายชนิด เช่น กรดไขมัน และสารที่ไม่มีประจุ (nonionics) เช่น แอลกอฮอล์เอทอกซิลเอต (alcohol ethoxylate: C<sub>14</sub>-C<sub>15</sub> alcohol-7E0) หรือกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (glycerol mono stearate) สารที่ไม่มีประจุช่วยให้สารออกฤทธิ์กระจายตัวได้ดีขึ้นขณะไหลไปในน้ำล้างสุดท้าย

3) สารฆ่าเชื้อโรคน้ำยาปรับผาญมมีสารออกฤทธิ์ที่มีประจุบวก ซึ่งมีสมบัติในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย (anti-bacterial) ได้ แต่ก็สามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราบางชนิดเช่นกัน การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่สามารถสังเกตเห็นได้จากกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้นหรือจากการแยกชั้น ดังนั้นจึงต้องใส่สารฆ่าเชื้อในน้ำยาปรับผาญม เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยาปรับผาญมเสีย

4) อิเล็กโทรไลต์ (electrolytes) ส่วนผสมของน้ำยาปรับผาญมที่มีลักษณะขุ่นเกินไปสามารถปรับให้เหลวลงได้โดยใช้สารพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) น้ำกระดางหรือเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ แต่ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการแยกชั้นของน้ำยาปรับผาญมได้

5) สารที่ใช้ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำปรับผานุ่มสูงกว่า 4.0-4.5 ให้เติมกรดแผลือจางหรือกรดอินทรีย์จำนวนเล็กน้อย เพื่อปรับให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ตามความต้องการ

6) น้ำ จะถูกเติมลงในส่วนผสมของน้ำยาปรับผานุ่มที่มีความเข้มข้นมาก ๆ ตัวอย่างสูตรน้ำยาปรับผานุ่ม แสดงดังตาราง 6 [47]

ตาราง 6 สูตรน้ำยาปรับผานุ่มโดยทั่วไป

สารเคมีที่ใช้	สูตร A	สูตร B	สูตร C	สูตร D
ระดับความเข้มข้น	(%)	(%)	(%)	(%)
DSDMAC	2-3.5	3-4	4-6	4-6.5
อิมิดาโซลีน (Imidazoline)	4-5.5	0.5-3	-	-
ไดเอทานอลเอไมด์ (Diethanolamide)	-	-	0.5-1	-
กรดสเตียริก (Stearic acid)	-	0.3-0.8	-	1-2
ซิลิโคน (Silicone)	0.1-0.3	0.1-0.3	0.02-0.05	-
กลีเซอรอลเอสเทอร์ (Glycerol ester)	-	0.5-1.5	-	-
พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) ใช้ปรับความชื้น	1-2	-	-	-
น้ำหอม สารกันเสีย สี น้ำ				เติมให้ครบ 100

ที่มา [47]

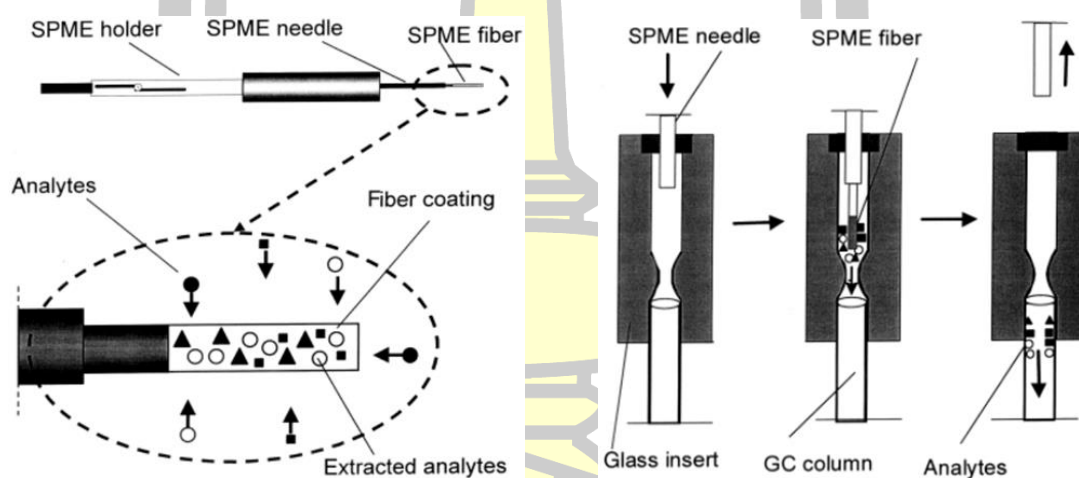
## 2.7 เทคนิคโซลิตเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน (solid phase micro extraction, SPME)

เทคนิค SPME ถูกพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1989 ที่ University of Waterloo (Ontario, Canada) โดย Professor Pawliszyn และคณะ เทคนิค SPME ได้รับความนิยม และถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านสิ่งแวดล้อม นิติวิทยาศาสตร์ เกษษกรรม อาหาร เครื่องดื่ม และสารให้กลิ่น [48] [49]

### 2.7.1 องค์ประกอบของอุปกรณ์ SPME

ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ตัวยึดเกาะ (SPME-holder) และไฟเบอร์ (SPME-fiber) ซึ่งเคลือบด้วยซิลิกา (silica) ยาว 10 mm หนาประมาณ 7-100  $\mu\text{m}$  [50] แสดงดังภาพประกอบ 8 และดังตาราง 7 แสดงชนิดของไฟเบอร์ หลักการเก็บตัวอย่างอากาศด้วยเทคนิค SPME หรือตำแหน่ง

การใช้งานของไฟเบอร์ แบ่งออกเป็น 2 โหมด โหมดแรกเรียกว่าโหมด “สัมผัส” (exposed) ไฟเบอร์ที่ใช้เก็บตัวอย่างจะถูกทำให้ยื่นภายนอกเข็ม (needle) เพื่อสัมผัสกับสารมลพิษในอากาศ แสดงดังภาพประกอบ 8 ส่วนโหมดที่สองเรียกว่าโหมด “ดึงกลับ” (retracted) ไฟเบอร์ที่สัมผัสสารมลพิษถูกดึงกลับเข้าสู่ภายในเข็ม หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเครื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) โดยทันที หรือเก็บตัวอย่างให้มิดชิด จากนั้นนำไปแช่ตู้เย็นเพื่อทำวิเคราะห์ภายหลัง [51] การวิเคราะห์ตัวอย่าง เริ่มจากการแทงเข็มผ่านยางกันรั่ว (septum) ของจุดฉีด (injection port) ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากนั้นสารมลพิษที่ติดบนไฟเบอร์ถูกคายด้วยอุณหภูมิที่จุดฉีด เมื่อครบเวลาคาย ดึงไฟเบอร์กลับเข้าสู่ภายในเข็มเช่นเดิม แสดงดังภาพประกอบ 8 หลังจากขั้นตอนการดูดซับและการคาย ไฟเบอร์ถูกทำความสะอาดด้วยความร้อน และสามารถนำกลับมาใช้งานได้ [51]



ภาพประกอบ 8 การสกัดและการคายของสารมลพิษในอากาศ

## 2.7.2 ชนิดไฟเบอร์

ตาราง 7 แสดงสมบัติของไฟเบอร์และข้อแนะนำสำหรับการตรวจวัด และวิเคราะห์สารมลพิษอินทรีย์ระเหย

ตาราง 7 ชนิดของโพลีเมอร์

ชนิดของโพลีเมอร์	ฟิล์มหนา ( $\mu m$ )	ความมีขั้ว	การเคลือบ	อุณหภูมิสูงสุด ( $^{\circ}C$ )	เทคนิค	สารที่ต้องการวิเคราะห์
Polydimethylsiloxane (PDMS)	100	Non-polar	Non-bonded	280	GC/HPLC	Volatiles
PDMS	30	Non-polar	bonded	280	GC/HPLC	Non-polar semivolatiles
PDMS	7	Non-polar	Bonded	340	GC/HPLC	Medium- to non-polar semivolatiles
PDMS-divinylbenzene (DVB)	65	Bipolar	Cross-linked	270	GC	Polar volatiles
PDMS-DVB	60	Bipolar	Cross-linked	270	HPLC	General purpose
PDMS-DVB	65	Bipolar	Cross-linked	270	GC	Polar volatiles
Polyacrylate (PA)	85	Polar	Cross-linked	320	GC/HPLC	Polar semivolatiles (phenols)
Carboxen-PDMS	75	Bipolar	Cross-linked	320	GC	Gases and volatiles
Carboxen-PDMS	85	Bipolar	Cross-linked	320	GC	Gases and volatiles
Carbowax-DVB	65	Bipolar	Cross-linked	265	GC	Polar analytes (alcohol)
Carbowax-DVB	70	Bipolar	Cross-linked	265	GC	Polar analytes (alcohol)
Carbowax-templated resin		Polar	Cross-linked		HPLC	Surfactants
DVB-PDMS-Carboxen		Bipolar	Cross-linked	270	GC	Odours and flavours

ที่มา [52]

### 2.7.3 การเก็บตัวอย่างสารมลพิษในอากาศ

โดยส่วนใหญ่มักใช้หลอดดูดซับ (sorbent tube) ซึ่งสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย และวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเครื่อง GC ซึ่งวิธีดังกล่าวอาจใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดนาน อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างมีราคาค่อนข้างสูง ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และไม่สามารถเก็บตัวอย่างสารมลพิษในอากาศที่มีปริมาณสารน้อยได้ จากหลายกรณีที่เกิดปัญหาการเก็บตัวอย่างด้วยหลอดดูดซับ [53] [54] จึงใช้เทคนิค SPME มาประยุกต์ใช้ เพื่อเก็บตัวอย่างอากาศ และวิเคราะห์หาปริมาณสารในอากาศ [55] [56] ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SPME ถูกยืนยันว่าเป็นวิธีที่ถูกต้อง (accurate) และแม่นยำ (precise) ด้วยวิธีการเปรียบเทียบผลการทำซ้ำ 5 ครั้งกับวิธีซึ่งใช้หลอดดูดซับ [57] จากผลการทดลองการทำซ้ำ พบว่าวิธี SPME ดีกว่าวิธีใช้หลอดดูดซับ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (relative standard deviation, % RSD) น้อยกว่า แสดงดังตาราง 8 ซึ่ง % RSD มีค่าน้อยหมายความว่าวิธีวิเคราะห์นั้นมีความเที่ยงหรือแม่นยำสูง นอกจากนี้ [51] ยังเปรียบเทียบข้อดีของเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบหลอดดูดซับกับแบบ SPME แสดงดังตาราง 9 เทคนิคของ SPME ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเก็บตัวอย่างของสารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) และสารฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) [53] [54] และการประยุกต์ใช้เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละออง (aerosol particulate matter) เป็นครั้งแรก โดยการวิจัยของ [58] [59]

ตาราง 8 การเปรียบเทียบวิธีเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ด้วย SPME และ หลอดดูดซับ

	เบนซีน		โทลูอิน		เอทิลเบนซีน		ไซลีน	
	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ	SPME หลอดดูดซับ
ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย	62	62	19	18	4.7	5.2	3.8	4.0
ค่าเบี่ยงเบน	1.0	3.1	0.7	1.1	0.2	0.4	0.2	0.7
% RSD	1.6	5.0	3.8	6.3	3.9	7.1	4.8	19

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 9 การเปรียบเทียบข้อดีของวิธี SPME เทียบกับแบบหลอดดูดซับ

ลักษณะเฉพาะ	SPME	หลอดดูดซับ
Sampling pumps	No	Yes
Reusable	Yes	No
Cost per sample	Low	High
Grab air sampling mode	Yes	No
TWA sampling mode	Yes	Yes
TVOC analysis	Yes	Yes
Selective sampling for target analytes	Yes	Yes
High sensitivity	Yes	No <sup>a</sup>
Solvent extraction	No	Yes
Analysis with conventional chromatography	Yes	Yes
Sample and analysis cycle	Short <sup>b</sup>	Long
Automated sampling and analysis	Yes	Yes

<sup>a</sup>ขึ้นอยู่กับวิธีการ, <sup>b</sup>การเก็บตัวอย่างแบบไม่ต่อเนื่อง

อย่างไรก็ดี การเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME อาจมีข้อจำกัด หรือข้อด้อยหลายอย่าง เช่น การเคลื่อนย้ายตัวอย่างมายังห้องปฏิบัติการเพื่อทำวิเคราะห์ [60] การใช้ก๊าซสะอาด (zero air) เพื่อทำกราฟมาตรฐาน (standard curve) การใช้ไฟเบอร์ได้เพียงครั้งเดียวต่อการเก็บตัวอย่างหนึ่งครั้ง นั้นหมายความว่าหากต้องการเก็บตัวอย่างอากาศพร้อมกันหลายซ้ำ อาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อไฟเบอร์เพิ่ม [51] ดังนั้น งานวิจัยของ [61] จึงได้พัฒนาวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME ให้มีความง่ายต่อขั้นตอนการเก็บ และวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยการใช้อากาศ (ambient air) และการใช้ขวดเก็บตัวอย่างอากาศที่มีขนาด 20 และ 250 mL ซึ่งหาได้ง่ายกว่าถังแคนนิสเตอร์ (canister) จากผลการทดลองพบว่าการใช้ขวดเก็บตัวอย่างขนาด 250 mL มีค่าการดูดซับสูงกว่าการใช้ขวดปริมาตร 20 mL ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของมวลสารมลพิษที่เพิ่มขึ้นตามปริมาตรขวดเก็บตัวอย่าง

#### 2.7.4 ปัจจัยที่อาจมีผลต่อการดูดซับด้วยเทคนิค SPME

งานวิจัยของ [61] ชี้ให้เห็นว่าพารามิเตอร์สำคัญซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดตัวอย่างอากาศด้วยเทคนิค SPME ประกอบด้วย คุณสมบัติของไฟเบอร์และสารมลพิษซึ่งไฟเบอร์ชนิด CAR-PDMS มีสมบัติมีขั้ว สามารถดูดซับสารมลพิษได้ดีกว่า ชนิด PDMS ซึ่งมีสมบัติไม่มีขั้ว อย่างไรก็ตามการทดลองนี้อาจมีผลเนื่องจากสมบัติของสารมลพิษร่วมด้วย ความดันไอน้ำ (water vapor pressure) และอุณหภูมิ (temperature) มีอาจมีผลต่อการสกัดตัวอย่าง เนื่องจากอุณหภูมิและความดันไอน้ำมีความสัมพันธ์กันทางทฤษฎี ถ้าอุณหภูมิลดลงในขณะที่ความดันคงที่อยู่ จะมีผลทำให้ความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลไอน้ำกับพื้นผิวไฟเบอร์อาจมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลสารมลพิษ [36] ซึ่งมีผลให้พื้นผิวของไฟเบอร์ถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลไอน้ำ การแย่งพื้นที่การดูดซับ (adsorptive sites) บนพื้นผิวไฟเบอร์ระหว่างตัวทำละลายกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งมีผลให้พื้นที่การดูดซับบนไฟเบอร์ลดลง นอกจากนี้งานวิจัยของ [61] ยังชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของยางกันรั่ว (septum) ที่ควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับฝาปิด เนื่องจากอาจเกิดการรั่วออกของสารมลพิษได้ ตาราง 10 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สารมลพิษด้วยเทคนิค SPME

พหุบัน ปณุ สกิต ชีเว

ตาราง 10 งานวิจัยการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME

งานวิจัย	ชนิดไฟเบอร์	สารที่ต้องการวิเคราะห์	สภาวะ		การวิเคราะห์
			การสกัด	การคาย	
[62]	PDMS-DVB	ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	Ex: 2 min Temp: -	De: 1 min T <sub>d</sub> : 210 °C	GC-FID
[56]	PDMS	โทลูอีน (toluene), คลอโรเบนซีน (chlorobenzene), เตตราคลอโรมีเทน (carbon tetrachloride), ไซลีน (p-Xylene), เดกเคน (n-decane)	Ex: 15 min Temp: -	De: 1 min T <sub>d</sub> : 250 °C	GC-MS
[51]	PDMS-DVB	เอทิลเบนซีน (ethylbenzene), ไซลีน (xylene), โทลูอีน (toluene), เบนซีน (benzene)	Ex: 1 min Temp: -	De: 0.5 min T <sub>d</sub> : 250 °C	GC-FID
[63]	PDMS-CAR	สาร BTEX	Ex: 30 min	De: 2 min Temp: 14-24 °C	GC-FID, GC-MS
[60]	PDMS-CAR	สาร VOCs	Ex: 10 min Temp: RT	De: 10 min T <sub>d</sub> : 300 °C	GC-FID, GC-MS

Ex=Extraction time, De=Desorption time, T=Temperature, T<sub>d</sub>=Temperature desorption, VOCs= Very volatile organic compounds, BTEX=Benzene Toluene Ethylbenzene Xylene

ตาราง 10 งานวิจัยการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME (ต่อ)

งานวิจัย	ชนิดไฟเบอร์	สารที่ต้องการวิเคราะห์	สถานะ		การวิเคราะห์
			การสกัด	การคาย	
[60]	PDMS-CAR	สาร VOC	Ex: 10 min Temp: RT	De: 10 min T <sub>d</sub> : 300 °C	GC-MS
[64]	PDMS-CAR	สาร VOC	Ex: 1-45 min Temp: RT	De: 2.5 min T <sub>d</sub> : 320 °C	GC-MS
[19]	CW/DVB	ควันบุหรี่ (tobacco smoke, ETS)	Ex: 10 min Temp: 37	De: 10 min T <sub>d</sub> : 250 °C	GC-MS
[61]	PDMS-CAR	สาร BTEX	Ex: 5 min Temp: RT	D: 3 min T <sub>d</sub> : 250 °C	GC-FID

RT=Temperature room, VOC=Volatile organic compound, BTX=Benzene, Toluene, Xylene

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งหัวข้อศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อหลัก ประกอบไปด้วย การทดลองที่ 1 การประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS โดยมีตัวแปรที่เลือกศึกษาและมีผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศ จำนวน 2 ตัวแปร คือ ระยะเวลาสกัด (extraction time) และระยะเวลาคาย (desorption time) ของสารมลพิษอินทรีย์ระเหย ผลที่ได้จากการทดลอง 1 นำไปใช้ในการทดลองที่ 2 การตรวจวัดสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากผ้า โดยผ้าทดสอบผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม (conditioning) เพื่อให้สารซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำยาปรับผ้านุ่มเกิดการเคลือบหรือติดสะสมที่พื้นผิวผ้าทดสอบ เพื่อเทียบกับผ้าที่มีสภาพดั้งเดิม (unconditioning) จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) การทดลองที่ 3 การทดสอบผลของความสกปรกต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน ความสกปรก ในที่นี้ กล่าวคือ การซักผ้าทดสอบด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น ทดสอบโดยใช้ถุงเก็บก๊าซขนาด 1.5 จากนั้นนำชุดข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงมาทำนายหาค่าพารามิเตอร์การดูดซับ และ ด้วยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิช โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมทางสถิติ NLREG® version 6.3.0.0 การทดลองที่ 4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวผ้าทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพ และเคมี ที่ควบคุมความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหย รายละเอียดของเนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ประกอบไปด้วย

##### 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

3.2 การประเมินสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บ และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS

3.3 การตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากผ้า

3.4 การทดสอบผลของความสกปรกต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน

3.5 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์การดูดซับ

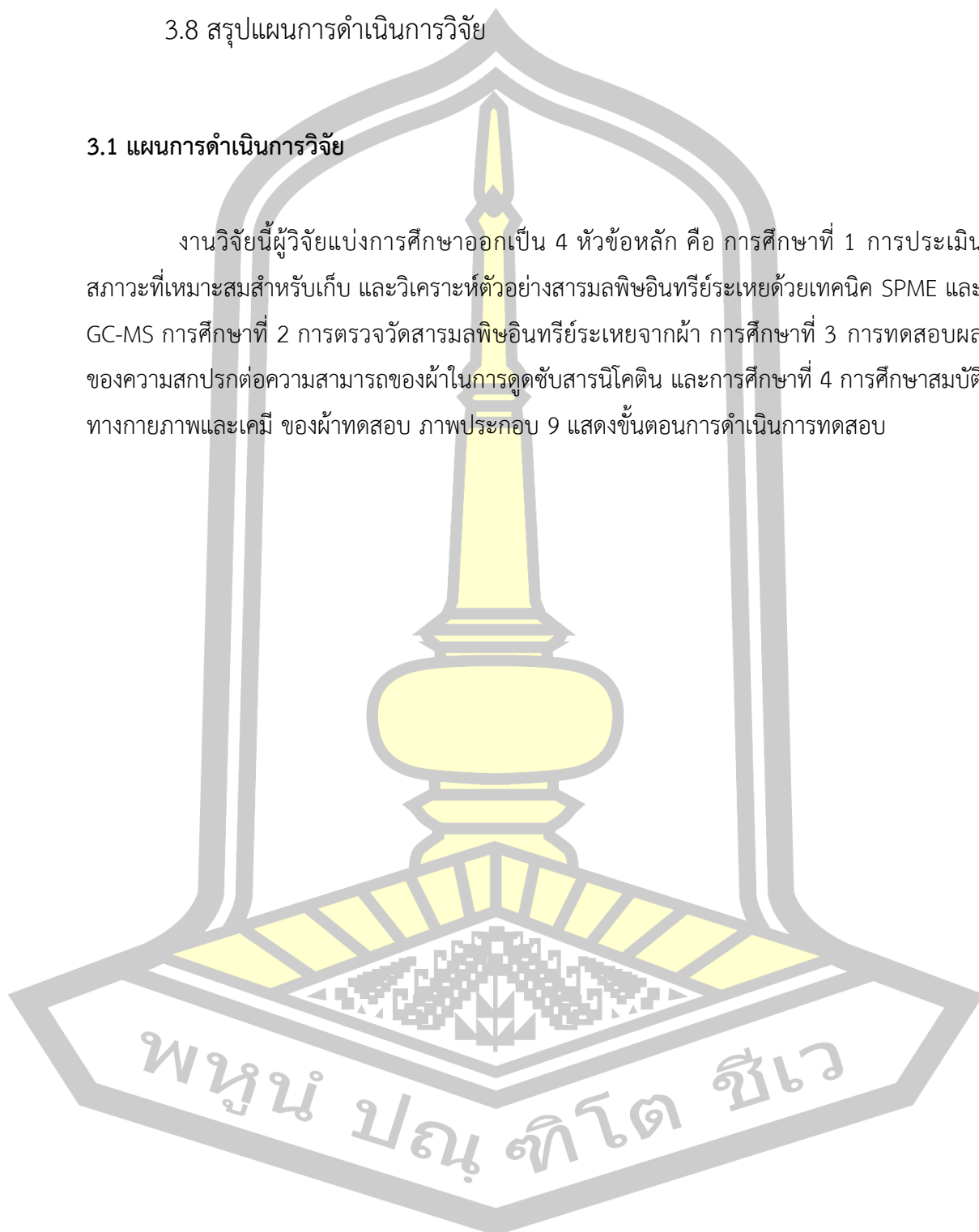
3.6 การศึกษาคุณสมบัติของผ้าทางกายภาพและทางเคมี

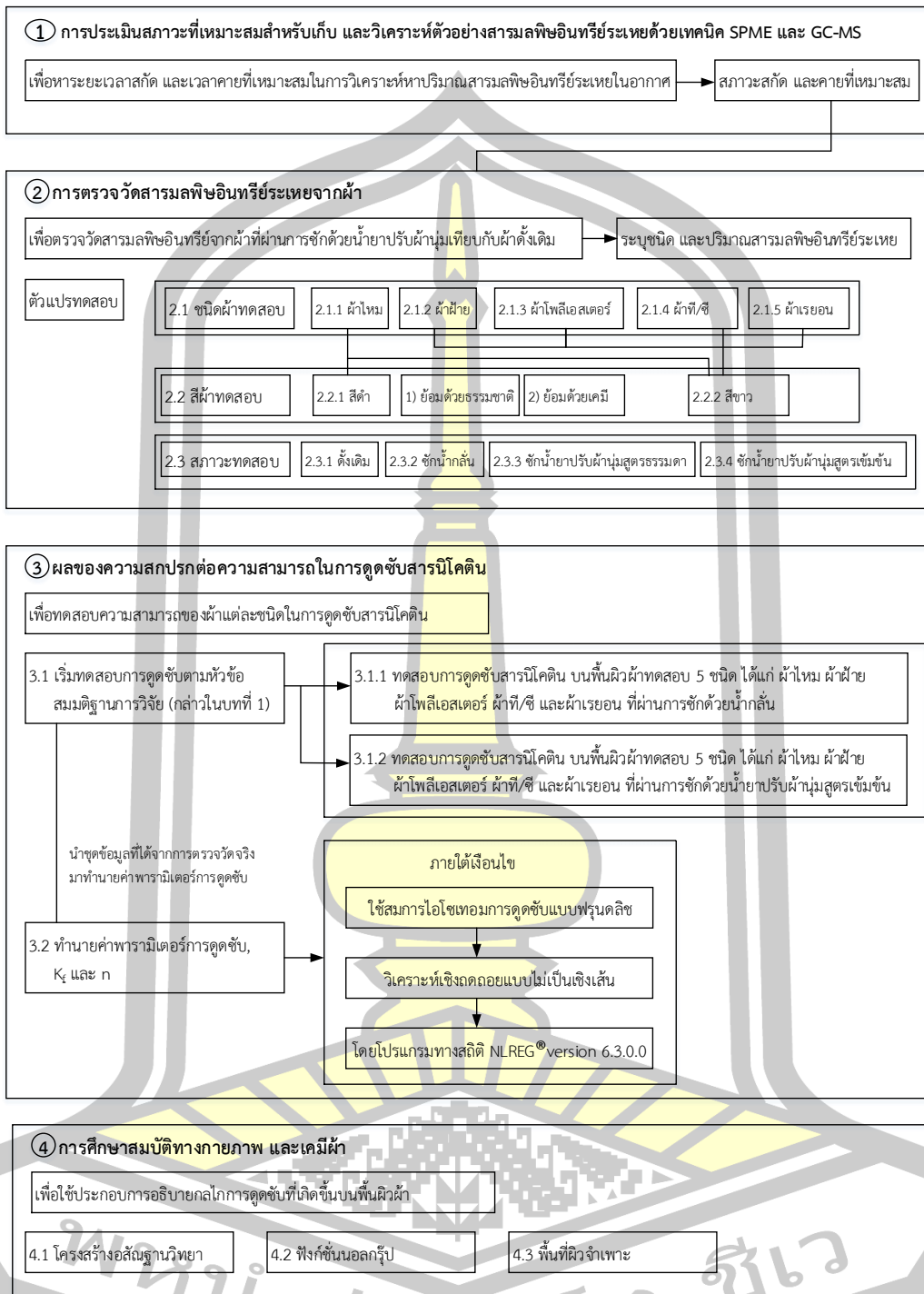
### 3.7 การประกันคุณภาพการวิจัย

### 3.8 สรุปแผนการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อหลัก คือ การศึกษาที่ 1 การประเมินสถานะที่เหมาะสมสำหรับเก็บ และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS การศึกษาที่ 2 การตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้า การศึกษาที่ 3 การทดสอบผลของความสกปรกต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน และการศึกษาที่ 4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี ของผ้าทดสอบ ภาพประกอบ 9 แสดงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ





