



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลกระทบของไอน้ำและก๊าซผสมต่อการดูดซับสารมลพิษ
อินทรีย์ต่างบนวัสดุภายในอาคาร

โดย นางสาวมณีรัตน์ องค์กรวรรณี

กรกฎาคม 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลกระทบของไอน้ำและก๊าซผสมต่อการดูดซับสารมลพิษ
อินทรีย์ต่างบนวัสดุภายในอาคาร

ผู้วิจัย

รศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณ์

สังกัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
(ความเห็นในรายงานนี้ของผู้วิจัย สกว. และ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นกลาง ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการสำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณ Prof. Glenn Morrison, Missouri University of Science and Technology, USA สำหรับข้อชี้แนะทางเทคนิคของการทดลองและข้อแนะนำต่าง ๆ และขอขอบคุณนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม คือ นางสาวทับทิม ชาติสุวรรณ ผู้ช่วยวิจัยของโครงการนี้

มณีรัตน์ องค์กรวรรณี

กรกฎาคม 2558

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : **RSA5580006**

ชื่อโครงการ : ผลกระทบของไอน้ำและก๊าซผสมต่อการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ต่างบนวัสดุภายในอาคาร

ชื่อนักวิจัย : รศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อีเมล : maneerat.o@msu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 36 เดือน ตั้งแต่ 16 กรกฎาคม 2555 ถึง 15 กรกฎาคม 2558

การดูดซับและการคายสารมลพิษอากาศที่วัสดุภายในอาคาร จัดว่าเป็นกลไกสำคัญที่มีผลต่อรูปแบบการได้รับสัมผัสมลพิษอากาศของผู้อาศัยในอาคาร ซึ่งการดูดซับสารมลพิษขึ้นกับทั้งสมบัติของสารมลพิษ ลักษณะวัสดุอาคาร และปัจจัยสภาพแวดล้อมในอาคารเอง เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และการมีอยู่ของสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในอากาศ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของพื้นผิววัสดุดูดซับได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของความชื้นและสิ่งสกปรกในอากาศที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซสารอินทรีย์ของวัสดุดูดซับ คือ พอลิโพรพิลีน และ พอลิไวนิลคลอไรด์ สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวแทนก๊าซมลพิษในอาคารประกอบด้วย โทลูอีน เตตระคลอโรเอทิลีน เดกเคน นิโคติน และฟีนอล ทำการทดลองการดูดซับในห้องทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 25 ลิตร ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% โดยควบคุมอุณหภูมิการทดลอง 25 °C และความดัน 1 บรรยากาศ ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับและการคายทำนายด้วยแบบจำลองสมมูลมวลที่รวมกลไกการดูดซับที่ผิวหน้าและในเนื้อวัสดุ โดยใช้ชุดข้อมูลความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ตรวจวัดเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม โดยใช้โปรแกรมแมตแล็บ ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุที่อยู่ในอากาศมีค่าอยู่ในช่วง $10^0 - 10^4$ โดยการดูดติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ผิวหน้าพอลิเมอร์ สามารถอธิบายได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยว คือ แรงกระทำแวนเดอร์วาลส์ และแรงกระทำกรด-เบส ลิวิส เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 0% เป็น 50% และ 90% พบว่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่วัสดุพอลิโพรพิลีนของสารอินทรีย์ทั้งหมดยกเว้นนิโคตินมีค่าลดลง ซึ่งคล้ายคลึงกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การดูดซับที่วัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ จึงคาดว่าโมเลกุลของน้ำจากอากาศที่ดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุอาจขัดขวางโมเลกุลสารอินทรีย์ไม่ให้ดูดติดที่ผิววัสดุโดยตรง และส่งผลต่อการดูดซึมของสารอินทรีย์เข้าเนื้อวัสดุเป็นไปยากขึ้น นอกจากนี้พบว่าวัสดุพอลิเมอร์ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานที่มีลักษณะปิดทึบมาก่อน มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโทลูอีนลดลงถึง 64% เมื่อเทียบกับการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์สะอาดซึ่งสิ่งเจือปนในอากาศภายในห้องทำงาน เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก และ สารอินทรีย์กึ่งระเหย อาจดูดติดที่ผิววัสดุทดสอบ และส่งผลให้ลักษณะพื้นผิววัสดุมีพฤติกรรมดูดซับมลพิษสารอินทรีย์เปลี่ยนไป จึงควรมีการศึกษาเชิงผิวสัณฐานวิทยาในเชิงของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์และโมเลกุลที่พื้นผิววัสดุทั้งสภาพดั้งเดิมและที่ถูกทำให้สกปรก

คำหลัก : พอลิเมอร์; สารอินทรีย์ระเหย; การดูดซับ; ความชื้นสัมพัทธ์; การสกปรกของพื้นผิว

Abstract

Project Code : RSA5580006

Project Title : The impacts of water vapor and gas mixture on the sorption of basic (alkaline) organic pollutants onto indoor surfaces

Investigator : Assoc. Prof. Maneerat Ongwandee, Ph.D.
Faculty of Engineering, Mahasarakham University

Email : maneerat.o@msu.ac.th

Project Period : 36 months, From 16 July 2012 to 15 July 2015

Sorption of organic airborne pollutants onto indoor materials is considered to be an important mechanism controlling a pattern of occupant exposure to pollutants. Many factors control indoor sorption including properties of organic pollutants and materials as well as indoor environment e.g. relative humidity and present of other airborne contaminants. These environmental factors can alter physical and chemical properties of material surfaces. This study aimed to measure the effects of relative humidity (RH) and surface soiling on the sorption of polymeric materials, i.e., polypropylene and polyvinylchloride. Tested organic compounds were toluene, tetrachloroethylene, decane, nicotine and phenol. Sorption experiments were conducted in a 25-liter stainless steel chamber at 0, 50 and 90% RH. All experiments were controlled at 25°C and 1 atm. Kinetic parameters of sorption and desorption were determined by fitting measured time-dependent concentrations to the surface and embedded sink model using a MATLAB[®] genetic algorithm toolbox. Results show that equilibrium partition coefficients for the tested organic compounds ranged from 10^0 to 10^4 . Adsorption of the organic molecules to the polymeric surfaces can be explained by intermolecular interactions composed of van der Waals and Lewis acid base components. Increasing RH from 0 to 50% and 90% decreased the partition coefficients between the polypropylene and all tested organic compounds, except for nicotine. A similar trend was also observed for the polyvinylchloride sorption. Adsorbed water molecules on the surface may hinder the direct adsorption of the organic molecules to the bare surface, which in turn, deters permeation of the adsorbed organic molecules into the polymeric substrate. Regarding surface soiling, the tested polypropylene that has been exposed to an office room air exhibited a decrease of the partition coefficient for toluene by 64%, comparing to the sorption of the cleaned surface. Airborne contaminants in the room air e.g. particles or semi organic compounds could change the sorption pattern of organic pollutants. Future studies are needed to investigate morphological surfaces in terms of molecular interactions between organic sorbates and bare and soiled surfaces.

Keywords: Polymers; Volatile organic compounds; Sorption; Relative humidity; Surface soiling

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อ.....	i
Abstract.....	ii
บทนำ.....	1
1. ทฤษฎีและที่มาของการศึกษา.....	1
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
วิธีการทดลอง.....	7
1. วัสดุอุปกรณ์.....	7
2. กระบวนการ.....	11
3. การประกันคุณภาพงานวิจัย.....	25
ผลการทดลองและวิจารณ์.....	31
1. พฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิเมอร์.....	31
2. ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์และค่าสมมูลการดูดซับ.....	37
3. ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิเมอร์.....	43
4. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดติดผิวแบบไม่เจาะจง.....	46
5. ผลของความสกปรกของพื้นผิววัสดุต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์.....	49
6. ผลของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพักต่อการดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องมาก่อน.....	55
7. ผลของการมีอยู่ของสารอินทรีย์อื่นในอากาศต่อความสามารถของวัสดุในการดูดซับ.....	59
8. ผลการศึกษาพื้นผิววัสดุทดสอบ.....	59
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	68
ผลที่ได้จากโครงการวิจัย.....	71
ภาคผนวก.....	72

สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ในบรรยากาศภายในห้อง.....	2
รูปที่ 2 กลไกการขับสารมลพิษอากาศสู่วัสดุภายในอาคาร.....	3
รูปที่ 3 ระบบการทดลองการดูดซับ.....	11
รูปที่ 4 ระบบทดลองช่วงการดูดซับสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุ.....	12
รูปที่ 5 ระบบทดลองช่วงการคายสารอินทรีย์จากแผ่นวัสดุ.....	12
รูปที่ 6 ห้องสะอาดสำหรับใช้ทำความสะอาดวัสดุทดสอบ.....	14
รูปที่ 7 การเตรียมแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศภายในอาคารมาก่อน.....	14
รูปที่ 8 ลักษณะห้องทำงานสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ.....	15
รูปที่ 9 ลักษณะห้องครัวสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ.....	16
รูปที่ 10 ลักษณะร้านเสริมสวยสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ.....	17
รูปที่ 11 ลักษณะห้องพักสตูดิโอของหอพักสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ....	18
รูปที่ 12 ภาพวาดการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบด้วยแบบจำลองคุณภาพอากาศ ที่รวมการดูดซับที่พื้นผิวและในเนื้อวัสดุ.....	21
รูปที่ 13 แผนผังขั้นตอนการทำนายพารามิเตอร์การดูดซับด้วยฟังก์ชัน GA โดยใช้ โปรแกรม MATLAB.....	23
รูปที่ 14 การวัดค่าการรั่วซึมของห้องทดสอบด้วยก๊าซ CO.....	25
รูปที่ 15 การวัดระดับการผสมผสานของอากาศภายในห้องทดสอบด้วยก๊าซ CO.....	26
รูปที่ 16 การทดสอบประสิทธิภาพการนำกลับสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหย.....	27
รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Toluene ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่น วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	31
รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PERC ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่น วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	32
รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Decane ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่น วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	32
รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่น วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	32
รูปที่ 21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Phenol ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่น วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	33
รูปที่ 22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Toluene ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้ง พอลิไวนิลคลอไรด์.....	34
รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PERC ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้ง พอลิไวนิลคลอไรด์.....	35

รูปที่ 24	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Decane ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้ง พอลิไวนิลคลอไรด์.....	35
รูปที่ 25	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้ง พอลิไวนิลคลอไรด์.....	35
รูปที่ 26	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Phenol ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้ง พอลิไวนิลคลอไรด์.....	36
รูปที่ 27	K_{part} ของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ดูดซับสารอินทรีย์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90%.....	43
รูปที่ 28	K_{part} ของแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ดูดซับสารอินทรีย์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90%.....	45
รูปที่ 29	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดซับ แบบไม่เจาะจงของแผ่นพอลิโพรพิลีน.....	47
รูปที่ 30	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดซับ แบบไม่เจาะจงของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์.....	48
รูปที่ 31	การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของสารอินทรีย์ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน.....	50
รูปที่ 32	การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของสารอินทรีย์ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์.....	50
รูปที่ 33	การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของ Toluene ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย.....	52
รูปที่ 34	การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของ Toluene ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย.....	52
รูปที่ 35	ภาพถ่ายแผ่นพอลิโพรพิลีนสะอาดด้วยเครื่อง SEM.....	60
รูปที่ 36	ภาพถ่ายแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์สะอาดด้วยเครื่อง SEM.....	61
รูปที่ 37	ภาพถ่ายแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัว ด้วยเครื่อง SEM.....	61
รูปที่ 38	ภาพถ่ายแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัว ด้วยเครื่อง SEM.....	62
รูปที่ 39	ภาพถ่ายแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องพัก ด้วยเครื่อง SEM.....	63

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตาราง 1 พารามิเตอร์แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารดูดซับ.....	8
ตาราง 2 สมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารดูดซับ.....	9
ตาราง 3 รายละเอียดของสารเคมีที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ดูดซับในการทดลอง.....	9
ตาราง 4 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างก๊าซอินทรีย์ในห้องทดสอบ.....	13
ตาราง 5 สมรรถนะการทำงานของเครื่อง GC/MS สำหรับใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์ 5 ชนิด.....	20
ตาราง 6 สรุปการทดลอง.....	24
ตาราง 7 ประสิทธิภาพการนำกลับของสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหย.....	27
ตาราง 8 ประสิทธิภาพการนำกลับของสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหยเมื่อมี ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ในระบบ.....	28
ตาราง 9 ประสิทธิภาพการสกัดกลับสารอินทรีย์จากหลอดเก็บตัวอย่าง.....	29
ตาราง 10 ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดค่าได้.....	29
ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน แบบสะอาดและสกปรกที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องต่างๆ มาก่อน.....	38
ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ แบบสะอาดและสกปรกที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องต่างๆ มาก่อน.....	40
ตาราง 13 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับไอน้ำของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ สะอาด.....	47
ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ผ่าน การสัมผัสอากาศในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน.....	56
ตาราง 15 สารอินทรีย์ระเหยและอนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนในห้องพักที่ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน.....	58
ตาราง 16 มุมสัมผัสระหว่างผิววัสดุพอลิเมอร์กับหยดน้ำ.....	60