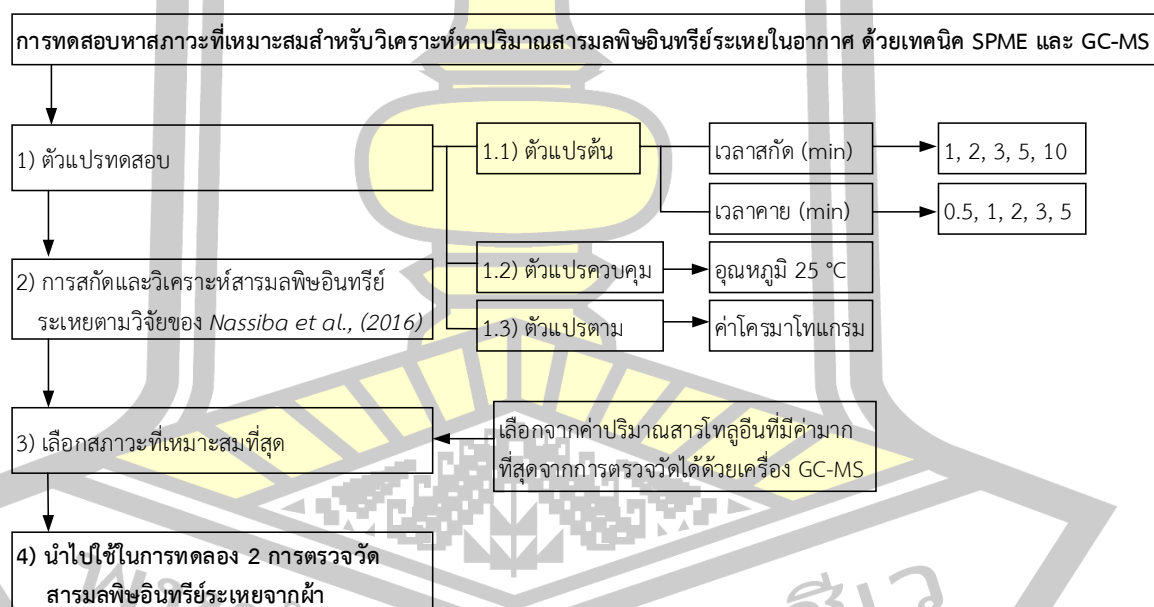
ภาพประกอบ 9 แผนการดำเนินการทดลอง

### 3.2 การประเมินสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บ และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศ โดยในที่นี้ใช้โทลูอีน (toluene) เป็นสารตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ระเหย ตัวแปรที่เลือกศึกษาที่มีผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศ จำนวน 2 ตัวแปร คือ

1) เวลาสกัด (extraction time) หมายถึง เวลาที่ใช้แช่ SPME-fiber เพื่อให้สารมลพิษอินทรีย์ดูดติดบนไฟเบอร์

2) เวลาคาย (desorption time) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนตรงตำแหน่งจุดฉีด (GC injection) ของเครื่อง GC เพื่อให้สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ดูดติดบนไฟเบอร์คายตัวจากไฟเบอร์ จากนั้นนำค่าโครมาโทแกรมของสารโทลูอีนที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง GC-MS (โครมาโทแกรม แสดงถึงปริมาณของสารโทลูอีน) ภาพประกอบ 10 แสดงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ








ภาพประกอบ 10 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS

### 3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ทดสอบ

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหย แสดงดังตาราง 11

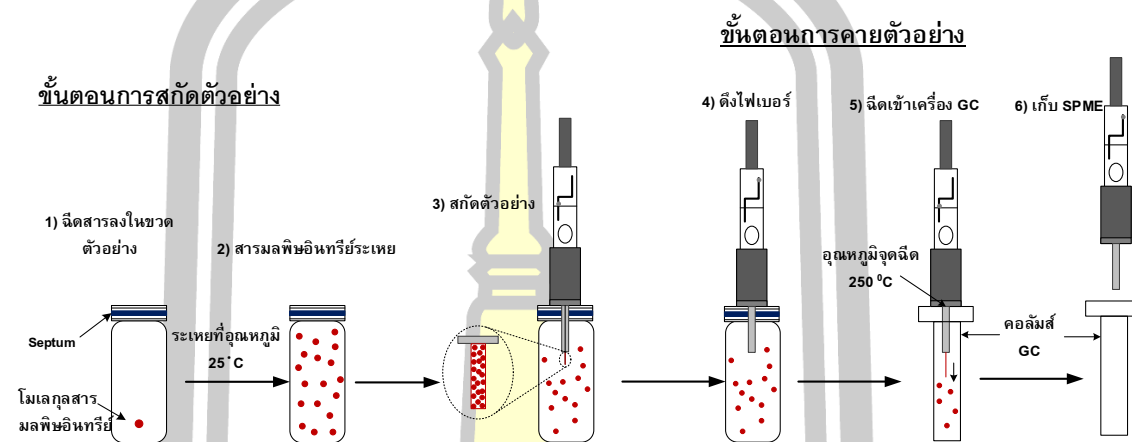
ตาราง 11 สารอินทรีย์และอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

อุปกรณ์ทดสอบ	รายละเอียด	ภาพประกอบ
1) สารมลพิษอินทรีย์	แสดงดังตาราง 11	
2) เข็มฉีดยา (syringe)	ขนาด 10 $\mu\text{L}$ (SGE, Australia)	
3) SPME-holder	แบบ manual (Supelco, USA)	
4) SPME-fiber	ชนิด DVB/CAR/PDMS หน้า 50/30 $\mu\text{m}$ (Supelco, USA)	
5) ขวดเก็บตัวอย่าง (vial)	แบบเกลียวขนาด 20 mL (SUN-SRI, USA)	

### 3.2.2 การเตรียมวัสดุทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ

ก่อนเริ่มการทดสอบนำขวดเก็บตัวอย่างแบบฝาเกลียวขนาด 20 mL ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เริ่มการทดสอบโดยดูดของเหลวสารมลพิษอินทรีย์บริสุทธิ์ สารมลพิษที่ใช้ คือ โทลูอีน (Merck KGaA, Germany) ปริมาตร  $1\ \mu\text{L}$  (คำนวณเป็นมวลสารต่อปริมาตรอากาศเท่ากับความเข้มข้น  $5\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ด้วยเข็มฉีดยา ขนาด  $10\ \mu\text{L}$  ฉีดลงในขวดเก็บตัวอย่าง 20 mL จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง  $25^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที (ทุกการทดลอง) เพื่อให้โทลูอีนระเหยกลายเป็นไอ เริ่มสกัดตัวอย่าง โดยแทงเข็ม SPME-holder โดยใช้ SPME-fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS ผ่านยางกันรั่ว (septum) เข้าไปในขวดเก็บตัวอย่าง ทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนด คือ 1, 2, 3, 5 และ 10 นาที โดยใช้เวลาคายตัวอย่าง 3 นาที [61] แสดงดังภาพประกอบ 11 โดยเริ่มนับเวลาที่ 0 วินาที ที่ SPME-fiber สัมผัสกับก๊าซโทลูอีนภายในขวดเก็บตัวอย่าง ซึ่งหลักการนี้เรียกว่า “การสกัดตัวอย่าง” หลังจากนั้นนำ SPME-fiber ไปวิเคราะห์หาปริมาณโทลูอีน โดยแทงเข็ม SPME-fiber ที่จุดฉีดของเครื่อง GC แสดงดังภาพประกอบ 11 ซึ่ง

อุณหภูมิจุดฉีด 250 °C ความร้อนภายในคอลัมน์ของเครื่อง GC พาสารโกลูอินที่ติดบนไฟเบอร์ ระบายออกจากไฟเบอร์ หลักการนี้ เรียกว่า “การคายตัวอย่าง” โดยใช้เวลาคายตามที่กำหนด คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 5 นาที สำหรับสภาวะของเครื่อง GC-MS ในการวิเคราะห์ปริมาณสารโกลูอิน แสดง ดังตาราง 17 ที่สภาวะการทำงาน 1



ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการสกัดและวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS

ตาราง 12 สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS และ GC-FID

	สภาวะการทำงาน 1	สภาวะการทำงาน 2	สภาวะการทำงาน 3
column type	Rtx®-5MS Column length 30 m, Film thickness 0.25 µm		
column oven temp. (°C)	40	40	140
injection temp. (°C)	250	250	250
injection mode	split	split	split
flow control mode	linear velocity	linear velocity	linear velocity
Pressure ( kPa)	63.1	63.1	97.3
total flow (mL/min)	6.6	6.6	4.6
column flow (mL/min)	1.19	1.19	0.81
split ratio	2	2	1
oven temp.	40-80	40-80	140-160 hold 10 min
program rate (°C/min)	20	1	20

### 3.3 การตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากผ้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อตรวจวัดปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกจากผ้า ด้วยเทคนิค SPME-GCMS โดยผ้าทดสอบ ประกอบไปด้วย ผ้าไหม (silk) ผ้าฝ้าย (cotton) ผ้าโพลีเอสเตอร์ (polyester) ผ้าเรยอน (rayon) และผ้าที/ซี (T/C) ซึ่งผู้วิจัยเลือกทดสอบเฉพาะสีขาวเท่านั้น เว้นแต่ผ้าไหมที่เลือกทดสอบทั้งสีขาว และสีดำ เนื่องจากต้องการศึกษาผลของสีที่ย้อมที่อาจมีผลต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย โดยผ้าทดสอบแต่ละชนิดผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม เพื่อเปรียบเทียบกับผ้าสภาพดั้งเดิมทุกการทดลอง [19] การปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยจากตัวอย่างผ้าทำที่อุณหภูมิ 30 °C ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า (shaking incubator) (Miulab, China) ทำการทดลอง 2 ชั่วโมง จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงคุณภาพ (qualitative) กล่าวคือ การระบุชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบแต่ละชนิด และเชิงปริมาณ (quantitative) กล่าวคือ การคำนวณผลรวมทั้งหมดของพื้นที่โครมาโทแกรมของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปล่อยจากผ้าทดสอบ (total volatile organic compounds, TVOC) โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นทั้งหมดกับโพลูอินซึ่งใช้เป็นสารมาตรฐาน [19] หมายเหตุ ค่า TVOC ในการศึกษานี้ได้จากโครมาโทแกรมของ m/z ในช่วง 40-500 ภาพประกอบ 12 แสดงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

พหุบัน ปณ จิตโต ชีเว



ปลดปล่อยออกจากผ้าที่ผ่านการย้อม ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ที่มาจากผงสีย้อม โดยระบุชนิดและปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหิดจากผงสีย้อม สำหรับประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล เริ่มการทดสอบโดยนำผงสีดังกล่าวมาชั่งน้ำหนัก 0.1 กรัม ใส่ในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 mL จากนั้นเขย่าด้วยความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C ปล่อยให้สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในสีย้อมระเหิดเป็นไอภายในขวดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า จากนั้นสกัดตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในขวดเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 3 นาที ด้วยเข็ม SPME-fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ที่สภาวะการทำงาน 2 แสดงดังตาราง 12 โดยใช้เวลาคาย 3 นาที ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

ตาราง 13 แสดงผลการทดสอบการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์จากผงสีย้อม พบว่าสารในกลุ่มเอสเทอร์ และแอลกอฮอล์ มีพื้นที่โครมาโทแกรมรวมกันร้อยละ 80 ซึ่งสูงกว่าสารกลุ่มอื่นที่ปลดปล่อยออกมา จากผลทดสอบดังกล่าวผู้วิจัยจะนำผลที่ได้ไปใช้ เพื่อประกอบการพิจารณาผลการทดสอบการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากผ้าที่ผ่านการย้อมในลำดับต่อไป

ตาราง 13 การปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหิดจากผงสีย้อม

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	พื้นที่โครมาโทแกรม (TIC)
2-tert-butylcyclohexanol	$1.4 \times 10^8$
4-tert-butylcyclohexyl acetate	$1.1 \times 10^9$
citronellol	$9.5 \times 10^7$

2) ผ้าฝ้าย ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibres) ร้อยละ 88-96 [41] ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, -OH) มีคุณสมบัติมีขั้ว และมีกลุ่มฟังก์ชัน (functional groups) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นได้ [12] เป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติมีการผลิตโดยอุตสาหกรรมทอผ้า การทดสอบผ้าฝ้ายผู้วิจัยได้จากร้านค้าในตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม โดยผู้วิจัยเลือกทดสอบเฉพาะสีขาว

ผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ประกอบไปด้วย

1) ผ้าโพลีเอสเตอร์ ประกอบด้วยเส้นใยสังเคราะห์เอสเทอร์ (ester) และกลุ่มกรดเทอริฟทาลิก (terephthalic acid) [65] จากงานวิจัยของ [12] ศึกษาลักษณะพื้นผิวผ้าโพลีเอสเตอร์ ด้วยการวิเคราะห์หากกลุ่มฟังก์ชันนอลด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR) พบว่า ผ้าโพลีเอสเตอร์มีองค์ประกอบของสารกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl) และอะโรมาติก (aromatic) ซึ่งมีคุณสมบัติมีขั้วต่ำกว่าเส้นใยธรรมชาติ ผ้าโพลีเอสเตอร์ผู้วิจัยได้จากแหล่งที่มาเช่นเดียวกับผ้าฝ้าย และเลือกทดสอบเฉพาะสีขาว

2) ผ้าเรยอน ประกอบด้วย เส้นใยสังเคราะห์จากเซลลูโลส ผ้าเรยอนผู้วิจัยได้จากแหล่งที่มา เช่นเดียวกับผ้าฝ้าย และเลือกทดสอบเฉพาะสีขาว

3) ผ้าที/ซี คือผ้าที่มีส่วนผสมของเส้นใยฝ้ายร้อยละ 65 และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ร้อยละ 35 เป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ มีกรรมวิธีการผลิตโดยอุตสาหกรรมทอผ้า ผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ ผู้วิจัยได้จากแหล่งที่มาเช่นเดียวกับผ้าฝ้าย และเลือกทดสอบเฉพาะสีขาวเท่านั้น

ผู้วิจัยเลือกผ้าทดสอบทั้ง 5 ชนิด เนื่องจากผ้าแต่ละชนิดสมบัติทางกายภาพ (physical properties) เช่น รูปแบบการทอ (weave) ขนาดรูพรุน (pore size) โครงสร้างผ้า (fabric structure) ความหนาแน่น (density) และสมบัติทางเคมีต่างกัน (chemical properties) เช่น การตกแต่งสำเร็จ (finish) คือกระบวนการใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติให้แก่ผ้าดิบ แร้งยึดกันระหว่างโมเลกุล (bond) ต่างกัน ซึ่งอาจมีผลต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยและความแตกต่างในด้านการดูดตึนน้ำยาปรับผ้านุ่ม (กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป) ตาราง 14 แสดงสมบัติผ้าทดสอบทั้ง 5 ชนิด ในงานวิจัยนี้

ตาราง 14 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของผ้าทดสอบ

ประเภท	ชนิด	Fabric count (in <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>		องค์ประกอบทางเคมี <sup>b</sup>	สูตรเคมี <sup>b</sup>
		เส้นยืน	เส้นพุ่ง		
ธรรมชาติ	ไหม	81±0.5	44±0.5	กรดอะมิโน	-
	ฝ้าย	148±0.5	83±0.5	เซลลูโลส	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>
สังเคราะห์	โพลีเอสเตอร์	97±0.5	44±0.5	กรดเทอริฟทาลิก	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>
	เรยอน	37±0.5	70±0.5	โพลิเมอร์ไวนิลคลอไรด์	-
	ที/ซี	111±0.9	55±0.5	-	-

<sup>a</sup>จากการตรวจวัดด้วยวิธีนับโดยผู้วิจัย, <sup>b</sup>จากแหล่งอ้างอิง [65]

### 3.3.1.2 การเตรียมผ้าทดสอบ

สำหรับผ้าที่ใช้ทดสอบทุกชนิดถูกนำมาผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบกับผ้าสภาพดั้งเดิม การปรับสภาพผ้าทดสอบ แบ่งออกเป็น 4 สภาวะ ดังนี้

สภาวะทดสอบ 1 คือ ผ้าทดสอบสภาพดั้งเดิม (unconditioned fabrics) ซึ่งเป็นผ้าที่มีสภาพแบบเดิมตามที่ได้รับมาในตอนแรก ผ้าแต่ละชนิดถูกเก็บรักษาในถุงซิปล็อค (zip lock bag) เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศผ่านเข้าไปสัมผัสกับผ้าทดสอบ เก็บที่อุณหภูมิ 28±0.8 °C และความชื้นร้อยละ 61±1.1 ด้วยตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (TODAY'S INSTRUMENTS, Taipei) ก่อนนำไปทดสอบการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย ผ้าตัวอย่างจะถูกตัดให้มีขนาด 1.5X4 cm<sup>2</sup> สำหรับ

รายละเอียดการเลือกขนาดผ้าทดสอบผู้วิจัยกล่าวในหัวข้อการประกันคุณภาพการวิจัยการเลือกขนาดผ้าทดสอบ

สภาวะทดสอบ 2 คือ ผ้าทดสอบที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่น (deionized water cleansing) โดยตัดผ้าตัวอย่างขนาด  $1.5 \times 4 \text{ cm}^2$  ทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ด้วยเครื่องเขย่าแนวระนาบ (BioSan LTD, Latvia ) ด้วยความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ผู้วิจัยเลือกใช้ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที จากผลการทดสอบกับผ้าใหม่ตัวอย่าง กวนเขย่าในน้ำกลั่นที่รอบ 80, 100 และ 150 รอบ/นาที จากผลการทดสอบพบว่าเส้นใยผ้าใหม่แยกออกเป็นชิ้นๆ ที่ความเร็วรอบ 100 และ 150 เนื่องจากแรงเหวี่ยงที่เกิดจากการกวนเขย่าสูงเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดผ้าทดสอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที หลังจากซักแล้วนำผ้าตัวอย่างไปตากให้แห้งโดยแขวนในห้องสะอาด (clean room) ซึ่งทำจากอะลูมิเนียม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ความสูง 11 cm ความจุ 2 L และผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 ที่อัตราการไหล 500 mL/min เป็นเวลาต่อเนื่องประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

สภาวะทดสอบ 3 คือ ผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่นแล้วนำมาแช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา (non-concentrated fabric softener) (ดูรายละเอียดน้ำยาปรับผ้านุ่มในหัวข้อลำดับถัดไป) โดยนำตัวอย่างผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่นตามขั้นตอนของสภาวะทดสอบ 2 มาแช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดาด้วยความเข้มข้นน้ำยาในน้ำกลั่นร้อยละ 0.08 กวนเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวระนาบ ที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปตากให้แห้งในห้องสะอาด พร้อมทั้งผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และนำไปทดสอบการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

หมายเหตุ การคำนวณร้อยละความเข้มข้นของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ทดสอบ ใช้ตามคำแนะนำการใช้งานของผลิตภัณฑ์น้ำยาปรับผ้านุ่มที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยคำแนะนำการใช้สำหรับซักด้วยเครื่องซักผ้าเต็มถัง (ปริมาณน้ำสูงสุด 52 L) ใช้น้ำยาปรับผ้านุ่ม 1 ผา โดยน้ำยาปรับผ้านุ่ม 1 ผามีปริมาตร 40 mL วัดโดยเทน้ำยาปรับผ้านุ่มใส่ในบีกเกอร์ขนาด 80 mL ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของน้ำยาปรับผ้านุ่มต่อปริมาณน้ำเท่ากับ  $0.04 \text{ L} : 52 \text{ L}$  หรือคิดเป็นร้อยละ 0.08

สภาวะทดสอบ 4 คือ ผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่นแล้วแช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น (concentrated fabric softener) (ดูรายละเอียดน้ำยาปรับผ้านุ่มในหัวข้อลำดับถัดไป) สำหรับวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับสภาวะทดสอบ 3 แต่แช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.08 จากนั้นนำไปตากให้แห้งในห้องสะอาด พร้อมทั้งผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และนำไปทดสอบการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

### 3.3.1.3 ชนิดของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ใช้ทดสอบ

ผู้วิจัยเลือกน้ำยาปรับผ้านุ่มสำหรับทดสอบโดยการสำรวจจากการจำหน่ายตามท้องตลาด และเลือกชนิดน้ำยาปรับผ้านุ่มตามองค์ประกอบสำคัญที่ระบุข้างผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้ประกอบผลทดสอบ สารอินทรีย์ระเหยจากน้ำปรับผ้านุ่ม ตาราง 15 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ใช้ทดสอบซึ่งวางขายในท้องตลาดทั่วไป ได้แก่ น้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น ซึ่งระบุโดยบริษัทผู้จำหน่าย

1) น้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา มีสารปรับผ้านุ่มที่สำคัญ คือ ไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (didecyl dimethyl ammonium chloride) ความเข้มข้นร้อยละ 0.25

2) น้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น มีสารปรับผ้านุ่มที่สำคัญ คือ ไดเอทิลอีเทอร์ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (diethyl ester dimethyl ammonium chloride) ความเข้มข้นร้อยละ 8

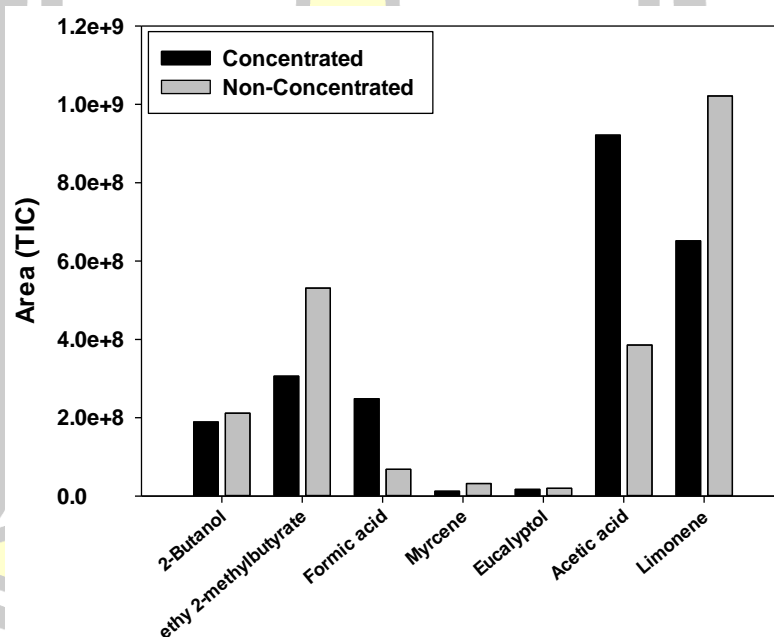
สารไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารไดเอทิลอีเทอร์ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ มีสมบัติเหมือนกัน คือเป็นสารออกฤทธิ์ที่ทำให้ผ้านุ่ม

ตาราง 15 องค์ประกอบของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ทดสอบ

องค์ประกอบของน้ำยาปรับผ้านุ่ม	ชนิดของน้ำยาปรับผ้านุ่ม	
	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
didecyl dimethyl ammonium chloride	✓	-
diethyl ester dimethyl ammonium chloride	-	✓
cationic acrylic polymer	✓	✓
formic acid	✓	✓
hydrochloric acid	✓	✓
sodium 1-hydroxyethane-1	✓	✓
1-diphosphonate	✓	✓
benzyl isothiazolinone	✓	✓
silicon	✓	✓

เนื่องจากน้ำยาปรับผ้านุ่มมีองค์ประกอบของอินทรีย์ระเหยที่อาจมีผลต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยสู่ผู้สวมใส่ได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันแหล่งที่มาของสารมลพิษที่ระเหยออกจากผ้าที่ผ่านการใช้น้ำยาปรับผ้านุ่ม ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหยจากน้ำยาปรับผ้านุ่มโดยตรง โดยจะระบุชนิดและปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากน้ำยาปรับผ้านุ่มทั้ง 2 สูตร สำหรับประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล ทำการทดสอบโดยคูดน้ำยาปรับผ้านุ่ม 1 mL ด้วยปิเปตลง

ในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 mL จากนั้นเขย่าด้วยความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า จากนั้นสกัดตัวอย่าง 3 นาที ด้วยเข็ม SPME-fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ที่สภาวะการทำงาน 2 แสดงดังตาราง 12 โดยใช้เวลาคาย 3 นาที ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ภาพประกอบ 13 แสดงพื้นที่โครมาโทแกรมสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และสูตรเข้มข้น จากการทดสอบ พบว่า สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากทั้งน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และสูตรเข้มข้น ได้แก่ สาร 2-butanol, ethyl 2-methylbutyrate, formic acid, myrcene, eucalyptol, acetic acid และ d-limonene เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยคำนวณจากพื้นที่โครมาโทแกรมของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยทั้งหมด พบว่าน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น มีค่าสูงกว่าสูตรธรรมดา ประมาณ 1 เท่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสาร formic acid ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นมีพื้นที่โครมาโทแกรมสูงกว่าสูตรธรรมดาถึง 3.6 เท่า

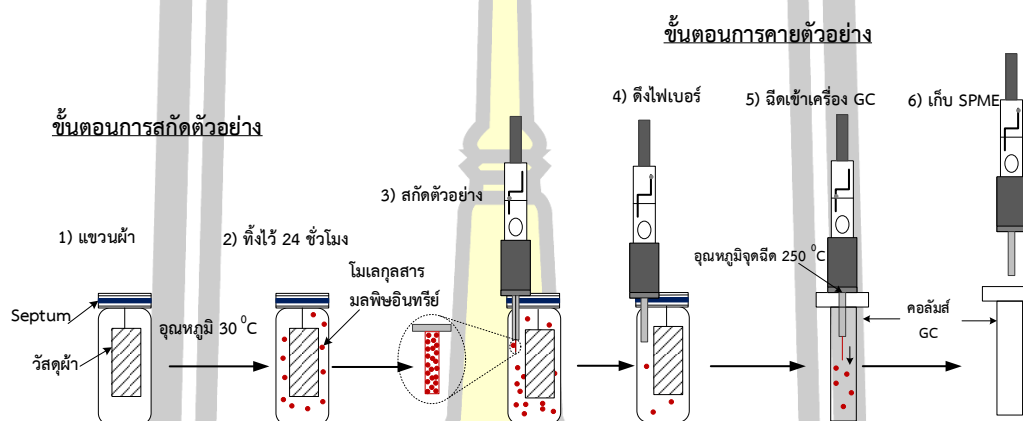


ภาพประกอบ 13 สารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหยจากน้ำยาปรับผ้านุ่มทั้งสูตรธรรมดาและสูตรเข้มข้น

### 3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ภาพประกอบ 14 แสดงขั้นตอนการทดสอบ โดยนำผ้าตัวอย่างที่เตรียมไว้ขนาด 1.5X4 cm<sup>2</sup> แขนงภายในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 mL จากนั้นเขย่าด้วยความเร็ว 80 รอบ/นาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่าเพื่อให้ผ้าเกิดการ

ปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศภายในขวดเก็บตัวอย่างจนถึงสภาวะสมดุล (equilibrium) จากนั้นเริ่มสกัดตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในขวดตัวอย่าง 3 นาที ด้วย SPME-fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS หน้า 50/30  $\mu\text{m}$  (Bellefonte, PA, USA) ซึ่งมีสมบัติสองขั้ว (bi-polar) เหมาะสำหรับตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในกลุ่มที่มีสมบัติมีขั้วเดียว (mono-polar) และไม่มีขั้ว (non-polar) จากนั้น นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ที่สภาวะการทำงาน 2 แสดงดังตาราง 12 โดยใช้เวลาคาย 3 นาที ทำการทดลอง 2 ขั้ว



ภาพประกอบ 14 ขั้นตอนการตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ

### 3.3.3 การสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐานและการเปรียบเทียบ

สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหย แสดงดังตาราง 12 ที่สภาวะการทำงาน 2 และคำนวณค่า TVOC ด้วยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโทลูอีน ที่ความเข้มข้น  $0-8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  การเตรียมสารมาตรฐานโทลูอีน โดยดูดไอระเหยโทลูอีนปริมาตร 0.2 mL (คำนวณเป็นมวลสารต่อปริมาตรอากาศเท่ากับ  $8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ด้วยเข็มฉีดยาขนาด 1 mL ฉีดลงในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 mL จากนั้นสกัดไอระเหยโทลูอีนด้วยเข็ม SPME-fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS เป็นเวลา 3 นาที และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ที่สภาวะการทำงาน 2 ดังตาราง 12 โดยใช้เวลาคาย 3 นาที

### 3.4 การทดสอบผลของความสกปรกต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับนิโคติน

#### 3.4.1 สารเคมี วัสดุทดสอบ การเตรียมวัสดุทดสอบ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.4.1.1 สารดูดซับอินทรีย์ (organic sorbates)

สารที่เป็นเป็นตัวแทนสารดูดซับคือ นิโคติน (nicotine) เป็นสารประกอบในกลุ่มเอมีน (amine) นิโคตินจัดเป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของบุหรี่ยี่ มีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหย การวิจัยของ มณีรัตน์ [26] ตรวจวัดนิโคตินที่ดูดติดบนวัสดุพรม ซึ่งเป็นวัสดุภายในอาคาร พบว่า นิโคตินที่ดูดติดที่พรมใช้เวลาานานกว่า 3 ปี เพื่อคายตัวกลับสู่บรรยากาศ นั้นหมายความว่า ผู้ที่อาศัยอยู่ใกล้บริเวณที่มีการสูบบุหรี่ หรือเคยมีการสูบบุหรี่ เช่น ห้องพักโรงแรม อาคาร บ้านพักอาศัย อาจเสี่ยงต่อการได้รับนิโคตินตลอดเวลา สมบัติทางเคมีของนิโคตินแสดงดังตาราง 16

ตาราง 16 สมบัติทางเคมีของนิโคตินที่ใช้ในการทดสอบ

กลุ่มสาร	สูตรเคมี	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	จุดเดือด (°C)	ความดันไอ <sup>a</sup> (Pa)	Log $K_{\text{hexadecane/air}}$ <sup>b</sup>	พันธะทางไฮโดรเจน <sup>c</sup>	
						กรด	เบส
Amine	$C_{10}H_{14}N_2$	162.26	247	1.15	5.87	0.00	0.52

หมายเหตุ จากแหล่งอ้างอิง <sup>a</sup>[66], <sup>b</sup>[67], <sup>c</sup>[37]

##### 3.4.1.2 วัสดุทดสอบ

วัสดุดูดซับ (sorbent) ที่ใช้ในการทดสอบ คือ ผ้า แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ประกอบไปด้วย ผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ซึ่งรายละเอียดของผ้าทดสอบผู้วิจัยได้กล่าวไปแล้วข้างต้นในหัวข้อ 3.3.1.1 ผู้วิจัยเลือกใช้ผ้าทดสอบทั้ง 5 ชนิด เนื่องจากผ้าทั้ง 5 ชนิดมีสมบัติทางกายภาพและเคมีต่างกัน ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดซับมลพิษอินทรีย์ระเหย นอกจากนี้ผ้าโพลีเอสเตอร์ และผ้าฝ้าย ยังจัดเป็นผ้าที่มีการผลิตเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์สูงถึง 46,683 และ 25,628 ตัน/ปี ตามลำดับ [65]

##### 3.4.1.3 การเตรียมวัสดุทดสอบ

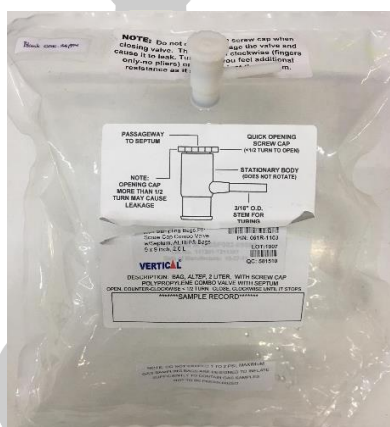
สำหรับขั้นตอนการเตรียมผ้าทดสอบ ผู้วิจัยเตรียมเช่นเดียวกับการทดลอง 3.3.1.2 การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหย แต่สำหรับการทดสอบนี้ผู้วิจัยเลือกเตรียมเฉพาะผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่น (control sample) และผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นเพียงอย่างเดียว

เนื่องจาก ผ้าที่ผ่านการซักน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นมีค่าปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาสูงมากกว่าผ้าที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา ดังนั้นจึงคาดว่าจะสามารถสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวผ้าต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินได้ชัดเจนกว่า

#### 3.4.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

##### 1) ถุงเก็บก๊าซ (gas sampling bags)

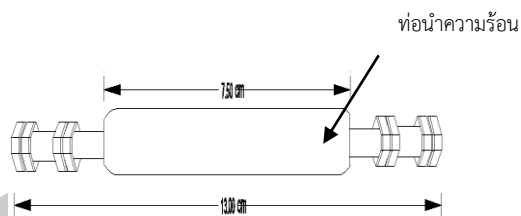
ถุงเก็บก๊าซสำหรับทดสอบ ทำมาจากพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มีขนาด 9x9 in ขนาดปริมาตร 2 L ฝา ปิด-เปิดแบบเกลียว (screw cap) ภายในประกอบด้วยยางกันรั่ว (septum) กันไม่ให้ก๊าซเกิดการรั่วออกมาสู่อากาศภายนอก ลักษณะถุงก๊าซเก็บตัวอย่าง แสดงดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 ถุงเก็บก๊าซตัวอย่างขนาด 2 L

##### 2) อุปกรณ์สร้างไอระเหย (evaporator)

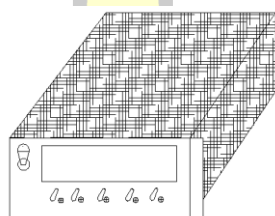
ใช้ระเหยสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลวบริสุทธิ์ให้กลายเป็นไอ โดยนำท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 cm มาตัดให้มีความยาว 13 cm แล้วนำท่อให้ความร้อน (heating tube) ซึ่งภายในมีขดลวดที่มีความร้อนสูงมาสวมทับท่อเหล็กอีกที อุณหภูมิที่ใช้ระเหยสารมลพิษอินทรีย์กลายเป็นไอ คือ 250 °C แสดงดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 อุปกรณ์สร้างไอระเหย

3) อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ (mass flow controller)

ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซตามที่กำหนด เพื่อให้ไหลเข้าภายในถุงก๊าซสำหรับเก็บตัวอย่าง (MKS Instruments, Inc) ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ

4) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศ SPME-holder และ SPME-fiber

อุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหย แบ่งออกเป็น SPME-holder และ SPME-fiber แสดงดังตาราง 11 หลักการทำงาน คือ กัดที่ตำแหน่ง plunger และเลื่อนลงเรื่อยๆ ตามทิศทางของ Z-slot จากนั้นบิด plunger ไปยังตำแหน่งที่ SPME-fiber พร้อมใช้งาน

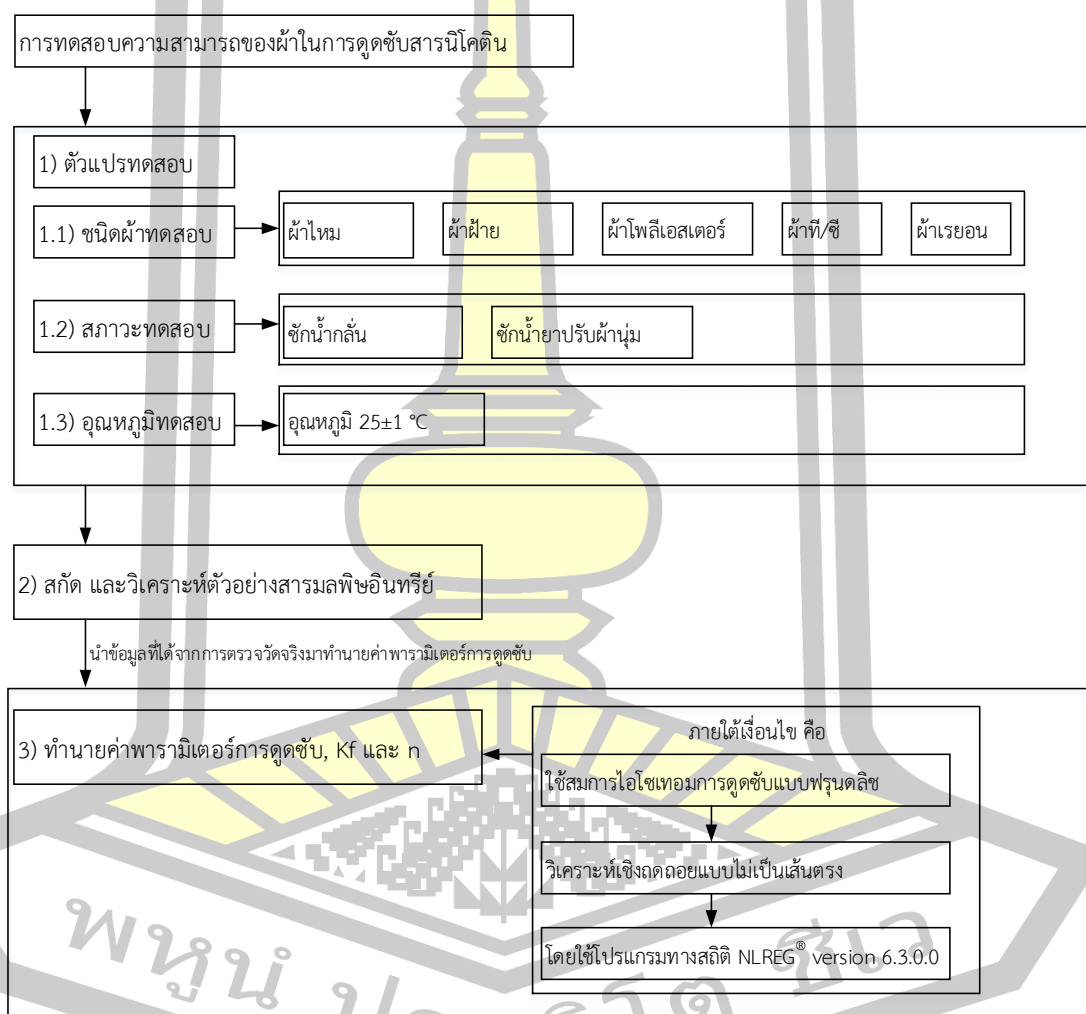
พหุบัน ปณ กิจโต ชีเว

### 3.4.2 แผนการดำเนินการทดลอง

การทดสอบนี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ

การทดลองที่ 1 การทดสอบการดูดซับนิโคติน บนพื้นผิวผ้าทดสอบ 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่น

การทดลองที่ 2 การทดสอบการดูดซับนิโคติน บนพื้นผิวผ้าทดสอบ 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่นแล้วจึงซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม ภาพประกอบ 18 แสดงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

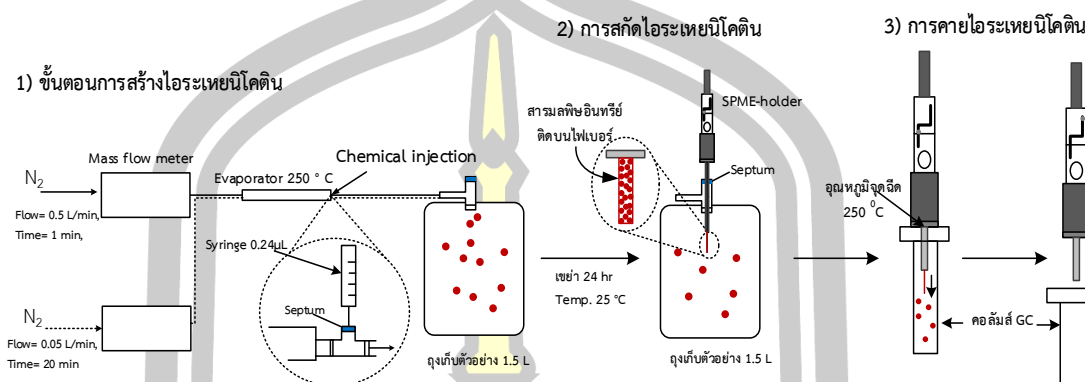


ภาพประกอบ 18 แผนผังขั้นตอนการทดสอบหาค่าความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน

### 3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ภาพประกอบ 19 แสดงขั้นตอนการทดสอบ ก่อนเริ่มการทดสอบเตรียมผ้าตัวอย่าง โดยตัดผ้าตามขนาดทดสอบ แสดงดังตาราง 17 จากนั้นนำผ้าตัวอย่างปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil) [12] เพื่อไม่ให้สัมผัสกับสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ทดสอบ เนื่องจากการทดสอบนี้ผู้วิจัยทดสอบกับพื้นผิวผ้าเพียงด้านเดียวเท่านั้น เพื่อง่ายต่อการควบคุมปัจจัยที่อาจมีผลต่อกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวผ้า นำผ้าตัวอย่างใส่เข้าไปภายในถุงเก็บตัวอย่างขนาด 2 L สำหรับวิธีการใส่ผ้าตัวอย่างเข้าไปในถุงเก็บตัวอย่าง คือ ตัดถุงเก็บตัวอย่างให้มีช่องว่างขนาดประมาณ 7 cm จากนั้นนำผ้าตัวอย่างที่เตรียมไว้ใส่เข้าไปภายในถุงเก็บตัวอย่าง ปิดผนึกถุงเก็บตัวอย่างด้วยการซีลโดยเครื่องซีลแบบเท้าเหยียบ รุ่น PFS-600 (E-san plaspac Co., LTD, Thailand) จากนั้นผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 เข้าไปเพื่อไล่อากาศเดิมภายในถุงเก็บตัวอย่าง ทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปในถุงเก็บตัวอย่างด้วยอัตราการไหล 500 mL/min เป็นเวลา 1 นาที ให้ได้ปริมาตรก๊าซไนโตรเจนในถุง 1 L (ตามรอยเส้นทึบ แสดงดังภาพประกอบ 19) ดูนีโคตินเหลวบริสุทธิ์ด้วยเข็มฉีดยา (Micro-syringe) (SGE, Australia) ปริมาตร 0.24  $\mu\text{L}$  (คำนวณเป็นมวลสารต่อปริมาตรอากาศ เท่ากับ 160  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  หรือประมาณ 24 ppm) ซึ่งการคำนวณแสดงในหัวข้อถัดไป ฉีดเข้าไปที่อุปกรณ์สร้างไอระเหย (chemical injection) พร้อมทั้งปล่อยก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 50 mL/min (ตามรอยเส้นปะ แสดงดังภาพประกอบ 19) เข้าถุงเก็บตัวอย่างเป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที จะได้ปริมาตรก๊าซไนโตรเจนทั้งหมดในถุง 1.5 L จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวระนาบ (BioSan LTD, Latvia) ด้วยความเร็ว 180 รอบ/นาที เพื่อให้ผ้าเกิดการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศภายในถุงเก็บตัวอย่างจนถึงสภาวะสมดุล (equilibrium) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การทดลองไอโซเทอมทำในห้องวิจัยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ด้วยเครื่องปรับอากาศ เริ่มสกัดไอระเหยนิโคตินในอากาศภายในถุงเก็บตัวอย่าง 3 นาที ด้วย SPME-fiber ชนิด PDMS หนา 100  $\mu\text{m}$  (Bellefonte, PA, USA) ซึ่งมีสมบัติไม่มีขั้ว (non-polar) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สารมลพิษอินทรีย์ในกลุ่มไม่มีขั้ว อย่างไรก็ตามสารนิโคตินจัดสารที่มีสมบัติมีขั้วเบส ซึ่งอาจเหมาะกับการใช้การใช้ SPME-fiber ที่มีขั้วมากกว่า เนื่องจากการวิจัยนี้มีข้อจำกัดของอุปกรณ์การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่อาจไม่เหมาะสม มีผลทำให้ประสิทธิภาพการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างได้ไม่ดีเท่ากับการเลือกใช้ SPME-fiber ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดสารนิโคตินโดยตรง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID โดยนำ SPME-fiber แห่งที่จุดฉีกของเครื่อง GC ที่อุณหภูมิจุดฉีก 250 °C ซึ่งความร้อนพาสารนิโคตินที่ดูดติดบน SPME-fiber ระบายออกจากไฟเบอร์ โดยใช้เวลาคาย 3 นาที ที่สภาวะการทำงาน 3 ด้วยเครื่อง GC-FID แสดงดัง

ตาราง 17 สำหรับจำนวนตัวอย่าง และขนาดพื้นที่ผ้า แสดงดังตาราง 17 หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ แสดงถึงขนาดพื้นที่ผ้าโพลีเอสเตอร์เท่านั้น



ภาพประกอบ 19 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับนิโคตินบนผ้า

ตาราง 17 จำนวนตัวอย่างสำหรับทดสอบหาไอโซโทมการดูดซับ

จำนวน ตัวอย่าง	พื้นที่ผ้าทดสอบ (cm <sup>2</sup> )	ปริมาตรนิโคตินที่ฉีด (μL)	ปริมาตรอากาศในถุงเก็บตัวอย่าง (L)
1	28 (56)	0.24	1.5
2	35 (63)	0.24	1.5
3	42 (70)	0.24	1.5
4	79 (84)	0.24	1.5
5	56 (108)	0.24	1.5
6	63 (120)	0.24	1.5
7	70 (132)	0.24	1.5
8	84 (144)	0.24	1.5

### 3.4.4 การสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐานและการปรับเทียบ

การปรับเทียบกับสารมาตรฐานนิโคติน ที่ความเข้มข้น 0-50 ppm การเตรียมสารมาตรฐานนิโคติน โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปในถุงเก็บตัวอย่างขนาด 2 L จากนั้นดูดของเหลวนิโคตินบริสุทธิ์ ปริมาตร 0.01 μL คำนวณเป็นมวลสารต่อปริมาตรอากาศเท่ากับ 10 ppm ด้วยเข็มฉีดยา ปริมาตร 0.5 μL ฉีดเข้าไปที่จุดระเหยไอ พร้อมทั้งผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปภายในถุงตัวอย่าง ที่อัตราการไหล 50 mL/min เข้าในถุงเป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที จะได้ปริมาตรก๊าซไนโตรเจน

ทั้งหมดในถุง 1.5 L จากนั้นสกัดไอระเหยนิโคตินด้วยเข็ม SPME-fiber ชนิด PDMS เป็นเวลา 3 นาที และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID 3 นาที ที่สภาวะการทำงานของเครื่อง แสดงดังตาราง 17 สำหรับการเตรียมสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นอื่นทำเช่นเดียวกันกับความเข้มข้น 10 ppm และ ตาราง 18 แสดงค่าสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบนิโคติน

ตาราง 18 ค่าสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบนิโคติน

จำนวน	ปริมาตรนิโคตินที่ฉีด ( $\mu\text{L}$ )	ปริมาตรอากาศในถุงเก็บตัวอย่าง (L)	ความเข้มข้น (ppm)
1	0.10	1.5	10
2	0.20	1.5	20
3	0.30	1.5	30
4	0.40	1.5	40
5	0.50	1.5	50

### 3.5 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การดูดซับ

งานวิจัยนี้อธิบายปรากฏการณ์การดูดซับนิโคตินที่ผิวดูดซับด้วยไอโซเทอมการดูดซับโดยใช้แบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการดูดซับแบบแลงเมียร์อธิบายการดูดซับนี้เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุ สารดูดซับและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกัน พลังการดูดซับสม่ำเสมอ พื้นผิวสารดูดซับเป็นเนื้อเดียวกัน และในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะสามารถดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียวเท่านั้น สมการแสดงดังสมการ 3.1

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (3.1)$$

สมการดูดซับแบบฟรุนดลิชอธิบายได้ว่าพื้นที่ของตัวดูดซับมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด กล่าวคือ ผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ ทำให้พื้นที่ผิวและพลังงานของตัวดูดซับมีการกระจายตัวแบบเลขชี้กำลัง แสดงดังสมการ 3.2

$$q_e = K_f C_e^n \quad (3.2)$$

- โดย  $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับมลพิษอินทรีย์ระเหยของผ้า ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $q_m$  คือ ความสามารถในการดูดซับมลพิษอินทรีย์ระเหยของผ้า ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $K_f$  คือ ค่าคงที่แสดงถึงความจุจำเพาะของการดูดซับที่สภาวะความเข้มข้นค่าใดๆ (specific capacity)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของมลพิษอินทรีย์ระเหย ที่ สภาวะสมดุล ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $n$  คือ ค่ายกกำลังแสดงถึงระดับการสะสมและความหลากหลายของพลังงานในปฏิกิริยาการดูดซับ  
 $b$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์

โดยค่าพารามิเตอร์การดูดซับ หาได้จากนำชุดข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงมาทำนายหาค่าพารามิเตอร์ โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Nonlinear regression (NLREG) version 6.3.0.0

### 3.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของพื้นผิวของผ้า

ผู้วิจัยศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผ้า เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และเคมีที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหย โดยสมบัติที่ตรวจวัดประกอบไปด้วย

#### 3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยา (morphology)

ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopic, SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างการถักทอ หรือสาน (wave) และรูปร่างของเส้นใย

#### 3.6.2 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area, SSA)

ด้วยเทคนิคของบรูน่าวัวร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller, BET) เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาผลของการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ติดบนพื้นผิว และภายในรูพรุนของผ้า

### 3.6.3 วิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชัน (functional groups)

ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรด (fourier transform infrared spectroscope, FT-IR) เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการดูดซับที่เกิดขึ้นตามหลักทางทฤษฎีของแรงกระทำกรด-เบส ตามนิยามของลิวอิส (Lewis acid-base interactions)

## 3.7 การประกันคุณภาพการวิจัย

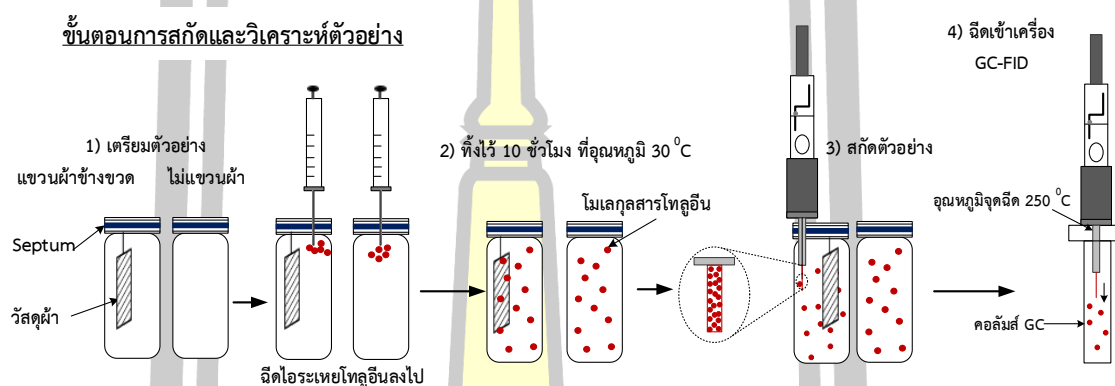
### 3.7.1 การเลือกขนาดผ้าทดสอบ

การประกันคุณภาพการวิจัยนี้ผู้วิจัยนำไปใช้ในการทดลองที่ 1 โดยมีจุดประสงค์ เพื่อตรวจวัดปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้า โดยเลือกใช้ผ้าใหม่เป็นตัวแทนผ้าทดสอบ ผู้วิจัยทำการเลือกทดสอบขนาดผ้า จำนวน 2 ขนาด ได้แก่  $1 \text{ cm}^2$  และ  $6 \text{ cm}^2$  เนื่องจากพื้นที่ผ้าทดสอบอาจมีผลต่อระดับความเข้มข้นของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกสู่อากาศภายในขวดเก็บตัวอย่าง เริ่มการทดสอบ โดยตัดผ้าทดสอบ  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำไปแขวนในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 mL ตั้งไว้อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เพื่อให้ผ้าทดสอบเกิดการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ในอากาศภายในขวดเก็บตัวอย่าง จากนั้นเริ่มสกัดตัวอย่าง 3 นาที ด้วย SPME-fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS โดยคอลัมน์ Rtx<sup>®</sup>-5MS ขนาด 30X0.25 mm อุณหภูมิคอลัมน์  $40-80^\circ\text{C}$  (rate  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ) และอุณหภูมิจุดฉีด  $250^\circ\text{C}$  (Shimadzu, Japan) โดยเวลาคาย 3 นาที จากผลการทดลอง พบว่าที่สภาวะดังกล่าว ไม่สามารถตรวจพบสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผ้าสภาวะการทำงาน of เครื่อง GC-MS ไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดสอบอีกครั้ง โดยปรับสภาวะการทำงาน of เครื่อง GC-MS เป็นสภาวะอุณหภูมิคอลัมน์  $40-80^\circ\text{C}$  (rate  $1^\circ\text{C}/\text{min}$ ) และเพิ่มขนาดผ้าเป็น  $4.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$  เนื่องจากขนาดผ้าทดสอบอาจมีผลต่อการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหย จากผลการทดสอบตรวจพบสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะของการทดสอบครั้งที่ 2 นี้ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าชนิดอื่น

### 3.7.2 การทดสอบการรั่วของขวดเก็บตัวอย่าง (sampling leak)

การประกันคุณภาพการวิจัยนี้ผู้วิจัยนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อตรวจสอบการรั่วออกของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากรูที่เกิดจากการเจาะแขวนผ้าทดสอบภายในขวดเก็บตัวอย่าง ผู้วิจัยเลือกใช้ผ้าใหม่ดั้งเดิมเป็นตัวแทนผ้าทดสอบ และเลือกใช้สารโทลูอินเป็นตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

ภาพประกอบ 20 แสดงขั้นตอนการทดสอบ เริ่มทดสอบโดยดูดไอระเหยโทลูอิน ปริมาตร 0.1 mL (คำนวณเป็นมวลสารต่อปริมาตรอากาศเท่ากับ  $0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ด้วยเข็มฉีดยาขนาด 1 mL ฉีดลงในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 mL ซึ่งภายในขวดตัวอย่างแขวนผ้าทดสอบ และขวดตัวอย่างที่ไม่แขวนผ้าทดสอบ จากนั้นเขย่าด้วยความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที ควบคุมอุณหภูมิที่  $30^\circ \text{C}$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า และเริ่มสกัดตัวอย่าง 3 นาที นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID โดยใช้เวลาคาย 3 นาที ทำการทดลอง 2 ซ้ำ



ภาพประกอบ 20 ขั้นตอนการทดสอบการรั่วของขวดเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิค SPME และ GC-FID

สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-FID สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารโทลูอิน โดยคอลัมน์ Rtx<sup>®</sup>-5MS ขนาด  $30 \times 0.25 \text{ mm}$  อุณหภูมิคอลัมน์  $40^\circ \text{C}$  อุณหภูมิจุดฉีด  $250^\circ \text{C}$  (Shimadzu, Japan)

ตาราง 19 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารโทลูอิน

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้พีค		ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโทลูอิน	
	ไม่มีด้ายแขวน	มีด้ายแขวน	ไม่มีด้ายแขวน	มีด้ายแขวน
0	$1.66 \times 10^6$	$2.49 \times 10^6$	-	
5	$1.45 \times 10^6$	$1.71 \times 10^6$	12.57	31.27
10	$1.34 \times 10^6$	$1.56 \times 10^6$	7.40	8.66

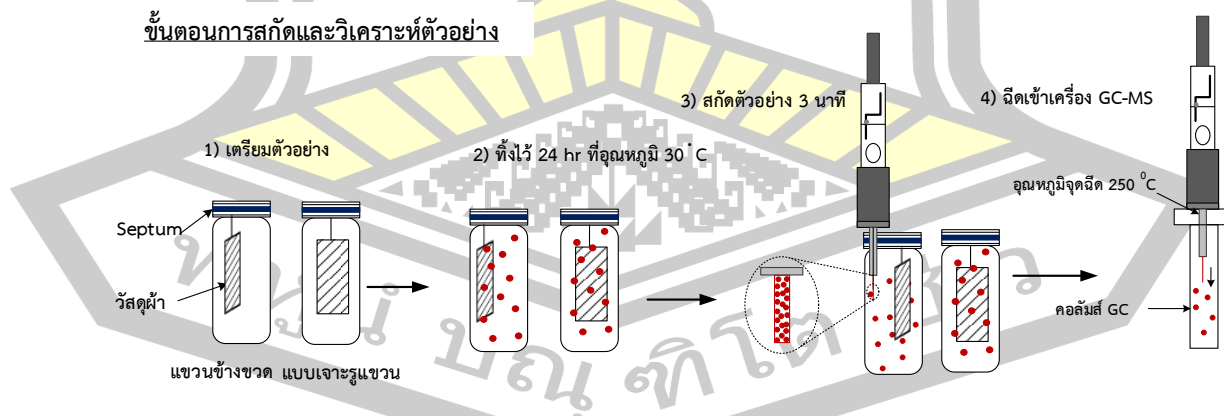
จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้นของโทลูอินระหว่างภายในขวดตัวอย่างที่แขวนผ้าทดสอบ กับไม่แขวนผ้าทดสอบ พบว่า ที่ระยะเวลา 0 นาที จนถึง 10 ชั่วโมง ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารโทลูอินเท่ากับ 9 สำหรับการทดลองแขวนผ้า และร้อยละ