บทนำ

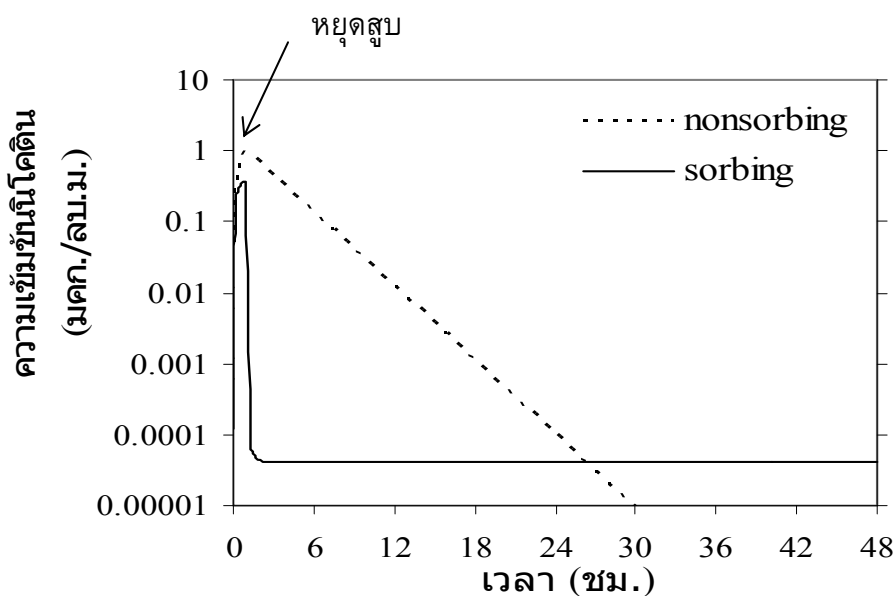
1. ทฤษฎีและที่มาของการศึกษา

ในแต่ละวัน คนเราได้รับสารประเภทต่างๆ ในรูปของของไหลเข้าสู่ร่างกายด้วยการบริโภคน้ำและการหายใจ ประมาณ 13 และ 87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยทั้งนี้ประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ของมวลของไหลที่เข้าสู่ร่างกายทางการหายใจนั้นเกิดขึ้นในขณะที่คนเราอาศัยอยู่ในอาคาร (Layton, 1993) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้รับการยืนยันจากผลการศึกษารูปแบบการดำเนินชีวิตของประชาชนในมลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยพบว่าประชาชนที่อาศัยในเขตเมืองใช้เวลาโดยเฉลี่ยในแต่ละวันอยู่นอกอาคารหรือในพื้นที่โล่งแจ้งเพียง 6 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ในขณะที่ใช้เวลาถึง 87 เปอร์เซ็นต์ภายในอาคารและอีก 7 เปอร์เซ็นต์ในยานพาหนะระหว่างการเดินทาง (Jenkins, 1992) ดังนั้นการได้รับสัมผัส (Exposure) สารมลพิษอากาศของคนในเมืองจึงเกิดขึ้นภายในอาคารมากกว่าขณะดำเนินกิจกรรมอยู่นอกอาคาร จากข้อเท็จจริงดังกล่าวทำให้องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, US EPA) กำหนดให้ความเสี่ยงทางสุขภาพของมนุษย์อันเนื่องมาจากคุณภาพอากาศในอาคารอยู่ใน 5 อันดับแรกของความเสี่ยงทางสุขภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อมต่างๆ (US EPA, 1997)