ผลการเปลี่ยนแปลงของโทลูอินเท่ากับ 7 สำหรับการทดลองไม่แขวนผ้า แสดงดังตาราง 19 จากผลการทดสอบ พบว่ารูที่เกิดจากการเจาะแขวนผ้าทดสอบภายในขวดเก็บตัวอย่างไม่มีผลต่อการรั่วออกของสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

### 3.7.3 การทดสอบรูปแบบการแขวนผ้าทดสอบภายในขวดเก็บตัวอย่าง

การประกันคุณภาพการวิจัยนี้ผู้วิจัยนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบรูปแบบการแขวนผ้าทดสอบในขวดเก็บตัวอย่าง เนื่องจากการแขวนผ้าทดสอบอาจมีผลต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย โดยเลือกใช้โทลูอินเป็นตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ และเลือกผ้าไหมดั้งเดิมเป็นตัวแทนผ้าทดสอบ เนื่องจากผ้าดั้งเดิมเป็นผ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพใดๆ และจากการทดสอบการตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบที่ผ่านมา พบว่า ผ้าดั้งเดิมจะปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยออกมามากกว่าสภาวะการทดสอบอื่น ซึ่งอาจมีผลต่อการรั่วออกจากการแขวนผ้าทดสอบภายในขวดเก็บตัวอย่างได้ เริ่มการทดสอบโดย ตัดผ้าขนาด  $1.5 \times 4 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำไปแขวนภายในขวดตัวอย่าง โดยใช้วิธีแขวน 2 วิธี คือแบบเจาะ กล่าวคือการแขวนผ้าทดสอบผ่านการเจาะรูผ่านยางกันรั้ว และแบบแขวน คือการแขวนผ้าทดสอบผ่านยางกันรั้ว แสดงดังภาพประกอบ 21 จากนั้นเขย่าด้วยความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทดสอบ เริ่มสกัดตัวอย่าง 3 นาที และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS โดยใช้เวลาดำย 3 นาที ที่สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารโทลูอิน โดยคอลัมน์ Rtx<sup>®</sup>-5MS ขนาด  $30 \times 0.25 \text{ mm}$  อุณหภูมิคอลัมน์  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิจุดฉีด  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Shimadzu, Japan) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

#### ขั้นตอนการสกัดและวิเคราะห์ตัวอย่าง



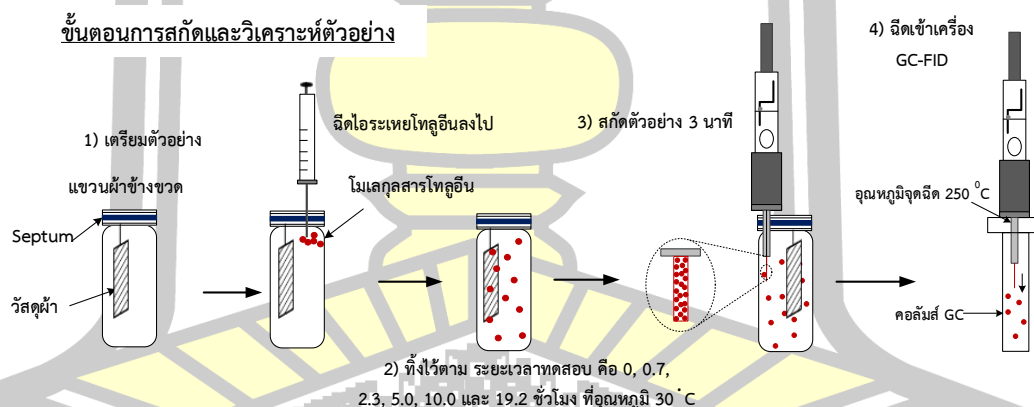
ภาพประกอบ 21 ขั้นตอนการทดสอบรูปแบบการแขวนผ้าทดสอบ

จากการทดสอบ พบว่าพื้นที่โครมาโทแกรมของการแขวนแบบเจาะ และแบบแขวนผ่านยางกันรั้ว มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งร้อยละความต่างมีค่าเท่ากับ 4 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกรูปแบบการแขวนของการทดลองที่ 2 เป็นแบบแขวนผ่านยางกันรั้ว เนื่องจากมีความง่ายต่อการแขวนผ้าตัวอย่างในขวด

### 3.7.4 การทดสอบหาระยะเวลาการดูดซับ

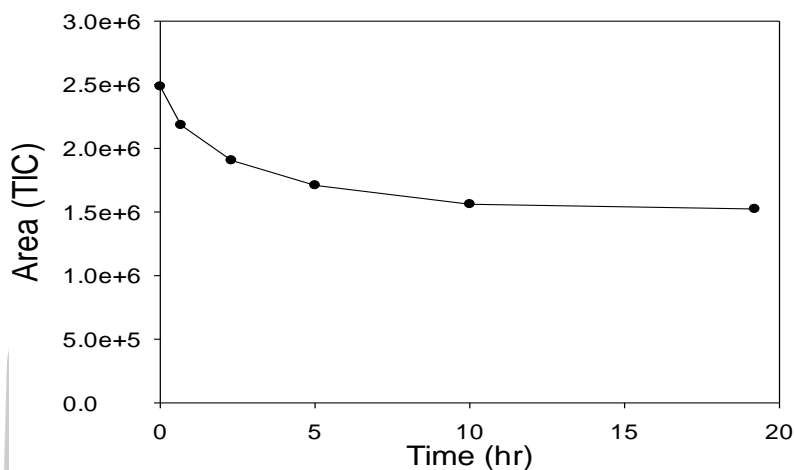
การประกันคุณภาพการวิจัยนี้ผู้วิจัยนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการหาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ โดยเลือกใช้ผ้าไหมดั้งเดิมเป็นตัวแทนผ้าทดสอบ และเลือกใช้สารโพลูอินเป็นตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

ภาพประกอบ 22 แสดงขั้นตอนการทดสอบ เริ่มทดลองโดยดูดไอระเหยโพลูอินปริมาตร 0.1 mL (คำนวณเป็นมวลสารต่อปริมาตรอากาศเท่ากับ  $0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ด้วยเข็มฉีดยาขนาด 1 mL ฉีดลงในขวดเก็บตัวอย่างปริมาตร 20 mL ซึ่งภายในขวดตัวอย่างแขวนผ้าทดสอบ จากนั้นเขย่าด้วยความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ  $30^\circ \text{C}$  ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า ที่ระยะเวลาทดสอบ คือ 0, 0.7, 2.3, 5.0, 10.0 และ 19.2 ชั่วโมง เริ่มสกัดตัวอย่าง 3 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID ที่สภาวะการทำงานของเครื่องเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.7.1 โดยใช้เวลาคาย 3 นาที ทำการทดลอง 2 ซ้ำ



ภาพประกอบ 22 ขั้นตอนการทดสอบหาระยะเวลาการดูดซับ

จากการทดสอบหาเวลาจุดสมดุลของไอระเหยโพลูอิน พบว่า เวลาที่ 0-10 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นไอระเหยโพลูอินลดลงเรื่อยๆ และเริ่มคงที่หลังจากชั่วโมงที่ 10 เป็นต้นไป ดังภาพประกอบ 23 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ผ้าเกิดการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ในอากาศภายในขวดเก็บตัวอย่าง



ภาพประกอบ 23 ความเข้มข้นไอระเหยโทลูอินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

### 3.8 สรุปรายละเอียดการดำเนินการวิจัย

ตาราง 20 สรุปตัวแปรต่างๆ ในแต่ละการทดลอง ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง 1 การพัฒนาวิธีการตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยวิธี SPME และ GC-MS เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหย และค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง 2 การตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้า ค่าตัวแปรในการทดลองที่ 3 ผลของความสกปรกของผ้าต่อความสามารถผ้าในการดูดซับสารนิโคติน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การดูดซับของผ้าแต่ละชนิดที่ได้จากการทำนายด้วยสมการแบบฟรุนดลิช,  $K_f$  และ  $n$  และค่าตัวแปรในการทดลองที่ 4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมี ของผ้า

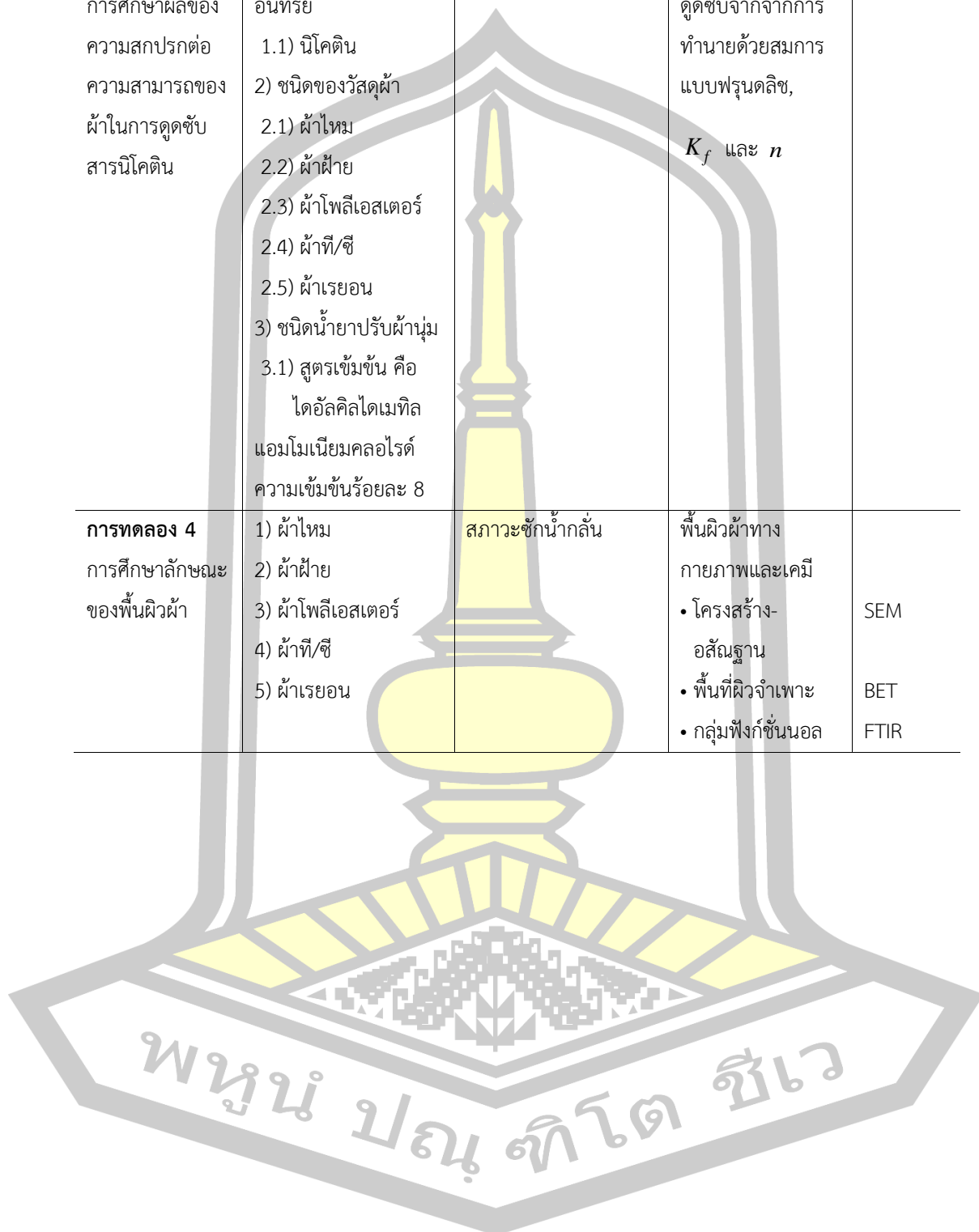
พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 20 ตัวแปรในการทดลอง

การทดลอง	ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม	เครื่องมือวิเคราะห์
การทดลอง 1 การประเมิน วิธีการตรวจวัด สารมลพิษอินทรีย์ ระเหย	1) เวลาสกัด (นาที): 1, 2, 3, 5, 10 2) เวลาคาย (นาที): 0.5, 1, 2, 3, 5	1) อุณหภูมิสกัด 25 °C 2) เวลาระเหย 10 นาที 3) ความเข้มข้นสาร มลพิษอินทรีย์ทดสอบ เท่ากับ 5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	สภาวะสกัดและคาย ที่เหมาะสมสำหรับ วิเคราะห์หาปริมาณ สารVOCs	GC-MS
การทดลอง 2 การตรวจวัดสาร มลพิษอินทรีย์ ระเหยจากผ้า	1) ผ้าทดสอบ 1.1) ผ้าไหม 1.1.1) ย้อมธรรมชาติ 1.1.2) ย้อมเคมี 1.2) ผ้าฝ้าย 1.3) ผ้าโพลีเอสเตอร์ 1.4) ผ้าที/ซี 1.5) ผ้าเรยอน 2) สภาวะทดสอบ 2.1) ตั้งเดิม 2.2) ชักน้ำกลั่น 2.3) ชักน้ำยาสูตร ธรรมดา 2.4) ชักน้ำยาสูตร เข้มข้น	1) อุณหภูมิ 30 °C 2) เวลา 24 ชั่วโมง	1) ชนิด VOCs 2) ปริมาณTVOC	GC-MS

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

<p><b>การทดลอง 3</b></p> <p>การศึกษาผลของ ความสกปรกต่อ ความสามารถของ ผ้าในการดูดซับ สารนิโคติน</p>	<p>1) ชนิดสารมลพิษ อินทรีย์</p> <p>1.1) นิโคติน</p> <p>2) ชนิดของวัสดุผ้า</p> <p>2.1) ผ้าไหม</p> <p>2.2) ผ้าฝ้าย</p> <p>2.3) ผ้าโพลีเอสเตอร์</p> <p>2.4) ผ้าที/ซี</p> <p>2.5) ผ้าเรยอน</p> <p>3) ชนิดน้ำยาปรับผ้านุ่ม</p> <p>3.1) สูตรเข้มข้น คือ ไดอัลคิลไธเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 8</p>	<p>1) อุณหภูมิ 25 °C</p>	<p>ค่าพารามิเตอร์การ ดูดซับจากการ ทำนายด้วยสมการ แบบฟรุนดลิช, <math>K_f</math> และ <math>n</math></p>	<p>GC-FID</p>
<p><b>การทดลอง 4</b></p> <p>การศึกษาลักษณะ ของพื้นผิวผ้า</p>	<p>1) ผ้าไหม</p> <p>2) ผ้าฝ้าย</p> <p>3) ผ้าโพลีเอสเตอร์</p> <p>4) ผ้าที/ซี</p> <p>5) ผ้าเรยอน</p>	<p>สภาวะชกน้ำกลั่น</p>	<p>พื้นผิวผ้าทาง กายภาพและเคมี</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• โครงสร้าง-</li> <li>อสังฐาน</li> <li>• พื้นผิวจำเพาะ</li> <li>• กลุ่มฟังก์ชันนอล</li> </ul>	<p>SEM</p> <p>BET</p> <p>FTIR</p>



## บทที่ 4

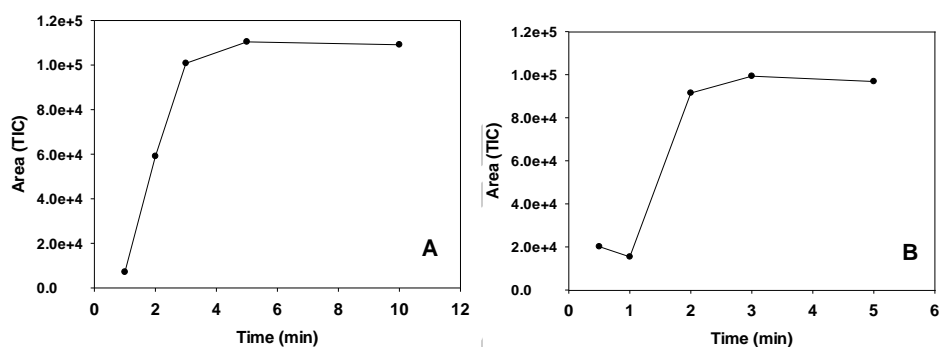
### ผลการวิจัย และการอภิปราย

ผลการวิจัย ผู้วิจัยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักตามการวิธีดำเนินการวิจัย ได้แก่ 1) ผลการประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS 2) ชนิด และปริมาณของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ 3) ผลของความสามารถต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน และ 4) ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และเคมีของผ้าทดสอบ

#### 4.1 ผลการประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS

ภาพประกอบ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของเวลาสกัดและเวลาคาย ต่อโครมาโทแกรม (chromatogram) ของสารโกลูอิน โดยพื้นที่โครมาโทแกรมแสดงถึงปริมาณของโกลูอินที่เครื่อง GC-MS ตรวจวัดได้ โดยภาพประกอบ 24 (A) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครมาโทแกรมของสารโกลูอินกับระยะเวลาสกัด ที่ระยะเวลาทดสอบ คือ 1, 2, 3, 5 และ 10 นาที และภาพประกอบ 24 (B) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครมาโทแกรมของสารโกลูอินกับเวลาคาย ที่ระยะเวลาทดสอบ คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 5 นาที ทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง โดยค่าร้อยละเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviation, %RSD) ที่ได้มีค่าต่ำกว่า 5 นั้นหมายความว่าวิธีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์มีความถูกต้อง (accuracy) และแม่นยำ (precision) สูง [51]

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 24 โครมาโทแกรมของสารโพลูอินที่ (A) ระยะเวลาสกัด และ (B) ระยะเวลาการคาย

จากผลการทดสอบระยะเวลาสกัดและคาย พบว่า ในช่วงเวลาที่ 0-3 นาที โครมาโทแกรมของสารโพลูอินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่หลังจากเพิ่มเวลามากกว่า 3 นาที สำหรับตาราง 21 แสดงสถานะที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหย เช่น สารโพลูอิน เบนซีน ไซลีน เอทิลเบนซีน พบว่า ระยะเวลาสกัดอยู่ในช่วง 2-30 นาที และระยะเวลาคายอยู่ในช่วง 1-10 นาที ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกสถานะที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่เวลาสกัดและคาย 3 นาที สำหรับการทดสอบครั้งต่อไป เนื่องจากได้ค่าโครมาโทแกรมสารโพลูอินสูงกว่าร้อยละ 80 ของค่าสูงสุดที่วัดได้ และเป็นเวลาที่สะดวกของผู้วิจัยต่อการเก็บและวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามสถานะที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหย ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการสกัดและการคายเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นอีกด้วย เช่น การเลือกชนิดของ SPME-fiber ที่เหมาะสมกับสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ต้องการทดสอบด้วย

พูนุ ปณุกิตโต ชีวะ

ตาราง 21 สภาวะทดสอบสำหรับการวิเคราะห์สารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME

งานวิจัย	ชนิดไฟเบอร์	สารที่ต้องการวิเคราะห์	สภาวะ		การวิเคราะห์
			เวลาสกัด (นาที)	เวลาคาย (นาที)	
[62]	PDMS-DVB	ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	2	1	GC-FID
[56]	PDMS	โทลูอิน คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) เตตราคลอโรมีเทน (carbon tetrachloride) ไซลีน (p-Xylene) เดกเคน (n-decane)	15	1	GC-MS
[51]	PDMS-DVB	สาร BTEX	1	0.5	GC-FID
[63]	PDMS-CAR	สาร BTEX	30	2	GC-FID GC-MS
[60]	PDMS-CAR	สาร WOCs	10	10	GC-FID GC-MS

WOCs= Very Volatile Organic Compounds, BTEX=Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene

ตาราง 21 สภาวะการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์สารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME (ต่อ)

งานวิจัย	ชนิดไฟเบอร์	สารที่ต้องการวิเคราะห์	สภาวะ		การวิเคราะห์
			เวลาสกัด (นาที)	เวลาคาย (นาที)	
[60]	PDMS-CAR	สาร VOC	10	10	GC-MS
[19]	CW/DVB	ควีนบูทรี	10	10	GC-MS
[61]	PDMS-CAR	สาร BTEX	5	3	GC-FID
งานวิจัยนี้	DVB/CAR/PDMS	สารโพลูอิน	3	3	GC-MS

## 4.2 ชนิด และปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ

ผู้วิจัยเลือกทดสอบผ้า 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการย้อม (ดั้งเดิม) ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางธรรมชาติ ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมเคมี ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ทุกการทดลองทำที่อุณหภูมิทดสอบ  $30^{\circ}\text{C}$  ทำการทดลอง 2 ชั่วโมง สภาวะทดสอบ 4 สภาวะ ซึ่งจะกำหนดเป็น “สัญลักษณ์” ดังนี้

“ดั้งเดิม” คือ ผ้าดั้งเดิม ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (สภาวะทดสอบ 1 ในหัวข้อ 3.3.1.2)

“น้ำกลั่น” คือ ผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่น (สภาวะทดสอบ 2 ในหัวข้อ 3.3.1.2)

“สูตรธรรมดา” คือ ผ้าที่ผ่านการซักน้ำกลั่นแล้วแช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา (สภาวะทดสอบ 3 ในหัวข้อ 3.3.1.2)

“สูตรเข้มข้น” คือ ผ้าที่ผ่านการซักน้ำกลั่นแล้วแช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น (สภาวะทดสอบ 4 ในหัวข้อ 3.3.1.2)

### 4.2.1 ชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบ

#### 4.2.1.1 ผ้าไหม

ตาราง 22-24 แสดงชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าไหมที่ไม่ผ่านการย้อม ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางธรรมชาติ และผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมี ตามลำดับ พบว่า การทดสอบที่สภาวะผ้า “ดั้งเดิม” ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการย้อม และผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางธรรมชาติ ปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยกลุ่มแอลเคน เช่น สาร 2,2-dimethyldecane และกลุ่มแอลกอฮอล์ (alcohols) เช่น 2-ethylhexanol ออกมา ส่วนผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมี ปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยกลุ่มแอลกอฮอล์ เช่น สาร n-butanol, กลุ่มอะโรมาติก (aromatics) เช่น สารโทลูอีน และกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyls) เช่น สาร nonanal ออกมา จากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการย้อมมีผลทำให้ลักษณะพื้นผิวของผ้าไหมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมีปลดปล่อยสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ออกมา ซึ่งเป็นสารที่ถูกใช้ในผงย้อมเคมีโดยตรง โดยสามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบสีย้อมในหัวข้อ 4.1.2.1 ผลชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากสีย้อมเคมี

เมื่อพิจารณาผ้าไหมที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่นมีข้อน่าสังเกตว่า กลุ่มสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากผ้าไหมโดยส่วนใหญ่เป็นสารที่มีอยู่เดิมในผ้า ทั้งนี้ผู้วิจัยทดสอบภายใต้

สภาวะการซักด้วยน้ำกลั่นเพียง 1 ครั้งเท่านั้น ดังนั้นผ้าไหมที่ผ่านการซักล้างทำความสะอาดครั้งแรกด้วยน้ำอาจไม่มีผลต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในเชิงคุณภาพ แต่มีผลในเชิงปริมาณที่มีค่าลดลง เนื่องจากสารบางตัวที่มีอยู่เดิมในผ้าละลายน้ำไป เช่น สาร nonanal ซึ่งเป็นสารอัลดีไฮด์ (aldehyde) เป็นองค์ประกอบ มีสมบัติละลายน้ำได้ดี โดยค่าการละลายน้ำของสาร nonanal มีค่าเท่ากับ 96 ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  [68] ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าการซักด้วยน้ำมีโอกาสทำให้สารละลายไป อย่างไรก็ตามการทดลองครั้งต่อไปผู้วิจัยควรเพิ่มการศึกษาผลของจำนวนซักด้วยน้ำกลั่นต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหย เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน

พิจารณาสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากการปลดปล่อยจากผ้าไหมทั้ง 3 แบบที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และสูตรเข้มข้น เมื่อเทียบกับผ้าที่ผ่านการซักน้ำกลั่น พบว่า สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาอยู่ในกลุ่มเอสเทอร์ (ester) เช่น สาร hexyl acetate และ ethyl 2-methylbutyrate กลุ่มเทอร์พีนอยด์ (terpenoid) เช่น สารดี-ลิโมนีน (d-limonene) และกลุ่มมอโนเทอร์พีน เช่น สารยูคาลิปทอล (eucalyptol) ในขณะที่ผ้าทดสอบที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่นกลับไม่พบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยที่เป็นองค์ประกอบในน้ำยาปรับผ้านุ่มเกิดการสะสมบนเนื้อผ้า และสามารถระเหยได้ที่สภาวะอุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  โดยสามารถยืนยันได้ว่าเป็นสารที่มาจากน้ำยาปรับผ้านุ่มซึ่งอภิปรายในหัวข้อ 4.1.2.2

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการย้อมระหว่างการย้อมทางธรรมชาติ และการย้อมทางเคมี เทียบกับผ้าไหมสภาพดั้งเดิม พบว่า ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางธรรมชาติปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในกลุ่มเดิมที่มีในผ้า แต่ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมีปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยนอกเหนือจากที่มาจากตัวผ้าเดิมแล้วยังมีสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่มาจากสีย้อม นั้นหมายความว่าผู้สวมใส่เสื้อผ้าที่ผ่านการย้อมมีโอกาสสัมผัสสารมลพิษอินทรีย์ระเหยมากกว่าผู้ที่สวมใส่เสื้อผ้าที่ไม่ย้อม ซึ่งการสัมผัสสารมลพิษอินทรีย์ระเหยมีผลทำให้เกิดอาการระคายเคืองผิวหนัง หรืออาการระคายเคืองจมูกเมื่อสูดดมสารเข้าสู่ร่างกาย และงานวิจัยของ [44] [19] ศึกษาการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ควินบูรีด้วยผ้า พบว่า สมบัติของผ้า เช่น โครงสร้างเส้นใย การย้อมสี การเติมแต่งสารในผ้าดิบ มีผลต่อการดูดซับ และการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมา

ตาราง 22 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าไหมไม่ย้อม

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สภาวะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
ethyl 2-methylbutyrate	7.0	nd	nd	√	√
2,2-dimethyldecane	15.9	√	√	nd	nd
5,6-dimethylundecane	17.2	√	√	nd	nd
hexyl acetate	18.9	nd	nd	√	nd
d-limonene	19.6	nd	nd	√	nd
eucalyptol	19.8	nd	nd	√	√
5,5-dimethylundecane	20.2	√	√	nd	nd
2-ethylhexanol	20.4	√	√	√	√

RT= GC retention time, √ = Detected, nd = Non detected

ตาราง 23 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติ

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สภาวะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
toluene	4.1	nd	nd	nd	√
ethyl 2-methylbutyrate	7.0	nd	nd	√	√
heptanal	9.5	nd	nd	√	nd
nonanal	10.4	nd	nd	nd	√
2,2-dimethyldecane	15.7	√	√	√	√
d-limonene	19.6	nd	nd	√	√
2-ethylhexanol	20.3	√	√	nd	nd

พหุบัน ปณ กิจโต ชีเว

ตาราง 24 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสีเคมี

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สภาวะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
n-butanol (มาจากสีย้อม)	2.4	✓	✓	nd	nd
toluene	4.0	✓	✓	✓	✓
ethyl 2-methylbutyrate	7.0	nd	nd	nd	✓
nonanal	10.7	✓	nd	nd	nd
2,2-dimethyldecane	15.7	✓	✓	✓	✓
eucalyptol	19.7	nd	nd	nd	✓

#### 4.2.1.2 ผ้าฝ้าย

ตาราง 25 แสดงชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าฝ้ายที่สภาวะทดสอบ 4 สภาวะ พบว่า ผ้าฝ้ายปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในกลุ่มแอลเคน เช่น สาร 2,2-dimethyldecane และกลุ่มอะโรมาติก เช่น สารโทลูอิน และงานวิจัยที่ผ่านมาของ [19] ตรวจสอบพบกลุ่มสารอะโรมาติก เช่น สารโทลูอินปลดปล่อยจากผ้าฝ้ายสภาพดั้งเดิมเช่นเดียวกัน

พิจารณาผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำกลั่น และน้ำยาปรับผ้านุ่ม พบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันกับผ้าไหม กล่าวคือ เมื่อนำผ้าฝ้ายมาซักด้วยน้ำกลั่น สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาเป็นสารที่มีอยู่เดิมในผ้าฝ้าย แต่เมื่อนำผ้าฝ้ายไปซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม พบว่าสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาเป็นสารที่มีอยู่ในน้ำยาปรับผ้านุ่ม เช่น สาร d-limonene และ eucalyptol แสดงดังตาราง 25 โดยยืนยันผลข้อมูลจากการทดสอบของการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์จากน้ำยาปรับผ้านุ่มโดยตรงในหัวข้อ 3.3.1.3 และสารทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกพบในผ้าไหมเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าไหมที่ไม่ย้อม และผ้าฝ้ายแบบสภาพดั้งเดิม พบว่าผ้าไหม และผ้าฝ้ายปลดปล่อยสารในกลุ่มแอลเคน เช่น สาร 2,2-dimethyldecane เหมือนกัน แต่กลับไม่พบสารโทลูอินในผ้าไหม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากโทลูอินอาจถูกนำมาใช้ในกระบวนการเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติให้แก่ผ้าฝ้ายดิบ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าโทลูอินที่ปลดปล่อยออกมามีแหล่งกำเนิดจากการเติมแต่งจากกระบวนการผลิต [69] [70]

ตาราง 25 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าฝ้าย

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สภาวะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
toluene	4.1	✓	✓	✓	✓
2,2-dimethyldecane	15.8	✓	✓	✓	✓
limonene	19.5	nd	nd	nd	✓
eucalyptol	19.7	nd	nd	nd	✓

จากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าสารแอลเคน และอะโรมาติก ที่ปลดปล่อยจากผ้าฝ้าย มีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่สวมใส่โดยตรง เช่น การระคายเคืองผิวจากการสัมผัสสารมลพิษทางผิวหนัง และการสวมใส่ผ้าฝ้ายยังมีโอกาสที่จะได้รับสารมลพิษอินทรีย์เข้าสู่ร่างกายเพิ่มมากขึ้นเพราะปริมาณสารมลพิษที่สะสมหรือติดที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวผ้าฝ้ายมีสมบัติมีขั้ว ที่สามารถดูดติดกับโมเลกุลสารอื่นได้ดี และจากการวิจัยของ [71] [19] [12] กล่าวว่า ผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ เช่น ผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผ้าขนสัตว์ จะดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ได้ดีกว่าผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์

#### 4.2.1.3 ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าเรยอน และผ้าที/ซี

ตาราง 26-28 แสดงชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าเรยอน และผ้าที/ซี พบว่า ผ้าผ้าโพลีเอสเตอร์และผ้าที/ซี ที่สภาพ “ดั้งเดิม” ปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหยออกมาเป็นสารกลุ่มเดียวกัน คือ กลุ่มแอลเคน และกลุ่มแอลคีน ซึ่งมีสมบัติมีขั้วเดียว (monopolar) และกลุ่มแอลกอฮอล์ ซึ่งมีสมบัติสองขั้ว (bipolar) ในขณะที่ผ้าเรยอนตรวจไม่พบสารมลพิษอินทรีย์ระเหย ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าอาจเกิดคามผิดพลาดในระหว่างทำการทดสอบ และผู้วิจัยไม่ได้ทำการทดลองซ้ำ

เมื่อพิจารณาผ้าที่ซักด้วยน้ำกลั่น และน้ำยาปรับผ้านุ่ม พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันกับผ้าไหม กล่าวคือเมื่อนำผ้าทดสอบมาซักด้วยน้ำกลั่นสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาเป็นสารที่มีอยู่เดิมในผ้า และเมื่อนำผ้าทดสอบที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม พบว่าสารที่ปลดปล่อยออกมาเป็นสารที่มีอยู่ในน้ำยาปรับผ้านุ่ม

ตาราง 26 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าโพลีเอสเตอร์

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สถานะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สุตรธรรมดา	สุตรเข้มข้น
toluene	4.1	✓	✓	✓	✓
ethyl 2-methylbutyrate	7.0	nd	nd	nd	✓
2,2-dimethyldecane	15.8	✓	✓	nd	✓
limonene	19.5	nd	nd	nd	✓
eucalyptol	19.7	nd	nd	✓	✓
2-ethylhexanol	20.3	✓	✓	✓	✓

ตาราง 27 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าเรยอน

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สถานะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สุตรธรรมดา	สุตรเข้มข้น
toluene	4.1	nd	✓	✓	✓
4,4-dimethyl-2-oxetanone	5.1	nd	✓	✓	✓
2,2-dimethyldecane	15.8	nd	✓	✓	✓
eucalyptol	19.7	✓	nd	✓	✓
2-ethylhexanol	20.3	nd	✓	✓	✓

ตาราง 28 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าที/ซี

สารมลพิษอินทรีย์ระเหย	RT(นาที)	สถานะทดสอบ			
		ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สุตรธรรมดา	สุตรเข้มข้น
toluene	4.1	✓	✓	✓	✓
4,4-dimethyl-2-oxetanone	5.1	✓	✓	✓	✓
ethyl 2-methylbutyrate	7.0	nd	nd	nd	✓
nonanal	12.7	✓	nd	nd	nd
2,2-dimethyldecane	15.8	✓	✓	✓	✓
eucalyptol	19.7	nd	nd	✓	✓
2-ethylhexanol	20.3	✓	✓	✓	✓

จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นได้ชัดเจนว่า การปรับสภาพผ้าแบบต่างๆ มีผลต่อชนิดของสารมลพิษอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมา ที่มีผลกระทบต่อเชิงสุขภาพโดยตรงต่อผู้ที่สวมใส่เสื้อผ้าที่อาจสัมผัสสารตลอดเวลาดำเนินกิจกรรมในแต่ละวัน และอาจมีโอกาสได้รับสารมลพิษอินทรีย์เข้าสู่ร่างกายเพิ่มขึ้น จากปริมาณการสะสมหรือติดที่พื้นผิวที่อาจเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานของผ้า และสมบัติของผ้า เช่น โครงสร้างการถักทอ ลักษณะเส้นใย (รายละเอียดกล่าวในหัวข้อสมบัติทางกายภาพและเคมีผ้า) และสมบัติทางเคมีดั้งเดิม หรือสมบัติเคมีที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมด้วยวิธีการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม หรือการย้อม เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับสารมลพิษอากาศชนิดอื่นๆ ได้อีก [44] [69] [70] [71] [19] [12]

#### 4.2.2 ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (TVOC) ที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบ

ตาราง 29 แสดงค่าปริมาณสาร TVOC ของผ้าทั้ง 5 ชนิด พิจารณาที่ผ้าไหม ทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ผ้าไหมที่ไม่ย้อม ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางธรรมชาติ และผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมี ที่สภาวะทดสอบ 4 สภาวะ ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  พบว่า ผ้าไหม 3 ชนิดที่สภาพ “ดั้งเดิม” มีปริมาณ TVOC ที่ปลดปล่อยออกมามีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ  $32.1\text{-}84.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  จากนั้นเมื่อนำผ้าไหมไปซักด้วยน้ำกลั่น พบว่า ปริมาณ TVOC มีค่าลดลงประมาณ 1-2 เท่า ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ระเหยที่มีอยู่เดิมในผ้าอาจถูกกำจัดออกด้วยน้ำกลั่น จากงานวิจัยของ [12] พบว่า การซักล้างผ้ามีผลทำให้สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนบนผ้าถูกกำจัดออก

เมื่อพิจารณาผ้าไหมที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม พบว่าสีย้อมมีผลต่อการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะผ้าไหมย้อมเคมีเมื่อซักน้ำยาปรับผ้านุ่มทำให้ปริมาณ TVOC ลดลง 0.6 เท่าเทียบกับผ้าไหมย้อมเคมีที่ซักด้วยน้ำกลั่น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าสีย้อมที่เคลือบผิวผ้าไหมอาจเป็นตัวขัดขวางไม่ให้สารในน้ำยาปรับผ้านุ่มไปติดบนพื้นผิวผ้าแล้วจึงทำให้ปริมาณ TVOC ที่ปล่อยออกมามีค่าลดลง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณสารในน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ปลดปล่อยออกมา ซึ่งผู้วิจัยจะกล่าวในหัวข้อ 4.2.4 ในลำดับถัดไป

พหุบัน ปณฺ ติโต ชิว

ตาราง 29 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารมลพิษอินทรีย์ระเหย

ชนิดผ้า	ความเข้มข้นสาร TVOC ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )			
	ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
ไหม	51.9	41.3	125.3	26.9
ไหมย้อมธรรมชาติ	32.1	17.3	68.7	139.0
ไหมย้อมเคมี	84.6	81.3	54.1	52.8
ฝ้าย	33.5	17.3	23.4	66.3
โพลีเอสเตอร์	32.5	33.8	42.0	48.1
เรยอน	*	21.8	55.6	78.0
ที/ซี	42.0	20.5	52.9	59.4

หมายเหตุ \* ข้อมูลที่ได้ไม่มีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดระหว่างทดสอบ

ผ้าฝ้ายทั้ง 4 สภาวะ พบว่า ผ้าฝ้าย สภาพ “ดั้งเดิม” ปลดปล่อยปริมาณสาร TVOC ออกมามีค่าเท่ากับ  $33.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผ้าไหมไม่ย้อม ผ้าโพลีเอสเตอร์ และผ้าที/ซี แต่เมื่อนำผ้าฝ้ายไปซักด้วยน้ำกลั่น พบว่าปริมาณสาร TVOC มีค่าลดลงประมาณ 2 เท่า ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ระเหยที่มีอยู่เดิมในผ้าอาจถูกกำจัดออกด้วยน้ำกลั่น [12] และเมื่อพิจารณาผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา พบว่าปริมาณ TVOC มีค่าเพิ่มขึ้น 1.4 เท่า และพิจารณาผ้าฝ้ายที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น พบว่า มีปริมาณ TVOC เพิ่มขึ้นถึง 3.8 เท่าอาจเนื่องมาจากสารในน้ำยาปรับผ้านุ่มเกิดการสะสมในผ้า และสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตามก็พื้นที่โครมาโทแกรมของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากน้ำยาปรับผ้านุ่ม ผู้วิจัยจะกล่าวละเอียดในหัวข้อถัดไป

เมื่อพิจารณาระหว่างผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าไหม และผ้าฝ้าย พบว่า ที่สภาพผ้าดั้งเดิมมีค่าปริมาณ TVOC ใกล้เคียงเคียงกัน คือ  $33.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  สำหรับผ้าไหม และ  $51.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  สำหรับผ้าฝ้าย เมื่อพิจารณาที่สภาวะซักด้วยน้ำกลั่น พบว่า ปริมาณ TVOC มีค่าลดลงเท่ากับ 1.3 เท่า สำหรับผ้าไหม และ 1.9 เท่า สำหรับผ้าฝ้าย และเมื่อพิจารณาผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดาเทียบกับผ้าที่ซักด้วยน้ำกลั่น พบว่า ปริมาณ TVOC ของผ้าไหมจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า และผ้าฝ้าย 1.3 เท่า แต่เมื่อพิจารณาผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น กลับพบว่าผ้าไหมมีค่าปริมาณ TVOC ลดลงเท่ากับ 0.65 เท่า ในขณะที่ผ้าฝ้ายมีค่าเพิ่มขึ้นกว่า 3.8 เท่าเทียบกับผ้าที่ซักน้ำกลั่น

พิจารณาผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ได้ ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าเรยอน และผ้าที/ซี พบว่า ผ้าที่สภาพ “ดั้งเดิม” มีปริมาณ TVOC อยู่ในช่วง  $5.2-42.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  ซึ่งผ้าเรยอน มีค่าปริมาณ TVOC ต่ำสุด ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าน่าจะเกิดจากความผิดพลาดระหว่างทำการทดสอบ และผู้วิจัยไม่ได้กลับไปทำการทดลองซ้ำ สำหรับผ้าโพลีเอสเตอร์ซีกน้ำกลั่นแล้ว TVOC ลดลง 1 เท่า ส่วนผ้าที/ซี ลดลง 2 เท่า เมื่อนำผ้าทั้งสามชนิดไปซักด้วยน้ำปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา พบว่า ปริมาณ TVOC มีค่าอยู่ในช่วง  $42-55.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นกว่ากรณีซีกน้ำกลั่นดังนี้ ผ้าโพลีเอสเตอร์ 1.2 เท่า ผ้าเรยอน 2.5 เท่า และ ผ้าที/ซี 2.6 เท่า และพิจารณาผ้าที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นเทียบกับผ้าที่ซีกด้วยน้ำกลั่น พบว่า ค่า TVOC มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับผ้าโพลีเอสเตอร์ 14.3 เท่า สำหรับผ้าเรยอน 56.2 เท่า และสำหรับผ้าที/ซี 38.9 เท่า ซึ่งจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าผ้าที่ซีกด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น มีค่าปริมาณ TVOC สูงกว่าสูตรธรรมดา ซึ่งจากผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบของการปล่อยปริมาณสารอินทรีย์ระเหยจากน้ำยาปรับผ้านุ่มโดยตรงในหัวข้อ 3.3.1.3

ตาราง 30 แสดงค่าปริมาณ TVOC ของผ้าทั้ง 7 ชนิด ที่สภาวะทั้ง 4 สภาวะ เมื่อคิดเทียบต่อพื้นที่ผ้า จะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณ TVOC ที่สภาวะดั้งเดิม อยู่ในช่วง  $0.1-1.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  โดยพบว่า ผ้าไหมย้อมเคมีที่สภาวะดั้งเดิม มีค่า TVOC สูงกว่าผ้าชนิดอื่น 1-16 เท่า

ตาราง 30 ปริมาณ TVOC ที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบ

ชนิดผ้า	ปริมาณ TVOC ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )			
	ดั้งเดิม	น้ำกลั่น	สูตรธรรมดา	สูตรเข้มข้น
ไหม	0.9	0.7	2.1	0.4
ไหมย้อมธรรมชาติ	0.5	0.3	1.1	2.3
ไหมย้อมเคมี	1.4	1.4	0.9	0.9
ฝ้าย	0.6	0.3	0.4	1.1
โพลีเอสเตอร์	0.5	0.6	0.7	0.8
ที/ซี	0.7	0.3	0.9	1.0
เรยอน	*	0.4	0.9	1.3

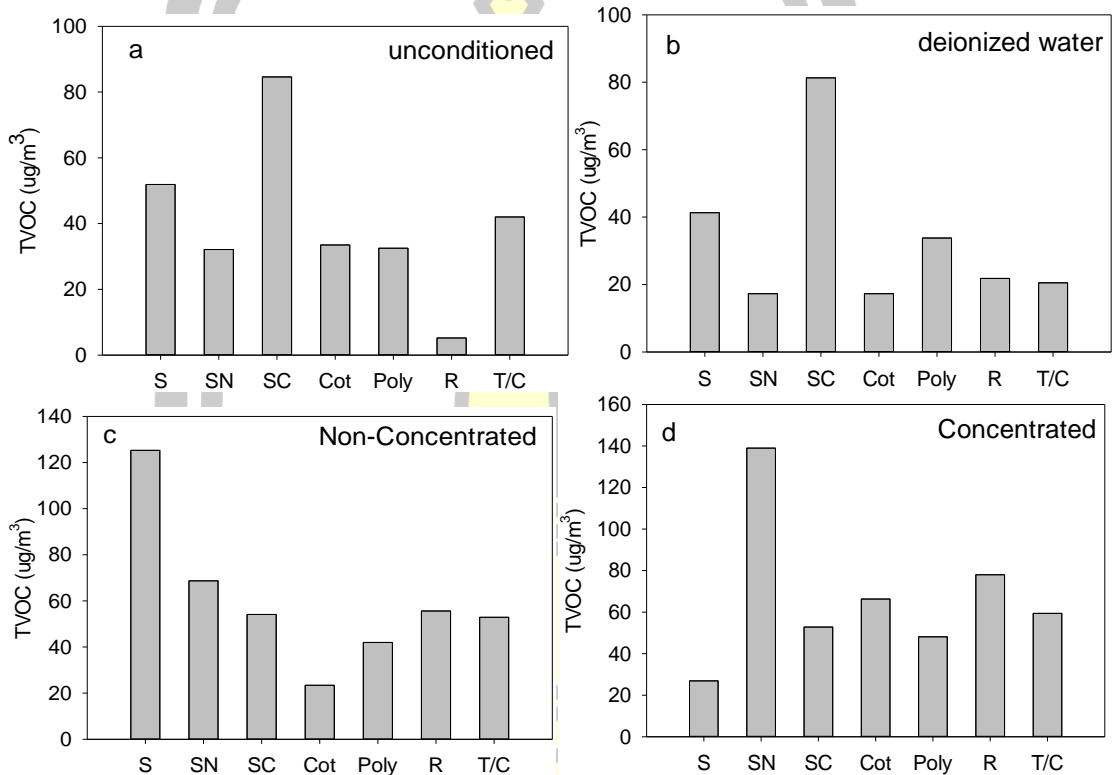
หมายเหตุ \* ข้อมูลที่ได้ไม่มีควมน่าเชื่อถือ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดระหว่างทดสอบ

พิจารณาเปรียบเทียบปริมาณ TVOC ของผ้าทดสอบทั้ง 7 ชนิด ที่สภาวะทดสอบ ทั้ง 4 สภาวะ ดังภาพประกอบ 25 โดยใช้สัญลักษณ์ย่อในภาพประกอบ คือ

S = silk คือ ผ้าไหม

SN = silk dye natural คือ ผ้าไหมที่ผ่านกรย้อมด้วยวิธีทางธรรมชาติ

SC = silk dye chemical คือ ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วยวิธีทางเคมี  
 Cot = cotton คือ ผ้าฝ้าย  
 Poly = polyester คือ ผ้าโพลีเอสเตอร์  
 R = rayon คือ ผ้าเรยอน  
 T/C = cotton+polyester คือ ผ้าที/ซี



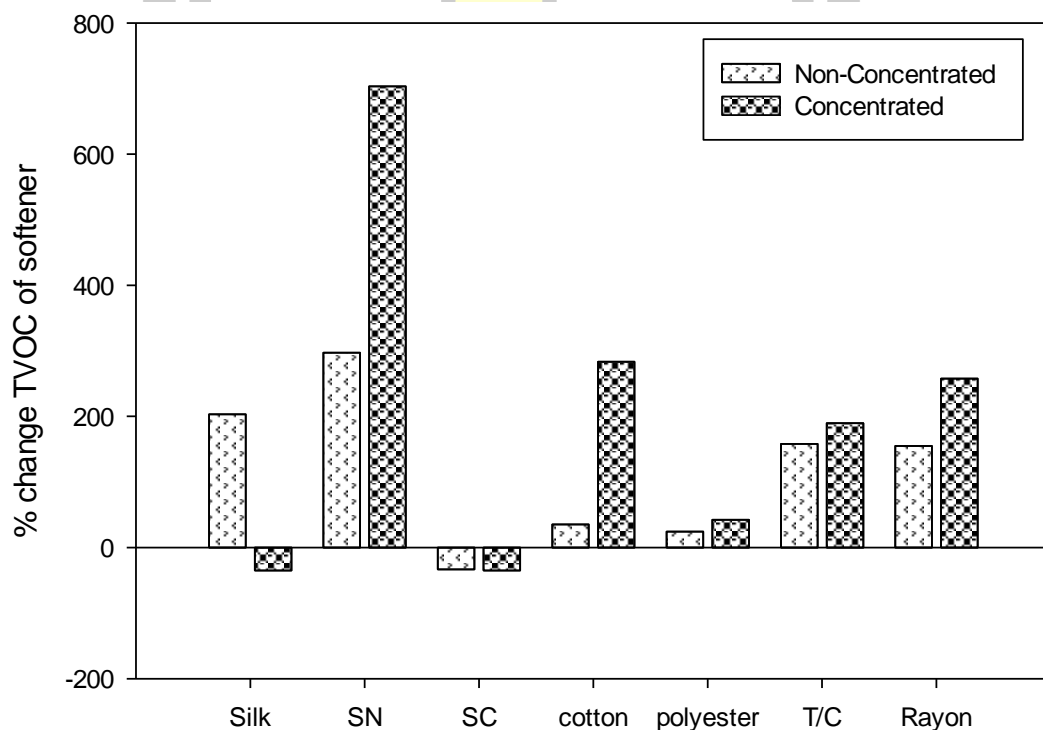
ภาพประกอบ 25 การเปรียบเทียบค่า TVOC ของผ้าทดสอบ ที่สภาวะทดสอบ 4 สภาวะ (a) ผ้าสภาพดั้งเดิม (b) ผ้าที่ซักด้วยน้ำกลั่น (c) ผ้าที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และ (d) ผ้าที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น

ผ้าที่สภาพดั้งเดิม แสดงดังภาพประกอบ 25 (a) พบว่า ปริมาณ TVOC ของผ้าทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง  $32.5-84.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  ยกเว้นผ้าเรยอนที่มีค่าปริมาณ TVOC ต่ำกว่าผ้าชนิดอื่นประมาณ 6-16 เท่า เมื่อนำผ้าไปผ่านการซักด้วยน้ำกลั่น แสดงดังภาพประกอบ 25 (b) พบว่าปริมาณ TVOC โดยส่วนใหญ่มีค่าลดลงประมาณ 1-2 เท่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ติดและสะสมในเนื้อผ้าถูกกำจัดออกด้วยน้ำกลั่น [12] ยกเว้นผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วยวิธีทางเคมีที่มีค่า TVOC เท่ากับ  $81.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  ใกล้เคียงกับปริมาณ TVOC ของผ้าที่สภาพดั้งเดิม เนื่องจาก

การย้อมมีผลให้สาร 2,2 dimethyldecane และ 5,6 dimethylundecane ที่มีอยู่ในพื้นผิวผ้า ตั้งเดิมถูกเคลือบหายไป และพบสาร n-butanol และ toluene ที่พื้นผิวแทน การซักด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ไม่มีผลให้สารทั้ง 2 ชนิด ละลายน้ำได้ ทำให้ค่า TVOC ที่ได้มีค่าใกล้เคียงเดิม

เมื่อพิจารณาผ้าทดสอบที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มทั้งสูตรธรรมดาและสูตรเข้มข้น แสดงดังภาพประกอบ 25 (c) และ 25 (d) ตามลำดับ พบว่า ปริมาณ TVOC ของผ้าทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ สูตรธรรมดา มีค่าอยู่ในช่วง  $23.4-125.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  และสูตรเข้มข้น  $66.9-139 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

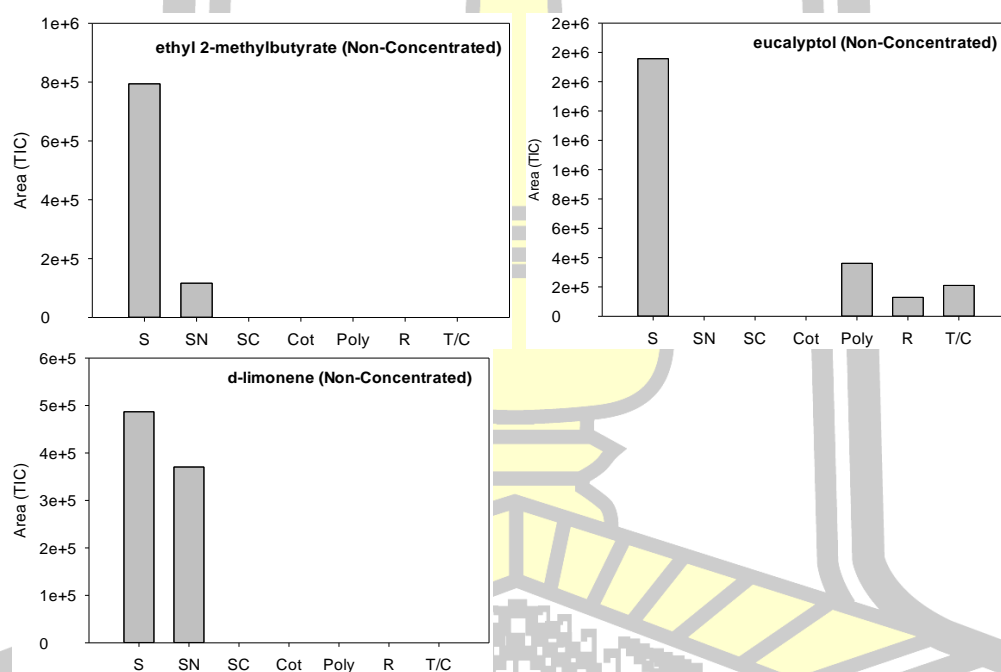
ภาพประกอบ 26 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TVOC ของผ้าทั้ง 7 ชนิดที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และสูตรเข้มข้นเทียบกับผ้าที่ซักน้ำกลั่น จากกราฟจะเห็นได้ว่า ผ้าทดสอบทั้งหมดที่ผู้วิจัยเลือกทดสอบโดยส่วนใหญ่จะมีค่า TVOC เพิ่มขึ้น ยกเว้นผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมี มีค่าปริมาณ TVOC ลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสาร n-butanol ซึ่งเป็นสารจากสีย้อมที่เคลือบบนผิวผ้าถูกเคลือบด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มหายไป (ดังตาราง 24) ทำให้ค่า TVOC ลดลง



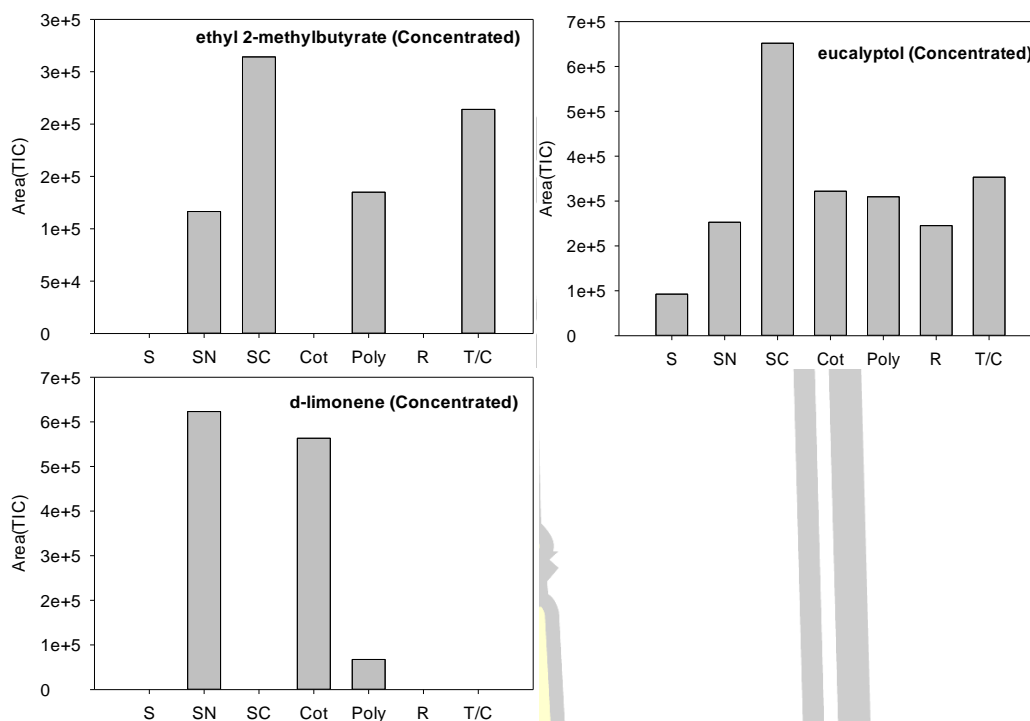
ภาพประกอบ 26 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลง TVOC ของผ้าทั้ง 7 ชนิด ที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม สูตรทั้ง 2 สูตร เทียบกับผ้าที่ซักน้ำกลั่น