งานวิจัยจำนวนมากที่ตรวจวัดระดับมลพิษอากาศภายในและนอกอาคาร พบว่ามลพิษอากาศเช่นสารอินทรีย์ระเหยตรวจพบในอาคารมีมากกว่า 300 ชนิด (Berglund et al., 1986) และส่วนใหญ่มีความเข้มข้นสูงกว่าในบรรยากาศภายนอกอาคารถึง 2-5 เท่า (Wallace et al., 1987) บางแห่งอาจมีค่าสูงถึง 400 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของอาคาร เช่น การระบายอากาศ, วัสดุตกแต่ง, หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในอาคาร และจากกิจกรรมของผู้อยู่อาศัย เช่น การใช้สารเคมีทำความสะอาดในอาคาร, การทำครัว, การสูบบุหรี่ หรือแม้แต่การใช้ผลิตภัณฑ์ส่วนตัว เช่น น้ำหอม, สเปรย์ รวมไปถึงแหล่งกำเนิดมลพิษจากภายนอกอาคาร เช่น การจราจร เป็นต้น โดยผลกระทบที่ผู้อาศัยได้รับจากการสัมผัสหรือหายใจเอาสารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ร่างกาย สามารถแบ่งได้เป็น ปัญหาภาวะน่าสบาย (Comfort problems) ซึ่งรวมถึงเรื่องของกลิ่นและความรำคาญที่เกิดขึ้น และ ผลกระทบเชิงสุขภาพของผู้อยู่อาศัย งานวิจัยหลายบทความระบุตรงกันว่า กลุ่มอาการป่วยเหตุอาคาร (Sick-building syndromes, SBS) เช่น ปวดศีรษะ, วิงเวียน, คัดจมูก, คอแห้ง, ระคายเคือง, หายใจไม่ค่อยออก เป็นต้น มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบในอากาศภายในอาคารอย่างชัดเจน แม้ว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดยหน่วยงานด้านอาชีวอนามัยก็ตาม (Evan and Jacob, 1981; Hedge, 1989; Ten Brinke et al., 1998) นอกจากนี้สารอินทรีย์ระเหยบางชนิดยังจัดอยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อสารเคมีที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา และองค์กรนานาชาติการวิจัยมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer, IARC) ตัวอย่างเช่น เบนซิน จัดอยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็งประเภท A (Known human carcinogen)

มลพิษอากาศในอาคารเมื่อถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแล้ว สามารถเคลื่อนที่ (Transport) และเปลี่ยนแปลง (Transformation) ได้จนกระทั่งมลพิษหายไปจากอากาศในอาคาร โดยรวมเรียกว่า Fate

and transport หนึ่งในกลไกที่สำคัญ คือ การดูดซับ (Sorption) ซึ่งหมายรวมถึงการดูดติดของโมเลกุล สารมลพิษที่ผิวหน้าวัสดุ (Adsorption) และการดูดกลืนเข้าสู่เนื้อในวัสดุ (Absorption) การดูดซับจะส่งผลให้ความเข้มข้นมลพิษในอากาศลดลง แต่ขณะเดียวกันวัสดุที่ดูดซับมลพิษแล้วจะคาย (Desorption) โมเลกุลสารมลพิษกลับสู่บรรยากาศในอาคารด้วยเช่นกัน โดยอัตราการคายในช่วงแรกจะเป็นไปอย่างช้าๆ และจะเพิ่มขึ้นจนระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล (Steady state) จึงอาจกล่าวได้ว่า วัสดุอาคารทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งรองรับ (Sink) และแหล่งกำเนิดมลพิษ (Source) ปรากฏการณ์เช่นนี้คล้ายคลึงกับการคงอยู่ของกลิ่นอาหารในห้องครัวหลังเสร็จสิ้นการทำอาหารแล้วหรือกลิ่นบุหรี่ยี่ห้อในห้องพักที่เคยมีการสูบบุหรี่มาก่อน ยกตัวอย่างเช่น ห้องพักแห่งหนึ่งมีการสูบบุหรี่เป็นเวลาติดต่อกัน 1 ชม. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ซึ่งเป็นสารบ่งชี้ถึงมลพิษสิ่งแวดล้อมควันบุหรี่ (Environmental tobacco smoke, ETS) ในอากาศภายในห้องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยแบ่งแบบจำลองเป็น 2 กรณี คือ (1) วัสดุอาคารไม่มีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษโดยสิ้นเชิง (Nonsorbing materials) และ (2) วัสดุในอาคารตามสภาพเป็นจริงที่สามารถดูดซับและคายสารมลพิษได้ (Sorbing materials) ในการคำนวณนี้กำหนดให้ห้องมีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 0.4 ต่อ ชม. (มณีรัตน์, 2551)

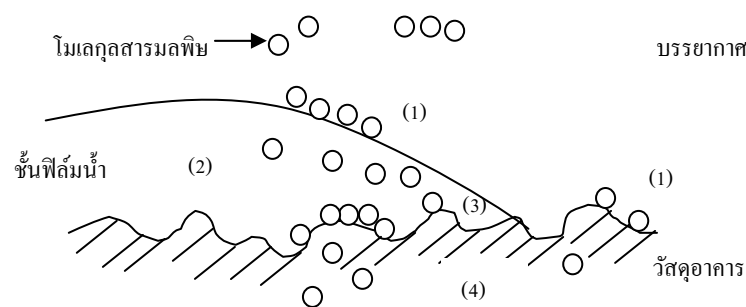


รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ในบรรยากาศภายในห้อง

จากรูปที่ 1 เมื่อสิ้นสุดชั่วโมงที่หนึ่ง ความเข้มข้นของ Nicotine ในอากาศจะมีค่าสูงสุดทั้ง 2 กรณี แต่ในกรณีที่ 2 จะต่ำกว่าในกรณีที่ 1 ทั้งนี้เพราะ Nicotine ส่วนใหญ่ในอากาศถูกดูดซับบนวัสดุอาคาร ส่วนการระบายอากาศจะกำจัด Nicotine ออกจากห้องได้เพียง 13% เท่านั้น หลังการสูบบุหรี่สิ้นสุดลง วัสดุอาคารจะคาย Nicotine ที่ดูดซับอยู่บนผิววัสดุกลับสู่บรรยากาศอย่างช้า ๆ จากแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า ผู้อาศัยในห้องที่เคยมีการสูบบุหรี่มาก่อนจะได้รับนิโคตินอยู่ตลอดเวลาที่อาศัยอยู่ แม้จะไม่มีการสูบบุหรี่เกิดขึ้นอีกก็ตาม กลไกการคายตัวของนิโคตินสู่อากาศภายในห้องจะดำเนินต่อไปเป็นระยะ

เวลานานกว่า 3 ปี ดังนั้นกลไกการดูดซับและการคายจึงมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อลักษณะและรูปแบบการได้รับหรือสัมผัสมลพิษอากาศของผู้อาศัยในอาคาร

การดูดซับสารมลพิษ เช่น สารอินทรีย์ในอากาศ บนผิววัสดุในอาคารประกอบด้วยกลไกหลายอย่าง que ผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในรูปของก๊าซมาสู่บนผิวหรือในเนื้อวัสดุ กระบวนการนี้ คล้ายคลึงกับการดูดซับของสารอินทรีย์ในบรรยากาศสู่ผิวดินที่มีความชื้นภายใต้สภาวะแวดล้อมภายนอก (Pennell et al., 1992) สามารถแสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยกลไกดังต่อไปนี้ (1) การดูดติดผิวของสารมลพิษบนชั้นฟิล์มน้ำที่ปกคลุมผิววัสดุ หรือการดูดติดที่ผิววัสดุโดยตรง, (2) การดูดกลืนหรือการละลายของสารมลพิษเข้าไปในชั้นฟิล์มน้ำ, (3) การดูดติดของสารมลพิษบนผิววัสดุอาคารหลังจากดูดกลืนเข้าไปในชั้นฟิล์มน้ำ และ (4) การแทรกซึม (Permeation) ของสารมลพิษเข้าสู่เนื้อวัสดุอาคาร อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Ongwandee et al. (2005), Ongwandee and Morrison (2008) และ Ongwandee and Sawanyapanich (2012) ชี้ให้เห็นว่า การดูดติดของโมเลกุลสารอินทรีย์ระเหยต่างที่ผิววัสดุและที่ชั้นฟิล์มหรือโมเลกุลของน้ำเป็นกลไกที่สำคัญกว่าการดูดกลืนเข้าไปในชั้นฟิล์มน้ำ