#### 4.2.3 ชนิด และปริมาณของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าผ้การซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม

ภาพประกอบ 27-28 แสดงชนิดและปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้าทดสอบทั้งหมดที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และสูตรเข้มข้น โดยเปรียบเทียบเป็นพื้นที่โครมาโทแกรมของสารมลพิษอินทรีย์ระเหยถูกปลดปล่อยออกมา สำหรับการวิเคราะห์ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่มาจากน้ำยาปรับผ้านุ่มโดยตรง แสดงในหัวข้อ 3.3.1.3 โดยพบว่าตรวจพบสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ออกมาจากน้ำยาปรับผ้านุ่ม 7 ชนิด ได้แก่สาร 2-butanol, ethyl 2-methylbutyrate, formic acid, myrcene, eucalyptol, acetic acid และ d-limonene แต่ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงเฉพาะสาร ethyl 2-methylbutyrate, eucalyptol และ d-limonene เท่านั้น เนื่องจากโดยส่วนใหญ่ผ้าที่ผ่านการซักน้ำยาปรับผ้านุ่มปลดปล่อยสารดังกล่าวออกมา



ภาพประกอบ 27 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบทั้งหมดที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา



ภาพประกอบ 28 สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากผ้าทดสอบทั้งหมดที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น

ภาพประกอบ 27 กรณีซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา พบว่าผ้าไหมที่ไม่ผ่านการย้อม มีพื้นที่โครมาโทแกรมของ สาร ethyl 2-methylbutyrate, eucalyptol และ d-limonene ในขณะที่ผ้าชนิดอื่นไม่มี ซึ่งมีผลให้ปริมาณ TVOC มีค่าสูงกว่าผ้าชนิดอื่นกว่า 1.8-5.3 เท่า (ตาราง 29) ส่วนภาพประกอบ 28 กรณีซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น พบว่า ผ้าไหมที่ผ่านการย้อมทางเคมี มีพื้นที่โครมาโทแกรมของสาร ethyl 2-methylbutyrate, eucalyptol และสาร d-limonene มากกว่าผ้าชนิดอื่น ซึ่งมีผลให้ปริมาณ TVOC สูงกว่าผ้าชนิดอื่นกว่า 1.8-5.2 เท่า (ตาราง 29) ในขณะที่ผ้าชนิดอื่นปลดปล่อยเฉพาะสารบางตัวออกมาเท่านั้น เช่น ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการย้อม ปลดปล่อยเฉพาะสาร eucalyptol ออกมา จึงมีผลทำให้ปริมาณ TVOC ที่ได้มีค่าต่ำกว่าผ้าชนิดอื่นกว่า 1.8-5.2 เท่า จากผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้น้ำยาปรับผ้านุ่มมีผลต่อปริมาณการปลดปล่อย TVOC ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

เมื่อเปรียบเทียบชนิดและพื้นที่โครมาโทแกรมของสารที่มาจากน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรธรรมดา และสูตรเข้มข้น พบว่า พื้นที่โครมาโทแกรมรวมทั้ง 3 สาร แสดงดังภาพประกอบ 4.5 ของสารที่มา

จากน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นมีค่ามากกว่าสูตรธรรมดา ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณ TVOC ของผ้าทดสอบ โดยส่วนใหญ่ที่ผ่านการซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นมีค่าสูงกว่าสูตรธรรมดา 1-2 เท่า (ตาราง 29)

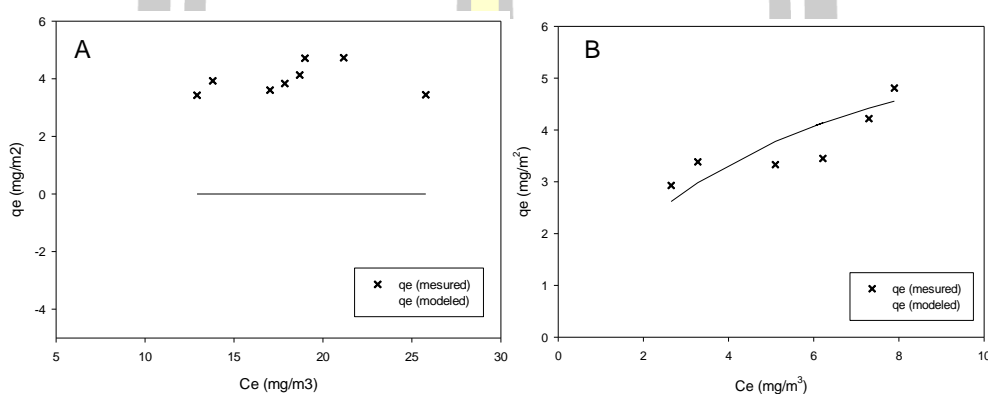
### 4.3 ความสามารถของผ้าในการดูดซับสารนิโคติน

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของการซักล้างด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มต่อความสามารถของผ้าในการดูดซับก๊าซนิโคตินที่อาจเปลี่ยนแปลงไป ในที่นี้เลือกใช้การซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น เพราะผ้าที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นมีปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาสูงกว่าผ้าที่ซักด้วยน้ำยาสูตรธรรมดา และคาดว่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวผ้าในการดูดซับก๊าซนิโคตินได้ชัดเจนกว่า และเปรียบเทียบค่าความจุในการดูดซับก๊าซนิโคตินกับผ้าที่ซักด้วยน้ำกลั่น น้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นที่ผู้วิจัยใช้ทดสอบ มีสารลดแรงตึงผิวที่สำคัญ คือ ไดเมทิลเอสเทอร์ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (dimethyl ester dimethyl ammonium chloride) ซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่มควอเทอนารีแอมโมเนีย (quaternary ammonium compound) มีสารแอมโมเนียมที่แสดงประจุบวก (cationic softener) ซึ่งสารในกลุ่มนี้ติดติดกับพื้นผิวผ้าที่มีสมบัติเป็นเบสได้ดี [72] [65] ผู้วิจัยทำการทดลองไอโซเทอมการดูดซับด้วยถุงเก็บตัวอย่างก๊าซขนาด 2 L ผ้าทดสอบประกอบไปด้วย ผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ควบคุมอุณหภูมิทดสอบที่ 25 °C ความเข้มข้นของนิโคตินทดสอบ 24 ppm

#### 4.3.1 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของผ้าทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ที่สภาวะซักรีดน้ำกลั่น และสภาวะซักรีดด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้น โดยนำชุดข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์ ด้วยวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรมทางสถิติ NLREG<sup>®</sup> พบว่าค่า proportion of variance explained ( $R^2$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยค่า  $R^2$  แสดงถึงความสมบูรณ์ของชุดข้อมูลระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการแลงเมียร์ ดังภาพประกอบ 29 (A) แสดงเส้นกราฟไอโซเทอมแลงเมียร์ของการดูดซับผ้าไหม ลักษณะเส้นกราฟของชุดข้อมูลจากการตรวจวัดจริง (สัญลักษณ์ x) กับการทำนายด้วยสมการแลงเมียร์ (สัญลักษณ์-) ไม่สมบูรณ์ หมายความว่า สมการแลงเมียร์ไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายการดูดซับนิโคตินบนผ้า ยกเว้นผ้าฝ้าย ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.927 แสดงดังภาพประกอบ 29 (B) และตาราง ซึ่งเส้นกราฟระหว่างชุดข้อมูลที่ได้

จากการทดลองกับการทำนายมีความสมรูป หมายความว่าลักษณะที่เกิดขึ้นระหว่างนิโคตินกับพื้นผิวผ้า เป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ไม่มีการทับซ้อนกันของโมเลกุลนิโคติน เมื่อเกิดการสร้างพันธะดูดซับแล้วไม่สามารถเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งการดูดซับได้ อย่างไรก็ตามค่า  $R^2$  ที่ได้จากแบบจำลองฟรอนดลิชเองก็มีค่าสูงเช่นเดียวกัน (ตาราง 29) นั้นหมายความว่า การดูดซับโมเลกุลนิโคตินที่พื้นผิวผ้าฝ้าย มีลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ก่อน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นนิโคตินมากขึ้นเรื่อยๆ ความสามารถในการดูดซับนิโคตินจะเริ่มค่อยๆ คงที่

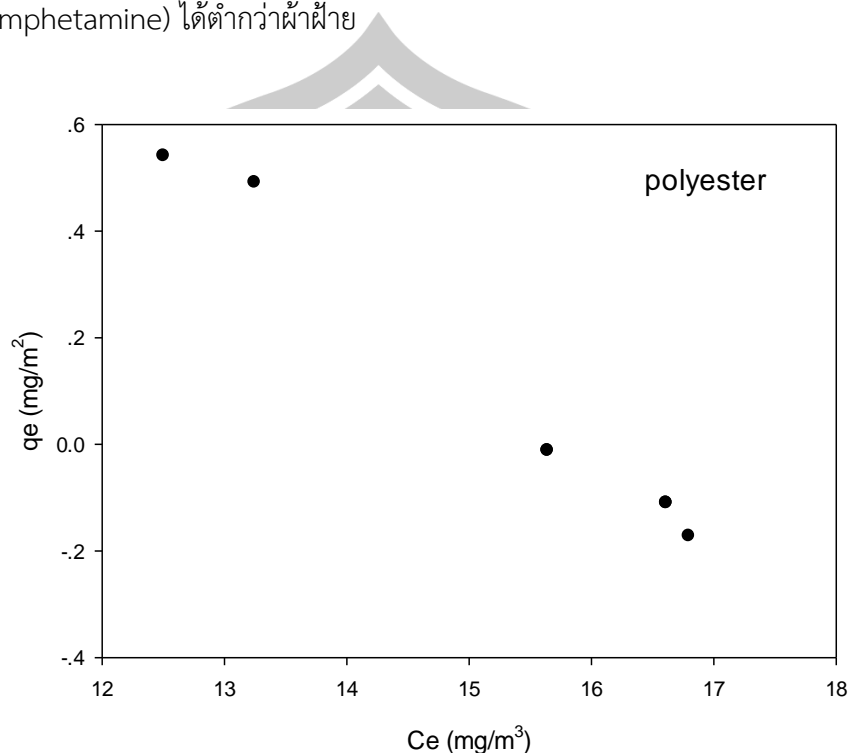


ภาพประกอบ 29 การทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์ผ้าไหม (A) และผ้าฝ้าย (B)

#### 4.3.2 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการฟรอนดลิช

ภาพประกอบ 30 แสดงชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และการทำนายด้วยสมการฟรอนดลิช โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรมทางสถิติ NLREG<sup>®</sup> จากการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับผ้าทั้งหมดด้วยสมการแบบฟรอนดลิช ที่ซักด้วยน้ำกลั่น และซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม สูตรเข้มข้น พิจารณาเปรียบเทียบลักษณะกราฟไอโซเทอมดูดซับระหว่างผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ กับผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ที่สภาวะซักน้ำกลั่น พบว่า ผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ไม่สามารถวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการฟรอนดลิชได้ ดังแสดงตัวอย่างของเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับของผ้าโพลีเอสเตอร์ (ดังภาพประกอบ 29) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะการดูดซับลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าผ้าทั้งสามชนิดนี้มีความสามารถในการดูดซับนิโคตินน้อยมาก แม้ว่าผู้วิจัยได้ลองเพิ่มขนาดพื้นที่ตัวอย่างผ้าทดสอบอีก 5 เท่าก็ตาม เส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับยังคงคล้ายเดิม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [44] [71] ที่พบว่า ผ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผ้าขนสัตว์ ดูดซับสารมลพิษอินทรีย์จากควันบุหรี่ได้น้อยกว่าผ้าที่ได้

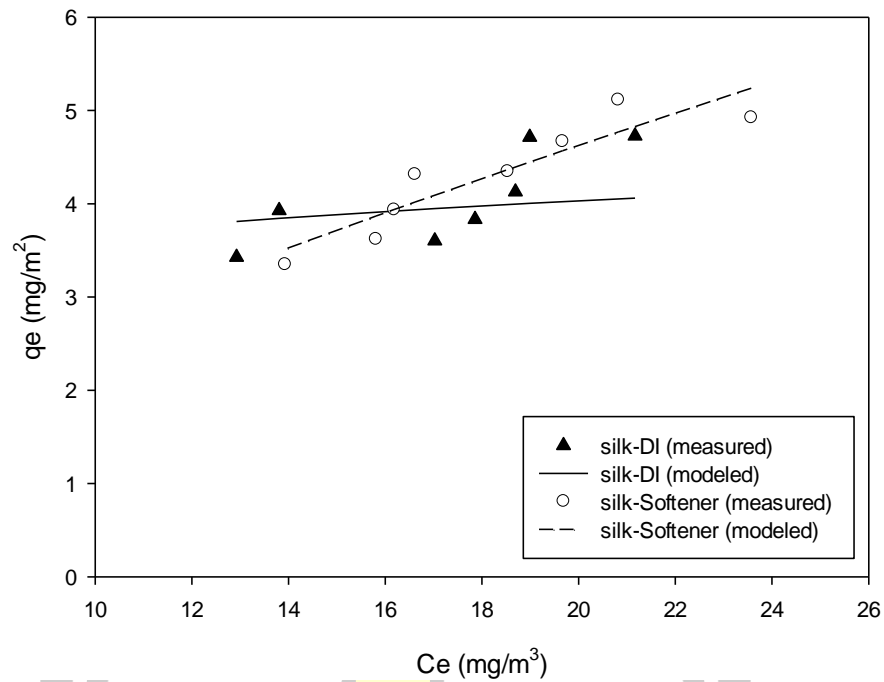
จากเส้นใยธรรมชาติ เช่น และงานวิจัยของ [11] พบว่า ผ้าโพลีเอสเตอร์มีความสามารถดูดติดสารแอมเฟตามีน (amphetamine) ได้ต่ำกว่าผ้าฝ้าย



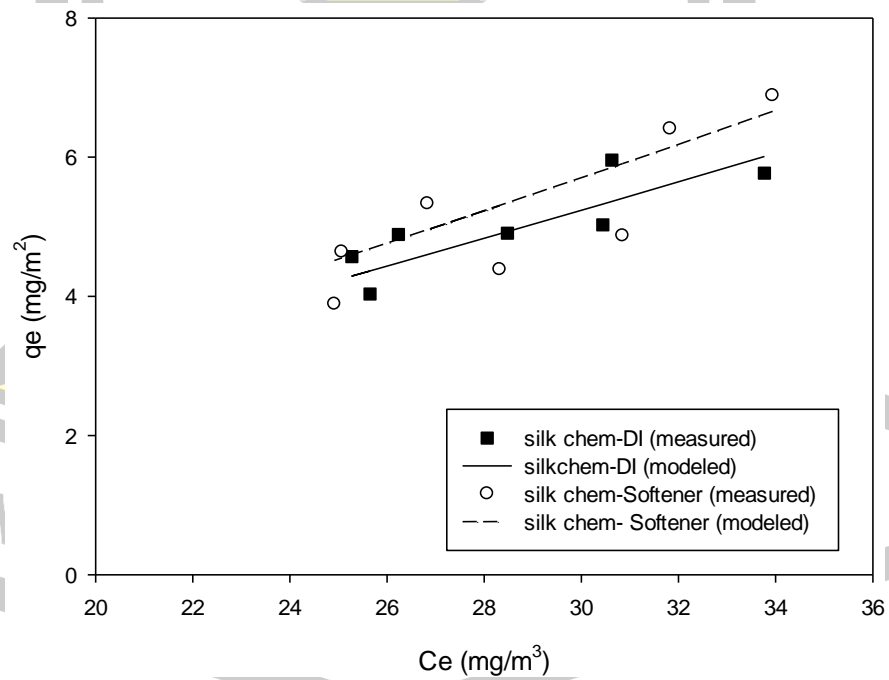
ภาพประกอบ 30 ลักษณะการดูดซับสารนิโคตินบนผ้าโพลีเอสเตอร์

การดูดซับของผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าไหม (สัญลักษณ์ ▲) ผ้าไหมย้อมเคมี (สัญลักษณ์ ■) และผ้าฝ้าย (สัญลักษณ์ x) แสดงดังภาพประกอบ 31-33 พบว่า ค่า  $R^2$  ของ ผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี และผ้าฝ้าย มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.88, 0.96 และ 0.94 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่า ผ้าไหมย้อมเคมีมีลักษณะการดูดซับเป็นเส้นตรง (พิจารณาได้จากค่า  $n$  ในตาราง 31) ซึ่งเป็นลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (linear adsorption) หมายความว่า พื้นผิวของผ้าที่ใช้ดูดซับยังเหลือพื้นที่ในการดูดซับ และการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวผ้ากับโมเลกุลนิโคตินเป็นชั้นเดียว นอกจากนี้จากกราฟยังชี้ให้เห็นได้ว่าผ้าฝ้ายสามารถดูดซับนิโคตินได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำกว่าผ้าไหม

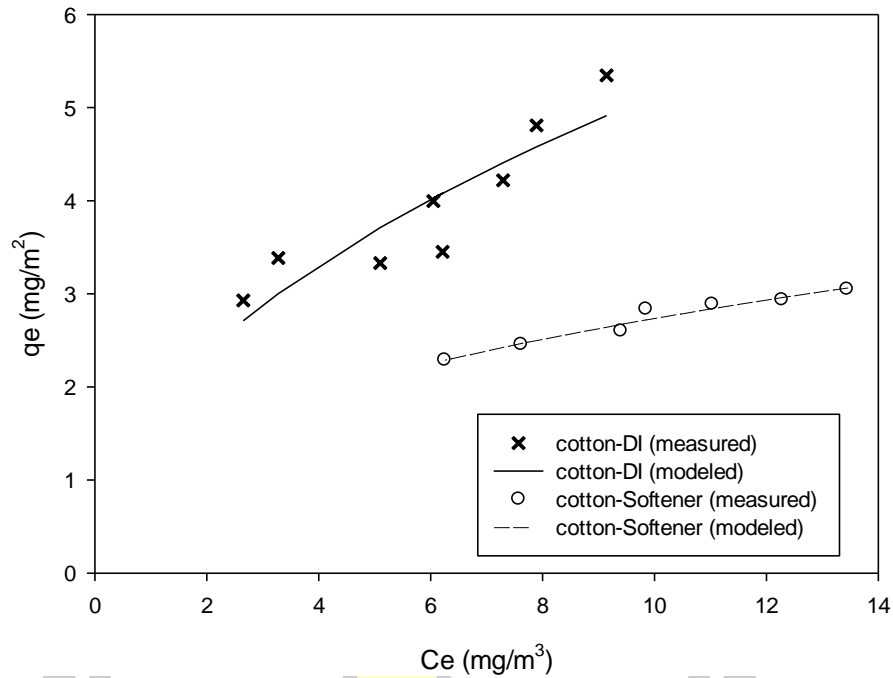
กราฟไอโซเทอมการดูดซับของผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี และผ้าฝ้าย ที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม สูตรเข้มข้น แสดงดังภาพประกอบ 31-33 พบว่า ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.97, 0.85 และ 0.99 ตามลำดับ และลักษณะกราฟการดูดซับมีลักษณะเช่นเดียวกับสภาวะซักน้ำกลั่น



ภาพประกอบ 31 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยสมการฟรุนดลิชของผ้าไหม



ภาพประกอบ 32 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยสมการฟรุนดลิชของผ้าไหมย้อมเคมี



ภาพประกอบ 33 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซนิโคตินด้วยสมการฟรอนด์ลิชของผ้าฝ้าย

ตาราง 31 แสดงค่าพารามิเตอร์การดูดซับที่ได้จากสมการแบบฟรอนด์ลิช,  $K_f$ ,  $n$ ,  $R^2$  และ  $q_e$  โดยพารามิเตอร์  $K_f$  แสดงถึงความจุจำเพาะของการดูดซับที่สภาวะความเข้มข้นค่าใดๆ,  $n$  แสดงถึงความหลากหลายของพลังงานในปฏิกิริยาการดูดซับ,  $q_e$  แสดงถึงความสามารถในการดูดซับนิโคตินบนพื้นผิวผ้า หน่วย และ  $R^2$  แสดงถึงความแนบสนิทของชุดข้อมูลระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการฟรอนด์ลิช หมายเหตุ ค่า  $q_e$  ตารางคำนวณจากการใช้ค่าความเข้มข้นสารนิโคตินเท่ากับ 0.01 ppm เนื่องจากความเข้มข้นสารนิโคตินที่ตรวจพบภายในอาคารมีค่าอยู่ในช่วง 200-2,000  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  หรือประมาณ 0.001-0.013 ppm [73]

ตาราง 31 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจากสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับนิโคตินด้วยผ้า

ชนิดผ้า (สภาวะ)	ไอโซเทอมแลงเมียร์			ไอโซเทอมฟรุนดลิช			
	$q_m$	$b$	$R^2$	$q_e$	$K_f^*$	$n$	$R^2$
ฝ้าย (ซึกน้ำกลั่น)	7.28	0.21	0.92	$1.8 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^0$	0.48	0.94
ฝ้าย (ซึกน้ำยา)	3.33	0.55	0.94	$1.9 \times 10^{-1}$	$1.14 \times 10^0$	0.38	0.99
ไหม (ซึกน้ำกลั่น)	3.97	*	0.88	$1.5 \times 10^0$	$2.74 \times 10^0$	0.13	0.88
ไหม (ซึกน้ำยา)	4.28	*	0.85	$1.4 \times 10^{-2}$	$4.74 \times 10^{-1}$	0.76	0.98
ไหมย้อม (ซึกน้ำกลั่น)	$1.97 \times 10^3$	*	0.96	$5.0 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-1}$	1.16	0.96
ไหมย้อม (ซึกน้ำยา)	5.39	*	0.73	$2.0 \times 10^{-4}$	$7.91 \times 10^{-2}$	1.26	0.85

\*หน่วย  $K_f$  คือ  $\text{mg}^{1-n} \cdot \text{m}^{3n-2}$ , สัญลักษณ์ \* คือ พารามิเตอร์  $b$  ที่ทำนายได้จากสมการแลงเมียร์ด้วยโปรแกรม NLREG<sup>®</sup> มีค่าติดลบ

ค่า  $K_f$  ของผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี และผ้าฝ้าย ที่ซึกด้วยน้ำกลั่น มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 2.74, 0.10 และ 1.7 ตามลำดับ และพิจารณาเปรียบเทียบค่า  $K_f$  ของผ้าทั้ง 3 ชนิดที่ซึกด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นเทียบกับน้ำกลั่น พบว่า มีค่า  $K_f$  เท่ากับ 0.47, 0.079 และ 1.14 ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อพื้นผิวผ้าถูกซึกด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม มีผลให้ค่าการดูดซับลดลงประมาณ 1.2-3.7 เท่า โดยผ้าไหมลดลงมากที่สุด

ค่า  $n$  ของผ้าไหมดั้งเดิม ผ้าไหมย้อมเคมี และผ้าฝ้าย ที่ซึกด้วยน้ำกลั่น มีค่าเท่ากับ 0.12, 1.16 และ 0.48 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ผ้าไหมย้อมเคมีมีค่า  $n$  สูงกว่าผ้าฝ้าย และผ้าไหมดั้งเดิม โดยค่า  $n > 1$  หมายความว่า ลักษณะกราฟที่ทำนายด้วยไอโซเทอมฟรุนดลิชมีลักษณะโค้งหงาย ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับแบบ unfavorable adsorption คือ ผ้าไหมย้อมเคมีมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินน้อยในกรณีที่ความเข้มข้นนิโคตินต่ำ ขณะที่ผ้าฝ้าย และผ้าไหมดั้งเดิม มีค่า  $n < 1$  หมายความว่าผ้าทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถดูดซับสารนิโคตินได้ดีกว่าในกรณีที่ความเข้มข้นนิโคตินต่ำ ซึ่งลักษณะการดูดซับเช่นนี้เป็นการดูดซับแบบ favorable adsorption และถ้า  $n$  มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ลักษณะกราฟจะเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นลักษณะการดูดซับแบบเส้นตรง (linear adsorption) คือ พื้นผิวผ้ายังสามารถดูดซับโมเลกุลนิโคตินเพิ่มได้อีก และเมื่อพิจารณา ค่า  $n$  ของผ้าทั้ง 3 ชนิดที่ซึกด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มสูตรเข้มข้นเทียบกับน้ำกลั่น พบว่า ค่า  $n$  มีค่าใกล้เคียงเดิม (ตาราง 31) ยกเว้น ผ้าไหมที่มีค่า  $n$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.760 เมื่อเทียบกับสภาวะซึกน้ำกลั่น นั้นหมายความว่าพื้นผิวผ้ามีพื้นที่ดูดซับนิโคตินเพิ่มขึ้น

จะเห็นได้ว่าสมบัติเคมีผ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินชัดเจน ผ้าไหมดั้งเดิม และผ้าฝ้าย ซึ่งเป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ สมบัติเคมีที่พื้นผิวดั้งเดิม สามารถดูดซับกับนิโคตินได้

ดีกว่าผ้าไหมย้อมเคมี มีข้อสังเกตว่า การย้อมมีผลให้สารกลุ่มแอลเคนที่มีอยู่ในพื้นผิวผ้าดั้งเดิมถูกเคลือบหายไป และพบสารในกลุ่ม คาร์บอนิล และอะโรมาติก ที่พื้นผิวผ้าแทน ซึ่งสารกลุ่มดังกล่าวเป็นสารที่มีอยู่ในผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR (กล่าวในหัวข้อ 4.4) มีสมบัติมีขั้วต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ผ้าไหมย้อมเคมีมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินต่ำ นอกจากนี้สมบัติของการทอ และลักษณะโครงสร้างเส้นใยของผ้าไหมดั้งเดิม ที่มีการทอแบบหลวม เส้นใยขรุขระไม่ราบเรียบ และเส้นใยผ้าฝ้าย มีที่ลักษณะบิดเกลียว ไม่ราบเรียบ อาจมีผลทำให้มีพื้นที่การดูดซับมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ที่มีลักษณะตรง และราบเรียบ

ความสามารถการดูดซับ,  $q_e$  ของผ้าที่ทดสอบโดยคำนวณที่ความเข้มข้นนิโคตินในอากาศเท่ากับ 0.01 ppm ด้วยสมการไอโซเทอมฟรุนดลิช แสดงดังตาราง 30 เมื่อพิจารณากรณีสถานะชกน้ำกลั่นพบว่า ผ้าไหมดั้งเดิมมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินได้ดีกว่าผ้าฝ้าย 300 เท่า และ ดีกว่าผ้าไหมย้อมเคมี 3,000 เท่า ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติทางเคมีของผ้าไหมดั้งเดิมที่มีกลุ่มฟังก์ชันนอล (function group) เอมีน (amines) และเอไมด์ (amide) ที่พื้นผิว ซึ่งสารกลุ่มมีโนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ และมีสมบัติความมีขั้วสูง ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่พื้นผิวผ้ากับโมเลกุลนิโคติน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงผ่านทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) และแรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ดังนั้นจึงเป็นผลให้มีค่าการดูดซับมากกว่าผ้าฝ้าย และผ้าไหมย้อมเคมี แม้ว่าผ้าฝ้ายจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์เท่ากับ  $44 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$  แรงพันธะไฮโดรเจนที่มีสมบัติเป็นกรดเท่ากับ  $1.6 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$  และเบสเท่ากับ  $17.2 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$  [74] ที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลผ่านทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงพันธะไฮโดรเจนเช่นเดียวกับผ้าไหมก็ตาม จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวผ้าฝ้าย ด้วยเครื่องเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) (PerkinElmer Co., Ltd, Thailand) ซึ่งผู้วิจัยเป็นผู้ทดสอบ พบกลุ่มสารแอลเคนที่พื้นผิว ซึ่งกลุ่มสารแอลเคนมีสมบัติความมีขั้วต่ำกว่าผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติที่รายงานโดย [12] และผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังสอดคล้องกับการทดลองที่ 2 การปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยจากผ้า โดยพบว่าผ้าฝ้ายปลดปล่อยสารโทลูอินในรูปก๊าซออกมา ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าพื้นผิวผ้าฝ้ายมีสมบัติความมีขั้วต่ำความสามารถในการดูดซับนิโคตินจึงต่ำกว่าผ้าไหม แม้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของผ้าฝ้ายกับผ้าไหมมีค่าใกล้เคียงกันก็ตาม คือ 4.85 และ  $4.22 \text{ m}^{-2} \cdot \text{g}$  ตามลำดับ และนอกจากนี้จากตาราง 31 ยังมีข้อสังเกตได้ว่าผ้าไหมย้อมเคมีมีความสามารถในการดูดซับนิโคตินเท่ากับ  $0.0005 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผ้าฝ้ายและผ้าไหมดั้งเดิมถึง 300-3000 เท่า นั้นหมายความว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีผลต่อ