รูปที่ 2 กลไกการซับสารมลพิษอากาศสู่วัสดุภายในอาคาร

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษประกอบด้วยลักษณะกายภาพและเคมีของสารมลพิษและผิววัสดุ ความหนา ความมีรูพรุน รวมทั้งปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมในอาคาร เช่น ระดับความชื้นสัมพัทธ์ และการมีอยู่ของสารเจือปนอื่นในอากาศ ซึ่งปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของผิววัสดุเดิม รวมถึงการแย่งพื้นที่ดูดติด (Competitive adsorption) ส่งผลให้วัสดุอาคารมีรูปแบบการดูดซับมลพิษต่างไปจากเดิม อย่างไรก็ตาม การหาความสามารถของวัสดุอาคารในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ซึ่งมีอยู่จำนวนมากด้วยวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ จึงอาจเป็นงานที่ยากลำบาก นอกจากนี้การทดลองเพื่อหาผลที่แม่นยำอาจไม่มีความจำเป็นมากในเชิงวิศวกรรมด้านการจัดการคุณภาพอากาศในอาคาร ดังนั้นการหาค่าความสามารถการดูดซับของวัสดุบนพื้นฐานของหลักแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับ อาจจะสามารถให้ผลเชิงสัมพัทธ์ (Relative value) ระหว่างสารมลพิษอินทรีย์หรือระหว่างชนิดวัสดุอาคารที่แตกต่างกันได้ในระดับที่เพียงพอต่อการนำผลการทำนายไปประยุกต์ใช้ด้านการจัดการคุณภาพอากาศในอาคารต่อไป

ในงานวิจัยทางเคมีบรรยากาศของการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยในบรรยากาศทั่วไปที่พื้นผิววัสดุ เช่น ดิน และ แร่ธาตุ มีการประยุกต์ใช้หลักเทอร์โมไดนามิกเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การดูดซับซึ่ง เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ i ระหว่างเฟสในอากาศและเฟสที่พื้นผิว Goss (1997a, 1997b) อธิบายพลังงานอิสระทั้งหมดของการดูดซับ (Total free energy of adsorption, ΔG_{ads}^o) มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจาก 2 ส่วนประกอบ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals interaction component, ΔG^{LW}) และแรงกระทำกรด-เบส (Acid-base interaction component, ΔG^{AB}) ซึ่งคล้ายคลึงกับงานของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้า (Work of adhesion) แสดง ได้ดังสมการ (1)

$$\Delta G_{ads}^o = \Delta G^{LW} + \Delta G^{AB} \quad (1)$$

ในขณะที่แบบจำลองเชิงหลักการของการดูดซับที่สภาวะสมดุลระหว่างโมเลกุลก๊าซความเข้มข้นเจือจาง และพื้นผิว ซึ่งพิจารณาว่าเป็นการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลก๊าซจากความดันมาตรฐานอ้างอิง ไปสู่สภาวะ ที่โมเลกุลก๊าซถูกดูดซับบนพื้นผิว สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2)

$$\Delta G_{ads}^o = -RT \ln(2.99 \cdot 10^8 K_i) \quad (2)$$

โดยที่ R = ค่าคงที่ก๊าซอุดมคติ (Ideal gas constant), T = อุณหภูมิสมบูรณ์ และ K_i = ค่าคงที่ของการดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption equilibrium constant) หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารถูกดูดซับระหว่าง 2 เฟส (Partition coefficient) เมื่อแทนสมการ (1) ใน (2) โดยเทอมแรงกระทำจากแรงแวนเดอร์วาลส์ของก๊าซถูกดูดซับ i สามารถแทนด้วยสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของก๊าซ i ระหว่างของเหลว Hexadecane และอากาศ ($K_{i, \text{hexadecane} / \text{air}}$) ส่วนแรงแวนเดอร์วาลส์ของพื้นผิว (γ_{surf}^{vdW}) แทนด้วยค่าพลังงานอิสระของพื้นผิว สำหรับองค์ประกอบจากแรงกระทำกรด-เบสของก๊าซถูกดูดซับแทนด้วยระดับพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ของ Abraham et al. (1994) แบ่งเป็น H-acceptor ($\sum \beta_{i2}^H$) และ H-donor ($\sum \alpha_{i2}^H$) ส่วนแรงกระทำกรด-เบสของพื้นผิวแทนด้วยค่าของ Electron acceptor (EA_{surf}) และ Electron donor (ED_{surf}) ได้ดังสมการ (3) (Goss and Schwarzenbach, 2001)

$$\log K_{i, \text{surf} / \text{air}} = a \log K_{i, \text{hexadecane} / \text{air}} \sqrt{\gamma_{surf}^{vdW}} + b(\sum \beta_{i2}^H)EA_{surf} + c(\sum \alpha_{i2}^H)ED_{surf} - d \quad (3)$$

โดยที่ a , b , c และ d คือ ค่าคงที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (Regression constants)