การดูดซับชัดเจน เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพื้นผิวผ้าไหมซึ่งมีสมบัติมีขั้ว และสารจากสีย้อมมีสมบัติมีขั้วดูดติดกันผ่านทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงพันธะไฮโดรเจน จะยึดติดกันอย่างแข็งแรง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ยากที่โมเลกุลนิโคตินจะสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลสารในสีย้อมที่เคลือบติดที่พื้นผิว เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของนิโคตินต่ำกว่าพื้นผิวผ้าไหม

ความสามารถการดูดซับ,  $q_e$  ของผ้าทั้ง 3 ชนิด ที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มเทียบกับสถานะซักน้ำกลั่น พบว่า ผ้าไหมดั้งเดิมมีค่าการดูดซับลดลงประมาณ 100 เท่าในขณะที่ผ้าฝ้ายและผ้าไหมย้อมเคมีมีค่าใกล้เคียงเดิม อาจเป็นไปได้ว่าน้ำยาปรับผ้านุ่มที่เคลือบพื้นผิวมีสมบัติไม่มีขั้ว แรงดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลนิโคตินกับพื้นผิวผ้าผ่านเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น ดังนั้นค่าการดูดซับที่ได้จึงมีค่าลดลง

#### 4.4 ผลจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของผ้าทดสอบ

การวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของผ้าทดสอบ 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ที่ซักด้วยน้ำกลั่น สมบัติที่ศึกษาประกอบไปด้วย โครงสร้างอสังฐานวิทยา การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวผ้า

##### 4.4.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างอสังฐานวิทยา

ภาพประกอบ 34 แสดงลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยาของผ้าทั้ง 5 ชนิด ที่ซักด้วยน้ำกลั่น ด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 200 เท่า สัญลักษณ์

S-50, S-200 แสดงผ้าไหมดั้งเดิมที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า

SC-50, SC-200 แสดงผ้าไหมย้อมเคมีที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า

C-50, C-200 แสดงผ้าฝ้ายที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า

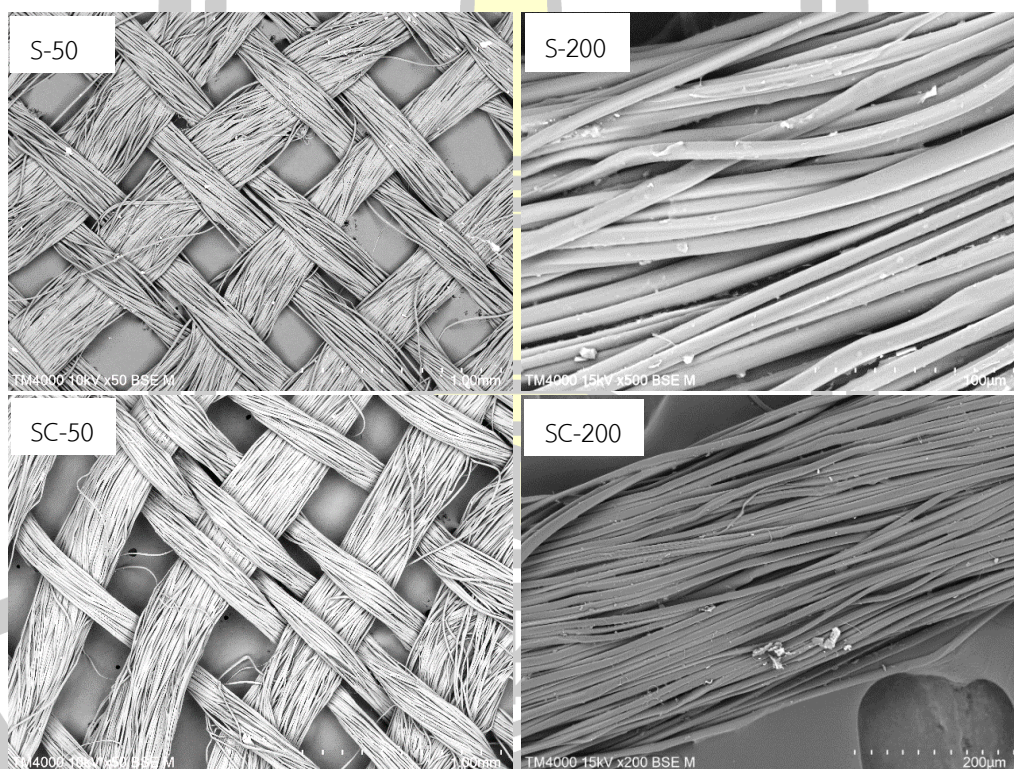
P-50, P-200 แสดงผ้าโพลีเอสเตอร์ที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า

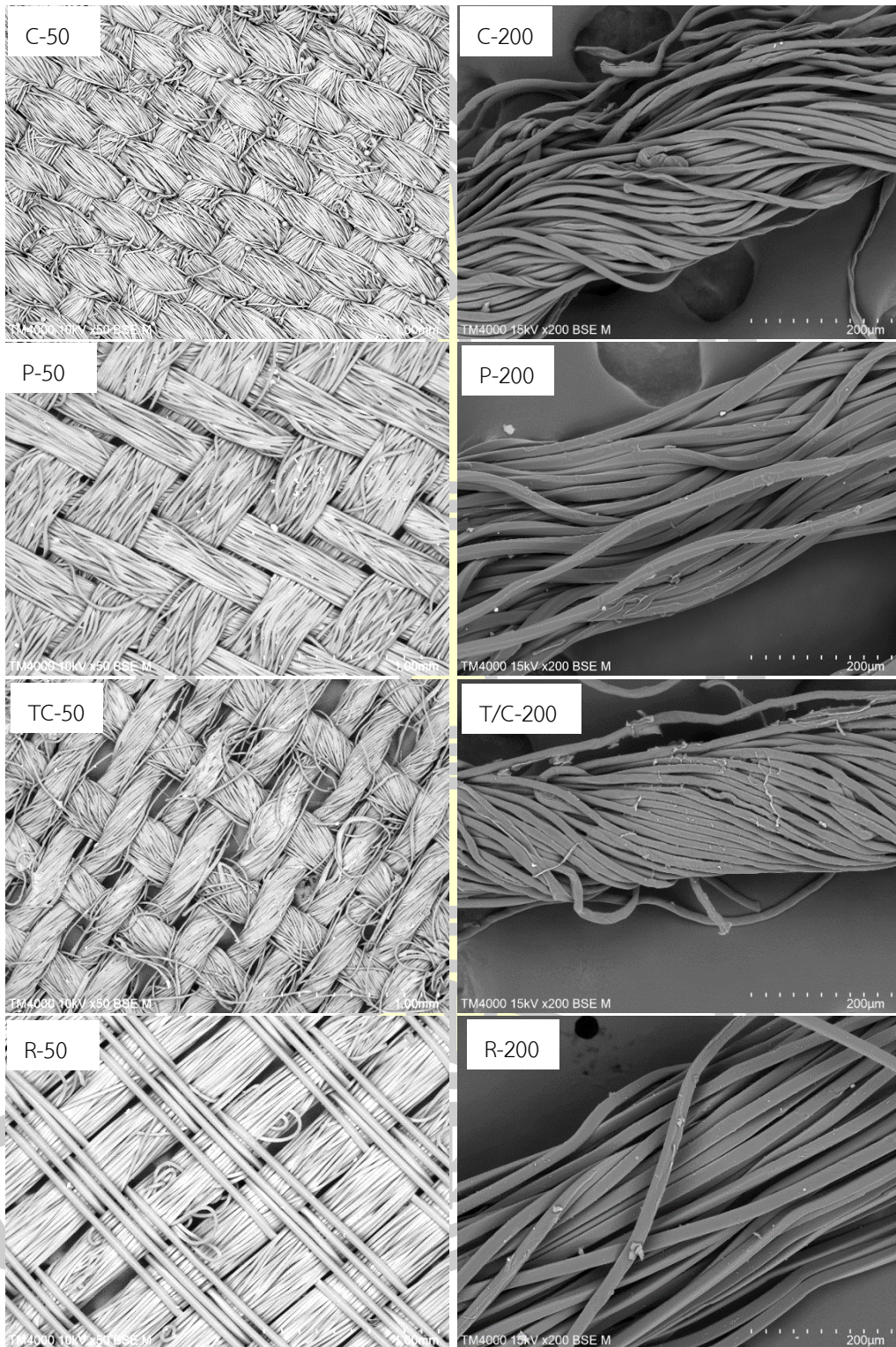
TC-50, TC-200 แสดงผ้าที/ซีที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า

R-50, R-200 แสดงผ้าเรยอนที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า

จากภาพถ่ายโครงสร้างอสังฐานวิทยาของผ้าทั้ง 5 ชนิด จะเห็นได้ชัดเจนว่ารูปแบบการทอ (weave) ของผ้าแต่ละชนิดต่างกัน โดยเฉพาะผ้าไหม ซึ่งเป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ และได้จาก

กรรมวิธีการทอของมนุษย์ ลักษณะการทอไม่สม่ำเสมอ เส้นใยที่ใช้ทอมีขนาดไม่เท่ากัน (ภาพประกอบ S-50) ขณะที่ผ้าที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิต เส้นใยที่ใช้ทอมีขนาดเท่ากัน สำหรับโครงสร้างการทอของผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าที/ซี มีลักษณะเหมือนกัน คือการทอแบบลายขัด (plain weave) แต่การทอผ้าไหมเป็นแบบหลวม ส่วนผ้าฝ้ายทอแบบแน่น สำหรับผ้าโพลีเอสเตอร์ (ภาพประกอบ P-50) มีลักษณะทอแบบลายสอง (twill weave) เป็นการทอที่ทำให้เกิดแนวเส้นทแยงบนผืนผ้า สำหรับผ้าเรยอนใช้การทอแบบลายต่วน (satin weave) มีเส้นด้ายยืนอย่างน้อย 5 เส้น ทอให้เกิดลักษณะเส้นด้ายลอย (float) (ภาพประกอบ R-50) [75] พิจารณาพื้นผิวเส้นใยของผ้าแต่ละชนิด พบว่า เส้นใยไหมมีเส้นใยขรุขระ ไม่เรียบ (ภาพประกอบ S-200) เส้นใยฝ้ายมีลักษณะบิดเกลียว ราบเรียบ เส้นใยผ้าโพลีเอสเตอร์และเรยอนมีลักษณะตรงราบเรียบ ส่วนที/ซีมีเส้นใยคล้ายผ้าฝ้าย เนื่องจากผ้าที/ซีได้จากเส้นใยเซลลูโลสผสมกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่บางส่วนฉีกขาด (ภาพประกอบ TC-200)





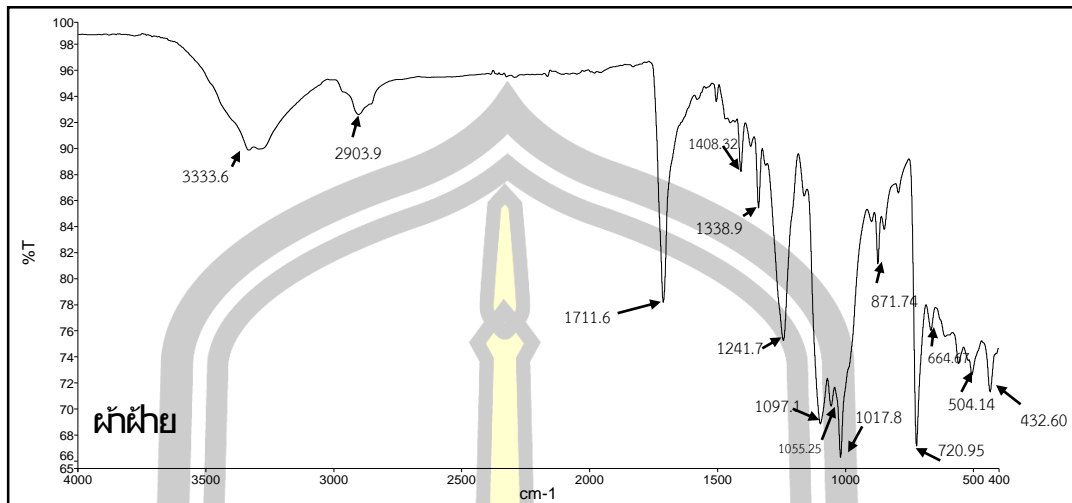
ภาพประกอบ 34 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผ้า

#### 4.4.2 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผ้า

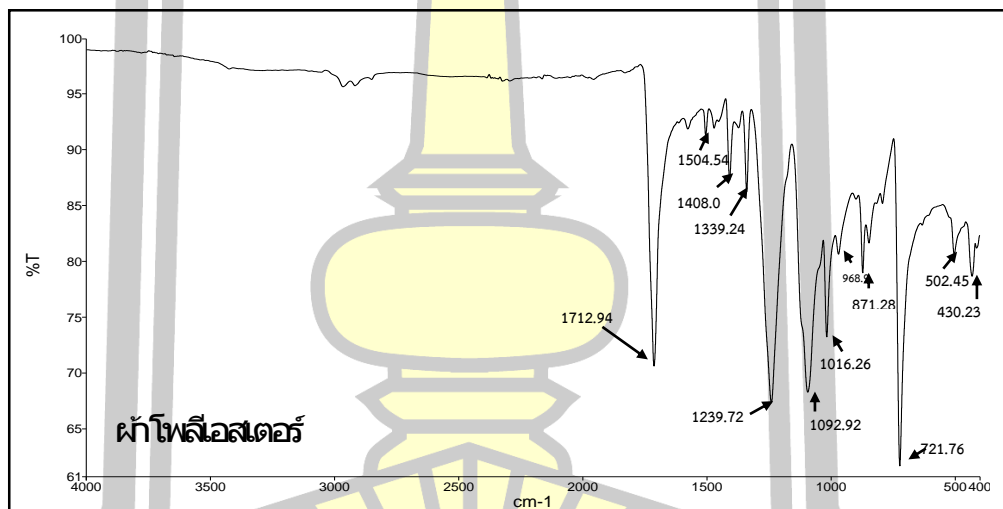
ภาพประกอบ 35-40 และตาราง 31 แสดงสเปกตรัมดูดกลืนคลื่นรังสีของผ้าทดสอบ ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าไหมย้อมเคมี ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และ ผ้าเรยอน ที่ซึ่กด้วยน้ำกลั่น ที่ช่วงการทดสอบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  ด้วยเครื่อง FT-IR จากกราฟพบความต่างของลักษณะการดูดกลืนรังสีของผ้าทั้ง 5 ชนิดในช่วงดูดกลืนรังสีประมาณ  $1500-4000\text{ cm}^{-1}$  ผ้าไหม (ภาพประกอบ 35) พบช่วงดูดกลืนรังสี  $3277\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงพันธะ N-H ซึ่งเป็นฟังก์ชันนอลกลุ่มเอมีน (amines) และเอไมด์ (amide) และช่วงดูดกลืนรังสี  $1619\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงพันธะ N-H เป็นสารในกลุ่มเอมีน และ  $1510\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงพันธะ N-O ซึ่งเป็นฟังก์ชันนอลในกลุ่มสารประกอบไนโตรเจน (nitro compound) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผ้าไหมที่มีอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลัก [65] สำหรับผ้าฝ้าย (ภาพประกอบ 37) พบช่วงดูดกลืนรังสี  $3333\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงพันธะ O-H และ H-bond ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลของสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ (alcohols) ฟีนอล (phenol) หรือคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) และพบช่วงดูดกลืนรังสี  $1711\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงพันธะ C=O ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลของสารในกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl) เช่น คีโตน (ketones) และอัลดีไฮด์ (aldehyde) ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมบัติผ้าฝ้ายที่มีไฮดรอกซิล (hydroxyl, OH) เป็นองค์ประกอบหลัก [65] และผ้าที/ซี (ภาพประกอบ 39) พบช่วงดูดกลืนรังสี  $3310\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงพันธะ N-H ซึ่งเป็นฟังก์ชันนอลกลุ่มเอมีน (amines) และเอไมด์ (amide) และ  $1712\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงพันธะ C=O ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลของสารในกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl) เช่น คีโตน (ketones) และอัลดีไฮด์ (aldehyde) ซึ่งผ้าที/ซีเป็นผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติที่ประกอบด้วยเซลลูโลสกับเส้นใยสังเคราะห์ (ผ้าฝ้ายร้อยละ 65 ผ้าโพลีเอสเตอร์ร้อยละ 35) ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวจึงเป็นสารในกลุ่มสารที่มีในผ้าฝ้าย แต่เมื่อพิจารณาที่ผ้าโพลีเอสเตอร์ และผ้าเรยอน แสดงดังภาพประกอบ 38 และภาพประกอบ 40 กลับไม่พบแถบสเปกตรัมดูดกลืนรังสีในช่วง  $2000-4000\text{ cm}^{-1}$  นั้นหมายความว่าที่พื้นผิวของผ้าทั้งสองไม่มีพันธะในกลุ่มแอลกอฮอล์ ฟีนอล และคาร์บอกซิลิก มีเพียงเฉพาะสารในกลุ่มคาร์บอนิล อะโรมาติก อะลิฟาติก และแอลเคน

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวทั้งหมด พบว่า ผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ จะพบกลุ่มสารเอมีน เอไมด์ แอลกอฮอล์ และฟีนอล ที่มีสมบัติมีขั้วสูงที่พื้นผิว ขณะที่ผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ จะพบกลุ่มสารคาร์บอนิล อะโรมาติก อะลิฟาติก และแอลเคน ที่มีสมบัติความมีขั้วต่ำที่พื้นผิว [65]



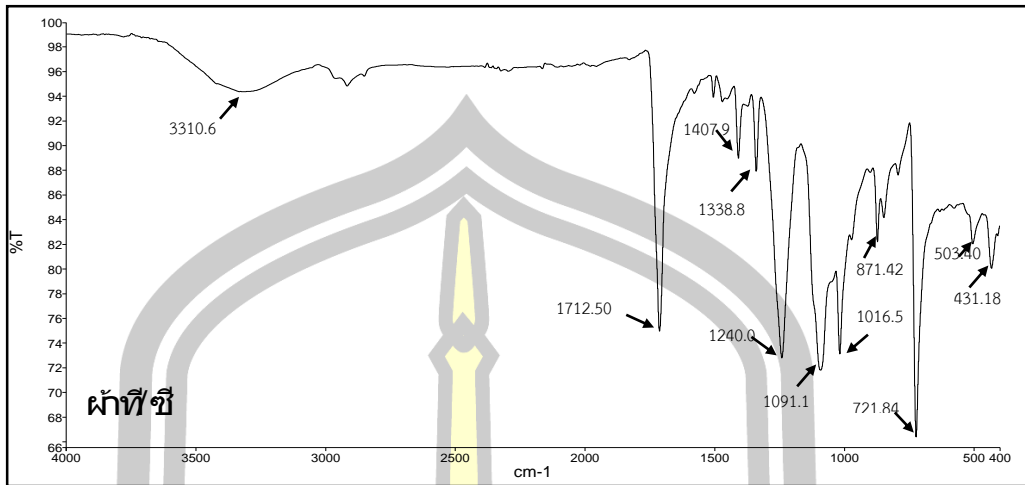


ภาพประกอบ 37 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าฝ้าย

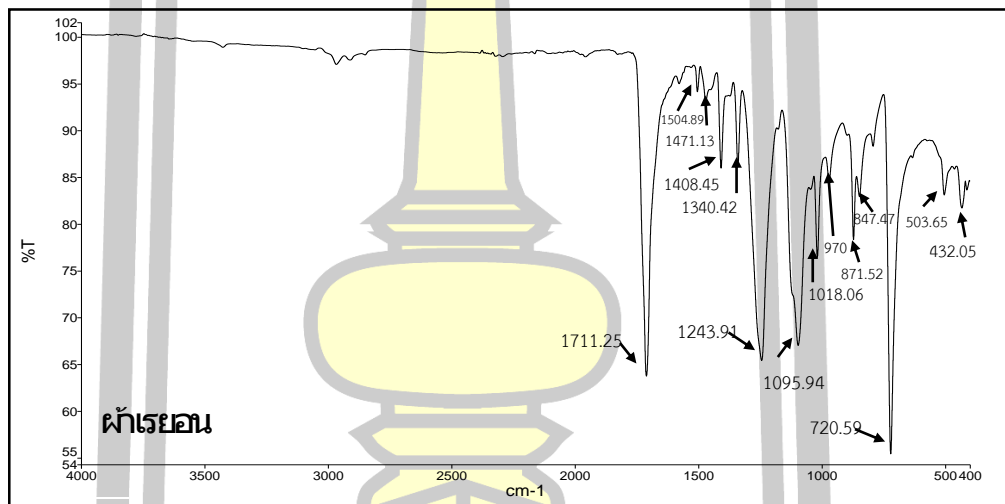


ภาพประกอบ 38 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าโพลีเอสเตอร์

พหุบัน ปณ กิจโต ชีเว



ภาพประกอบ 39 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าที/ซี



ภาพประกอบ 40 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผ้าเรยอน



ตาราง 32 ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด พันธะ และกลุ่มฟังก์ชันนอลที่พื้นผิวผ้า

ชนิดผ้า	ช่วงการดูดกลืนรังสี ( $\text{cm}^{-1}$ )	พันธะ	กลุ่มฟังก์ชันนอล
ผ้าไหมดั้งเดิม , ผ้าไหมย้อมเคมี	3400-3250	N-H	amines, amides
	3000-2850	C-H	alkanes
	1650-1580	N-H	amines
	1555-1475	N-O	nitro compound
	1500-1400	C-C	aromatics
	1250-1020	C-N	aliphatic amines
	1000-650	=C-H	alkanes
ผ้าฝ้าย	3500-3200	O-H	alcohols, phenol
	3000-2850	C-H	alkanes
	1760-1665	C=O	carbonyls
	1500-1400	C-C	aromatics
	1250-1020	C-N	aliphatic amines
	1000-650	=C-H	alkanes
	ผ้าโพลีเอสเตอร์	1760-1665	C=O
1500-1400		C-C	aromatics
1320-1000		C-O	alcohols, carboxylic acids, esters, ethers
1000-650		=C-H	alkanes
ผ้าที/ซี		3400-3250	N-H
	1760-1665	C=O	carbonyls
	1500-1400	C-C	aromatics
	1360-1290	N-O	nitro compound
	1320-1000	C-O	alcohols, carboxylic acids, esters, ethers
	1000-650	=C-H	alkanes
ผ้าเรยอน	1760-1665	C=O	carbonyls
	1500-1400	C-C	aromatics
	1320-1000	C-O	alcohols, carboxylic acids, esters, ethers
	1000-650	=C-H	alkanes

#### 4.4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของผ้า

ตาราง 33 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด ของผ้าทดสอบทั้ง 5 ชนิดที่ซัดด้วยน้ำกลั่น จะเห็นได้ว่า ผ้าเรยอนมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่าผ้าชนิดอื่น ประมาณ 2 เท่า และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าผ้าชนิดอื่นประมาณ 2-3 เท่า เมื่อคำนวณเทียบกับพื้นที่ผิวทดสอบจริง (หน่วย พื้นที่ผิวของ BET ต่อ พื้นที่ผิวผ้าทดสอบ) โดยคำนวณจากการชั่งน้ำหนักของผ้าทดสอบจริง ( $\text{g/m}^2$ ) คูณด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี BET [71] พบว่า ผ้าทั้ง 5 ชนิด มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 376-1326 BET area/  $\text{m}^2$  ซึ่งมีสอดคล้องกับจำนวนเส้นใย และลักษณะโครงสร้างการทอของผ้า โดยผ้าเรยอนมีพื้นที่ผิวมากที่สุด เพราะจำนวนของเส้นใย (fiber) ที่ใช้สำหรับทำเส้นด้าย (yarn) 1 เส้น มีมากกว่าผ้าชนิดอื่น (ดังภาพประกอบ R-50) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าผ้าเรยอนพื้นที่ผิวมากกว่าผ้าชนิดอื่น ในขณะที่ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน คือ 640 และ 584 BET area/  $\text{m}^2$  จะเห็นได้ว่า ผ้าทั้ง 2 ชนิดนี้มีจำนวนเส้นด้าย และลักษณะการทอคล้ายกัน (ดังภาพประกอบ C-50 และ P-50) ส่วนผ้าไหม และผ้าที/ซี มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 378 และ 396 BET area/  $\text{m}^2$  ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าผ้าชนิดอื่น เนื่องจากผ้าทั้ง 2 ชนิดนี้มีลักษณะการทอแบบหลวมกว่าผ้าชนิดอื่น อย่างไรก็ตามแม้ว่าผ้าเรยอนมีพื้นที่ผิวมากกว่าผ้าชนิดอื่นแต่กลับพบว่าไม่สอดคล้องกับผลทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโคติน อย่างไรก็ตามการทดลองนี้พื้นที่ผิวอาจเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโคติน ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าสมบัติทางเคมีผ้า น่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อดูดซับมากกว่า งานวิจัยของ [71] พบว่า ผ้าที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าฝ้าย และผ้าขนสัตว์ ซึ่งมีสมบัติความมีขั้วสูงสามารถดูดซับนิโคตินได้ดีกว่าผ้าจากเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ผ้าโพลีเอสเตอร์ และไนลอน ที่มีสมบัติความมีขั้วต่ำ แม้ว่าจะมีพื้นที่ใกล้เคียงกัน ในช่วง 26-460  $\text{cm}^2$  ก็ตาม

ตาราง 33 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด

ชนิดผ้า	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	พื้นที่ผิว (BET area/ $\text{m}^2$ fabric)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )
ผ้าไหม	4.22	378	12.82	$1.355 \times 10^{-2}$
ผ้าฝ้าย	4.85	640	10.63	$1.2904 \times 10^{-2}$
ผ้าโพลีเอสเตอร์	5.12	584	9.98	$1.2704 \times 10^{-2}$
ผ้าที/ซี	3.70	396	12.13	$1.1225 \times 10^{-2}$
ผ้าเรยอน	11.08	1326	4.55	$1.2629 \times 10^{-2}$

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลของความสกปรกบนพื้นผิวต่อการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ที่วัสดูอากาศ โดยผู้วิจัยสรุปหัวข้อศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ 1) การประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GC-MS 2) การตรวจวัดสารมลพิษอินทรีย์ระเหยจากผ้า 3) ความสามารถของผ้าในการดูดซับก๊าซไนโคติน และ 4) การทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของผ้า ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

5.1.1. เวลาที่เหมาะสมสำหรับเก็บและวิเคราะห์สารมลพิษอินทรีย์ระเหยที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 3 นาที จากการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยการหา % RSD พบว่า ค่า % RSD < 5 [51]

5.1.2 ผ้าโดยส่วนใหญ่ปลดปล่อยสารในกลุ่ม แอลเคน แอลกอฮอล์ อะโรมาติก ออกมา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [19] และมีปริมาณ TVOC อยู่ในช่วง  $5-52 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

5.1.3 การย้อม มีผลทำให้ผ้าปลดปล่อยทั้งสารที่มีอยู่เดิมในผ้า และสารที่มาจากสีย้อม จึงมีผลให้ปริมาณ TVOC สูง

5.1.4 การซักน้ำกลั่น มีผลทำให้ ปริมาณ TVOC มีค่าลดลง 0.2-2 เท่า เนื่องจากซักด้วยน้ำกลั่นมีผลทำให้สารมลพิษอินทรีย์ละลายไปกับน้ำ [12] เช่น สาร nonanal เป็นต้น

5.1.5 การปรับสภาพด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มทั้ง 2 สูตร มีผลทำให้ปริมาณ TVOC มีค่าเพิ่มขึ้น 0.2-3 เท่า เมื่อเทียบกับซักน้ำกลั่น เนื่องจากสารในน้ำยาปรับผ้านุ่มติดและสะสมที่พื้นผิวผ้า

5.1.6 ผ้าที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ผ้าไหม และผ้าฝ้าย จะพบสารในกลุ่มที่มีสมบัติความมีขั้วสูงกว่าผ้าที่ได้จากเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าที/ซี และผ้าเรยอน ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโคตินได้ดีกว่า

5.1.7 การปรับสภาพด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่ม มีผลทำให้สารไฮโดรคาร์บอนในน้ำยาปรับผ้านุ่มเคลื่อนที่พื้นผิวผ้าไหม และเปลี่ยนสมบัติจากเดิมมีขั้วสูงเป็นไม่มีขั้ว และมีผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโคตินลดลง

5.1.8 การย้อม มีผลให้ผ้าความสามารถดูดซับไนโคตินลดลง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไนโคตินที่มีค่าต่ำกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับพื้นผิวผ้าไหม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ และการนำไปประยุกต์ใช้

5.2.1 ควรเลือกใช้ SPME-fiber ให้เหมาะสมกับชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่ต้องการตรวจวัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

5.2.2 ควรเพิ่มจำนวนการซักล้าง เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง

5.2.3 สามารถนำวิธีเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างสารมลพิษอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME และ GCMS และ GC/FID ไปประยุกต์ใช้เพื่อตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดอื่นได้

5.2.4 ในการทดลองในครั้งต่อไป ควรเปลี่ยนวิธีการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น ที่อาจได้รับผลกระทบเชิงสุขภาพโดยตรงจากการได้รับสัมผัสสารมลพิษอินทรีย์ เช่น เสื้อผ้าของผู้ที่ทำการกิจกรรมบริเวณสถานีบริการน้ำมัน, สถานที่บันเทิง, สถานที่ออกกำลังกายเสื้อผ้าของผู้ที่ใส่ทำการกิจกรรมกลางแจ้ง หรือแม้แต่เสื้อผ้าที่ถูกแขวนในยานพาหนะ เป็นต้น

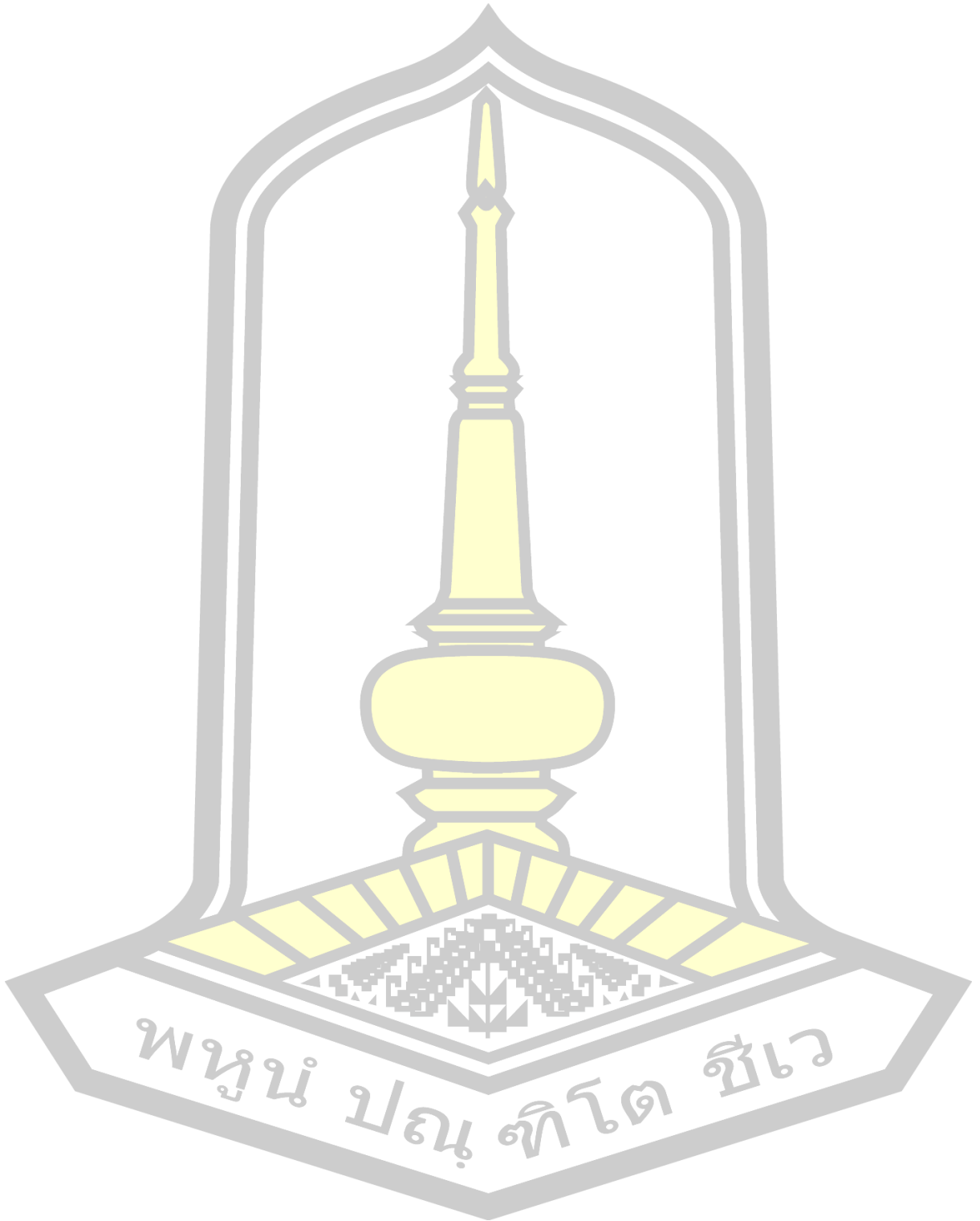
5.2.5 วัสดุประเภทผ้าที่ใช้งานภายในบ้าน ที่พักอาศัย/อาคาร เช่น พรม ผ้าม่าน ผ้าปูโต๊ะ เบาะรองนั่ง รวมถึงการซักล้างด้วยน้ำกลั่น และน้ำยาปรับผ้านุ่มของวัสดุผ้า อาจเป็นแหล่งสะสม และสามารถปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยได้ ซึ่งปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ที่สะสมที่พื้นผิวขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพ เช่น ลักษณะเส้นใยผ้า การทอ และเคมี เช่น สมบัติความชื้นของผ้าที่มาจากพื้นผิวดังเดิม การเติมแต่งจากกระบวนการผลิต หรือการย้อม

5.2.6 จากการวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้น้ำยาปรับผ้านุ่ม ที่มีสารประกอบควอเทอร์นารี แอมโมเนียม เข้มข้นร้อยละ 0.25 (สูตรธรรมดา) และร้อยละ 8 (สูตรเข้มข้น) จะเห็นได้ชัดเจนว่า ผ้าที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มมีสารมลพิษอินทรีย์ระเหยติดและสะสมที่พื้นผิว ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการใช้ น้ำยาปรับผ้านุ่ม เพื่อป้องกันการสะสมสารมลพิษอินทรีย์ที่พื้นผิวผ้า ที่อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง

5.2.7 จากการวิจัยนี้ พบว่า การย้อม มีผลต่อชนิดและปริมาณการปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยออกมา โดยผ้าที่ผ่านการย้อมสีจากธรรมชาติปลดปล่อยสารมลพิษอินทรีย์ระเหยออกมาน้อยกว่าผ้าที่ผ่านการย้อมด้วยเคมี ดังนั้นหากต้องการย้อมสีผ้าควรเลือกใช้สีจากธรรมชาติ

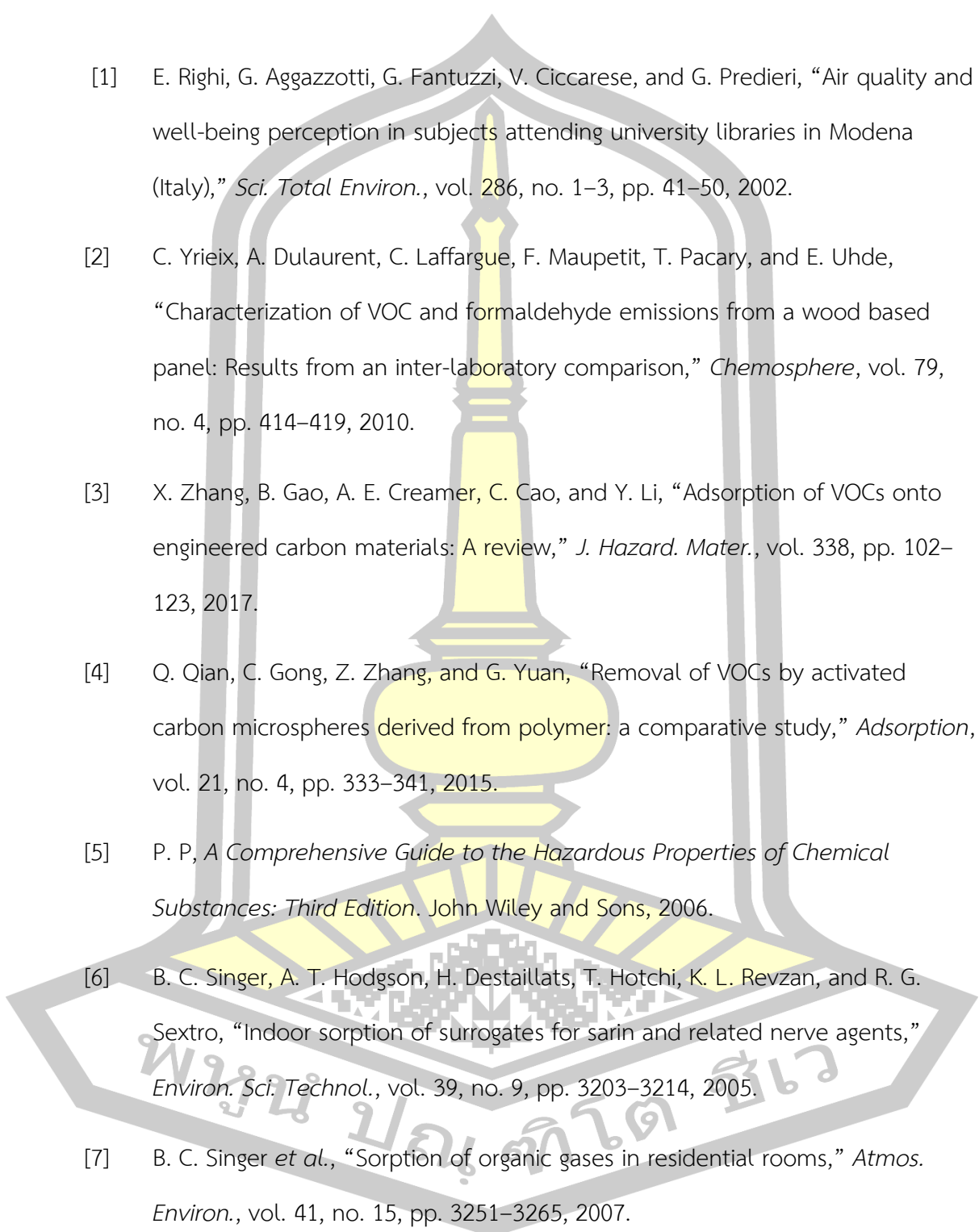
5.2.8 จากการวิจัยนี้ พบว่า ผ้าสามารถเป็นแหล่งสะสมสารมลพิษอินทรีย์ระเหยได้ ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงบริเวณที่อาจก่อให้เกิดการสะสมของสารมลพิษอินทรีย์ที่พื้นผิวผ้าเพิ่มขึ้น เช่น บริเวณที่มีการสูบบุหรี่ บริเวณที่มีแหล่งกำเนิดจากควัน เช่น ควันจากการเผา หรือควันยานพาหนะ เป็นต้น

บรรณานุกรม



พหุมนุ ปณุ ทิโต ชีเว

## บรรณานุกรม

- 
- [1] E. Righi, G. Aggazzotti, G. Fantuzzi, V. Ciccarese, and G. Predieri, "Air quality and well-being perception in subjects attending university libraries in Modena (Italy)," *Sci. Total Environ.*, vol. 286, no. 1–3, pp. 41–50, 2002.
- [2] C. Yrieix, A. Dulaurent, C. Laffargue, F. Maupetit, T. Pacary, and E. Uhde, "Characterization of VOC and formaldehyde emissions from a wood based panel: Results from an inter-laboratory comparison," *Chemosphere*, vol. 79, no. 4, pp. 414–419, 2010.
- [3] X. Zhang, B. Gao, A. E. Creamer, C. Cao, and Y. Li, "Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 338, pp. 102–123, 2017.
- [4] Q. Qian, C. Gong, Z. Zhang, and G. Yuan, "Removal of VOCs by activated carbon microspheres derived from polymer: a comparative study," *Adsorption*, vol. 21, no. 4, pp. 333–341, 2015.
- [5] P. P., *A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances: Third Edition*. John Wiley and Sons, 2006.
- [6] B. C. Singer, A. T. Hodgson, H. Destailats, T. Hotchi, K. L. Revzan, and R. G. Sextro, "Indoor sorption of surrogates for sarin and related nerve agents," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 9, pp. 3203–3214, 2005.
- [7] B. C. Singer *et al.*, "Sorption of organic gases in residential rooms," *Atmos. Environ.*, vol. 41, no. 15, pp. 3251–3265, 2007.
- [8] M. Ongwadee and G. C. Morrison, "Influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to carpet and latex-painted

- gypsum board,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 15, pp. 5415–5420, 2008.
- [9] M. Ongwandee and P. Sawanyapanich, “Influence of relative humidity and gaseous ammonia on the nicotine sorption to indoor materials,” *Indoor Air*, vol. 22, no. 1, pp. 54–63, 2012.
- [10] M. J. Ongwandee M, Chatsuvan T, Suksawas Na Ayudhya W, “Understanding interactions in the adsorption of gaseous organic compounds to indoor materials,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, no. 6, pp. 5654–5668, 2016.
- [11] G. Morrison, N. V. Shakila, and K. Parker, “Accumulation of gas-phase methamphetamine on clothing, toy fabrics, and skin oil,” *Indoor Air*, vol. 25, no. 4, pp. 405–414, 2015.
- [12] A. Saini, C. Rauert, M. J. Simpson, S. Harrad, and M. L. Diamond, “Characterizing the sorption of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) to cotton and polyester fabrics under controlled conditions,” *Sci. Total Environ.*, vol. 563–564, pp. 99–107, 2016.
- [13] Hodgson A, Ming K, Singer B, “Quantifying Object and Material Surface Areas in Residences,” *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, no. January 2004, pp. 1–19, 2004.
- [14] H. S. Andersson K, Fogh C, Byrne M, Roed J, Goddard A, “Radiation dose implications of airborne contaminant deposition to humans,” *Health Phys.*, vol. 82, no. 2, pp. 226–232, 2002.
- [15] O. J. Fenske R, Farahat F, Galvin K, Fenske E, “Contributions of inhalation and dermal exposure to chlorpyrifos dose in Egyptian cotton field workers,” *Int. J. Occup. Environ. Health*, vol. 18, no. 3, pp. 198–209, 2012.
- [16] F. L. Macfarlane E, Carey R, Keegel T, El-Zaemay S, “Dermal exposure

associated with occupational end use of pesticides and the role of protective measures,” *Saf. Health Work*, vol. 4, no. 3, pp. 136–141, 2013.

- [17] W. F. Moore C, Wilkinson S, Blain P, Dunn M, Aust G, “Use of a human skin in vitro model to investigate the influence of ‘every-day’ clothing and skin surface decontamination on the percutaneous penetration of organophosphates,” *Toxicol. Lett.*, vol. 229, no. 1, pp. 257–264, 2014.
- [18] Z. Y. Gong M, Weschler C, “Impact of Clothing on Dermal Exposure to Phthalates: Observations and Insights from Sampling Both Skin and Clothing,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 8, pp. 4350–4357, 2016.
- [19] Y. C. Chien, C. P. Chang, and Z. Z. Liu, “Volatile organics off-gassed among tobacco-exposed clothing fabrics,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 193, pp. 139–148, 2011.
- [20] C. G. Morrison G, Weschler C, Bekö G, Koch H, Salthammer T, Schripp T, Toftum J, “Role of clothing in both accelerating and impeding dermal absorption of airborne SVOCs,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 26, no. 1, pp. 113–118, 2016.
- [21] U. S. E. P. A. US EPA, *Risk assessment and risk management in regulatory decision-making. Final report.* 1997.
- [22] H. S. Jenkins P, Phillips T, Mulberg E, “Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources,” *Atmos. Environ. Part A, Gen. Top.*, vol. 26, no. 12, pp. 2141–2148, 1992.
- [23] S. V. J. Evans, Gary W., “Air Pollution and Human Behavior,” *J. Soc.*, vol. 37(1), no. 1, pp. 95–125, 1981.

- [24] Brinke J, Selvin S, Hodgson A, Fisk W, Mendell M, Koshland C, Daisey J, “Development of New Volatile Organic Compound (VOC) Exposure Metrics and their Relationship to ‘Sick Building Syndrome’ Symptoms,” *Indoor Air*, vol. 8(510), no. 3, pp. 140–152, 1998.
- [25] Brian A. Rock, *Ventilation for Environmental Tobacco Smoke*. 2006.
- [26] องค์วรรณดีมณีรัตน์, “การดูดซับสารมลพิษควันบุหรี่บนวัสดุภายในอาคาร,” *วารสารสิ่งแวดล้อม*, vol. 12, no. 1, pp. 55–60, 2551.
- [27] JAMA, “JAMA Voluntary action program to reduce vocs in passenger compartment. EReport No.98 (JAIA Translation),” 2004.
- [28] D. A. Missia, E. Demetriou, N. Michael, E. I. Tolis, and J. G. Bartzis, “Indoor exposure from building materials: A field study,” *Atmos. Environ.*, vol. 44, no. 35, pp. 4388–4395, 2010.
- [29] องค์วรรณดีมณีรัตน์, *การจัดการคุณภาพอากาศในอาคาร*. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2556.
- [30] B. DE Murray DM, “Residential Air Exchange Rates in the United States: Empirical and Estimated Parametric Distributions by Season and Climatic Region,” *Risk Anal.*, vol. 15, no. 4, pp. 459–465, 1995.
- [31] K.-U. Goss, J. Buschmann, and R. P. Schwarzenbach, “Adsorption of Organic Vapors to Air-Dry Soils: Model Predictions and Experimental Validation,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 13, pp. 3667–3673, 2004.
- [32] DeBoer J, “The Dynamical Character of Adsorption.” Clarendon Press:Oxford, Oxford, 1968.
- [33] R. M. Won D, Corsi R, “Sorptive interactions between VOCs and indoor

- materials,” *Indoor Air*, vol. 11, pp. 246–256, 2001.
- [34] K.-U. Goss and R. P. Schwarzenbach, “Linear Free Energy Relationships Used To Evaluate Equilibrium Partitioning of Organic Compounds,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–9, 2001.
- [35] M. Ongwandee, S. S. Bettinger, and G. C. Morrison, “The influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to a mineral surface,” *Indoor Air*, vol. 15, no. 6, pp. 408–419, 2005.
- [36] C. J. van Oss, *Interfacial Forces in Aqueous Media, Second Edition*. New York: Marcel Dekker, 1994.
- [37] T. R. Abraham M, Andonian-Haftvan J, Whiting G, Leo A, “Hydrogen bonding. Part 34. The factors that influence the solubility of gases and vapours in water at 298 K, and a new method for its determination,” *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2*, no. 8, p. 1777, 1994.
- [38] R. A. Fenske, F. M. Farahat, K. Galvin, E. K. Fenske, and J. R. Olson, “Contributions of inhalation and dermal exposure to chlorpyrifos dose in Egyptian cotton field workers,” 2012.
- [39] A. Tichenor, Z. Guo, J. E. Dunn, L. E. Sparks, and M. A. Mason, “The Interaction of Vapour Phase Organic Compounds with Indoor Sinks,” *Indoor Air*, vol. 1, no. 1, pp. 23–35, 1991.
- [40] R. B. Jørgensen, T. H. Dokka, and O. Bjørseth, “Introduction of a Sink-Diffusion Model to Describe the Interaction between Volatile Organic Compounds (VOCs) and Material Surfaces,” *Indoor Air*, vol. 10, no. 1, pp. 27–38, 2000.
- [41] R. H. W. Robert R Mather, *The Chemistry of Textile Fibres*. Cambridge : Royal

Society of. Chemistry., 2011.

- [42] A. Saini, J. O. Okeme, J. M. Parnis, R. H. Mcqueen, M. L. Diamond, and C. Properties, "From air to clothing: characterizing the accumulation of semi-volatile organic compounds to fabrics in indoor environments," vol. 7, 2016.
- [43] M. L. Joseph, *Essentials of textiles*. Holt Rinehart & Winston, 1984.
- [44] R. E. Noble, "Environmental tobacco smoke uptake by clothing fabrics," *Sci. Total Environ.*, vol. 262, no. 1-2, pp. 1-3, 2000.
- [45] CGSB, "CAN/CGSB-4.2 No. 37-2002 Fabric Thickness.," 2002. [Online]. Available: <https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/ongc-cgsb/publications/catalogue/index-eng.html>.
- [46] Morrison G, Li H, Mishra S, Buechlein M, "Airborne phthalate partitioning to cotton clothing," *Atmos. Environ.*, vol. 115, pp. 149-152, 2015.
- [47] กรมวิทยาศาสตร์บริการสำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, *น้ำยาปรับผ้านุ่ม (Fabric softener)*. 2553.
- [48] J. Pawliszyn, *Applications of Solid Phase Microextraction*. Royal Society of Chemistry, 1999.
- [49] S. A. Wercinski, *Solid-Phase Microextraction: A Practical Guide*. New York: Marcel Dekker, 1999.
- [50] J. Pawliszyn, *Applications of Solid Phase Microextraction* Royal Society of Chemistry. Herfordshire: Herfordshire, 1999.
- [51] J. A. Koziel and J. Pawliszyn, "Air Sampling and Analysis of Volatile Organic Compounds with Solid Phase Microextraction," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 51, no. 2, pp. 173-184, 2001.

- [52] G. Vas and K. Vékey, "Solid-phase microextraction: A powerful sample preparation tool prior to mass spectrometric analysis," *J. Mass Spectrom.*, vol. 39, no. 3, pp. 233–254, 2004.
- [53] P. A. Martos and J. Pawliszyn, "Calibration of Solid Phase Microextraction for Air Analyses Based on Physical Chemical Properties of the Coating," *Anal. Chem.*, vol. 69, no. 2, pp. 206–215, 1997.
- [54] J. Wardecki, W.; Namiesnik, "Studies on the application of solid-phase microextraction for analysis of volatile organic sulphur compounds in gaseous and liquid samples," *Chem. Analityczna*, vol. 44, no. 3A, pp. 485–493, 1999.
- [55] M. C. and J. Pawliszyn, "Analysis of Environmental Air Samples by Solid-Phase Microextraction and Gas Chromatography/Ion Trap Mass Spectrometry," *Environ. Sci. Techno*, vol. 29, no. 3, pp. 693–701, 1995.
- [56] D. Gorlo, B. Zygmunt, M. Dudek, A. Jaszek, M. Pilarczyk, and J. NamieŚnik, "Application of solid-phase microextraction to monitoring indoor air quality," *Fresenius. J. Anal. Chem.*, vol. 363, no. 7, pp. 696–699, 1999.
- [57] NIOSH, "NIOSH manual of analytical methods for aromatic hydrocarbons—method 1501," 2003. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/1501.pdf>.
- [58] J. Koziel, M. Jia, A. Khaled, J. Noah, and J. Pawliszyn, "Field air analysis with SPME device," *Anal. Chim. Acta*, vol. 400, no. 1–3, pp. 153–162, 1999.
- [59] J. A. Koziel, M. Odziemkowski, and J. Pawliszyn, "Sampling and analysis of airborne particulate matter and aerosols using in-needle trap and SPME fiber devices," *Anal. Chem.*, vol. 73, no. 1, pp. 47–54, 2001.

- [60] M. Hippelein, "Analysing selected VOCs in indoor air with solid phase microextraction (SPME): A case study," *Chemosphere*, vol. 65, no. 2, pp. 271–277, 2006.
- [61] N. Baimatova, B. Kenessov, J. A. Koziel, L. Carlsen, M. Bektassov, and O. P. Demyanenko, "Simple and accurate quantification of BTEX in ambient air by SPME and GC-MS," *Talanta*, vol. 154, pp. 46–52, 2016.
- [62] P. A. Martos and J. Pawliszyn, "Sampling and determination of formaldehyde using solid-phase microextraction with on-fiber derivatization," *Anal. Chem.*, vol. 70, no. 11, pp. 2311–2320, 1998.
- [63] Z. O. Tumbiolo S, Gal J, Maria P, "SPME sampling of BTEX before GC/MS analysis: Examples of outdoor and indoor air quality measurements in public and private sites," *Ann. Chim.*, vol. 95, no. 11–12, pp. 757–766, 2005.
- [64] J. Nicolle, V. Desauziers, and P. Mocho, "Solid phase microextraction sampling for a rapid and simple on-site evaluation of volatile organic compounds emitted from building materials," vol. 1208, pp. 10–15, 2008.
- [65] R. H. W. Robert R Mather, *The Chemistry of Textile Fibres*. UK: Royal Society of Chemistry, 2015.
- [66] R. C. Weast, *Handbook of chemistry and physics : a veady reference book of Chemical and physical data*, 51st ed. Florida: Ohio : Chemical Rubber, 1970.
- [67] K.-U. G. Angelika Stenzel, Satoshi Endo, "Measurements and predictions of hexadecane/air partition coefficients for 387 environmentally relevant compounds.," *J. Chromatogr. A*, vol. 1220, pp. 132–142, 2012.
- [68] S. H. Yalkowsky, Y. He, and P. Jain, *Handbook of Aqueous Solubility Data*. New

York: Taylor and Francis Group, 2010.

- [69] M. Cieślak and H. Schmidt, “Contamination of Wool Fibre Exposed to Environmental Tobacco Smoke,” vol. 12, no. 1, pp. 81–83, 2004.
- [70] C. J. Weschler and W. W. Nazaroff, “Semivolatile organic compounds in indoor environments,” *Atmos. Environ.*, vol. 42, no. 40, pp. 9018–9040, 2008.
- [71] L. Petrick, H. Destailats, and I. Zouev, “Sorption , desorption , and surface oxidative fate of nicotine w,” pp. 10356–10364, 2010.
- [72] S. Mishra and V. K. Tyagi, “Ester Quats : The Novel Class of Cationic Fabric Softeners,” vol. 276, no. 6, pp. 269–276, 2007.
- [73] B. P. L. K. Hammond, “Evaluation of vapor-phase nicotine and respirable suspended particle mass as markers for environmental tobacco smoke,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 770–777, 1991.
- [74] K.-U. Goss, “Conceptual Model for the Adsorption of Organic Compounds from the Gas Phase to Liquid and Solid Surfaces,” *Envir Sci Technol*, vol. 31, no. 12, pp. 3600–3605, 1997.
- [75] สิริชชา สำลีทอง, “ความรู้พื้นฐานการผลิตทอผ้าและสวดลาย.” [Online]. Available: [http://www.elfar.ssru.ac.th/siracha\\_sa/pluginfile.php/107/block\\_html/content/สิริชชา\\_กระบวนการผลิตผ้าทอ.pdf](http://www.elfar.ssru.ac.th/siracha_sa/pluginfile.php/107/block_html/content/สิริชชา_กระบวนการผลิตผ้าทอ.pdf).

พหุบัณฑิต ชีวะ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวทับทิม ชาติสุวรรณ
วันเกิด	วันที่ 14 เดือนมกราคม พ.ศ.2532
สถานที่เกิด	จังหวัดเลย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 36 หมู่ 6 ตำบลบ้านเพิ่ม อำเภอผาขาว จังหวัดเลย 42240
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 ปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2558 ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2563 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พหุบัณฑิต ชีวะ