แบบจำลองการทำนายค่าความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ของวัสดุอาคารที่ใช้ในปัจจุบัน ยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำนายสารมลพิษที่มีลักษณะกายภาพและเคมีต่างจากสารมลพิษที่ใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง และยังไม่สามารถนำไปใช้กับวัสดุอาคารที่ต่างจากวัสดุที่ทดสอบใน

ห้องปฏิบัติการเพื่อใช้สร้างแบบจำลอง ในขณะที่แบบจำลองของ Goss and Schwarzenbach ได้รับการพิสูจน์เพื่อนำไปใช้ทำนายความสามารถของวัสดุตามธรรมชาติในการดูดซับสารมลพิษในบรรยากาศทั่วไปได้อย่างหลากหลาย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Goss and Schwarzenbach เพื่อทำนายความสามารถของวัสดุอาคารในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ ซึ่งคาดว่าจะการทำนายด้วยแบบจำลองจะสามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการลงได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อความสามารถของวัสดุอาคารในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสิ่งเจือปนในอากาศที่ทำให้เกิดความสกปรกที่พื้นผิววัสดุอาคารต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์
- 3) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของวัสดุอาคารในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์กับ แรงกระทำระหว่างโมเลกุล

3. ขอบเขตของงานวิจัย

ระยะที่ 1

การทดลองการดูดซับทำโดยใช้ห้องทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมปริมาตร 25 ลิตรที่ติดตั้งวัสดุทดสอบภายใน สารมลพิษอินทรีย์ถูกปล่อยเข้าห้องทดสอบด้วยปริมาณที่แน่นอน จากนั้นวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารมลพิษอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบเป็นเวลา 16-20 ชม. ซึ่งชุดข้อมูลดังกล่าวถูกใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับและการคายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมดุลมวลสารอินทรีย์ที่ทดสอบโดยแบ่งขอบเขตของระบบสมดุลมวลออกเป็น 3 ส่วน คือ ในอากาศ ที่พื้นผิววัสดุ และในเนื้อวัสดุ ใช้เครื่องมือเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm, GA) ปฏิบัติการบนโปรแกรม MATLAB[®] สำหรับทำนายค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ ตัวแปรที่กำหนดใช้ในการทดลองโดยสังเขปมีดังนี้

1) วัสดุดูดซับที่ใช้เป็นตัวแทนวัสดุอาคาร คือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) แบ่งการทดสอบการดูดซับตามสภาพวัสดุพอลิเมอร์เป็น 2 ลักษณะ คือ

- แผ่นพอลิเมอร์สะอาด
- แผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องลักษณะต่างๆ มาก่อน ซึ่งได้แก่ ห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย

2) สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวแทนสารมลพิษอากาศในอาคาร คือ Toluene, Tetrachloethylene, Decane, Nicotine และ Phenol

3) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในอาคารที่กำหนดในการทดสอบ คือ 0%, 50% และ 90%

4) การทดลองการดูดซับทั้งหมดทำที่อุณหภูมิ 25°C. ความดันในห้องทดสอบ 1 บรรยากาศ และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบ 1.2 ต่อ ชม.

ระยะที่ 2

ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอิทธิพลของสิ่งเจือปนในอากาศในห้องพัก ต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ของวัสดุอาคารที่สัมผัสกับอากาศในห้องพักดังกล่าว โดยทำการทดสอบบนสมมติฐานว่า อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพักมีผลต่อระดับของสิ่งเจือปนในอากาศ ซึ่งจะส่งผลต่อระดับความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุ และมีผลต่อเนื่องถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับสารมลพิษอากาศชนิดอื่นที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศในห้องในภายหลัง ตัวแปรที่กำหนดใช้ในการทดลองโดยสังเขปมีดังนี้

- 1) ห้องที่ใช้ติดตั้งแผ่นวัสดุทดสอบเพื่อให้สัมผัสกับอากาศภายในห้อง ก่อนนำมาทำการทดสอบการดูดซับ คือ ห้องพักแบบสตูดิโอตกแต่งภายในของหอพักแห่งหนึ่ง
- 2) อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพัก ควบคุมที่ 0.7, 2 และ 10 ต่อ ชม.
- 3) วัสดุทดสอบ คือ พอลิโพรพิลีน
- 4) สารอินทรีย์ที่ทดสอบ คือ Tetrachloethylene และ Nicotine

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิววัสดุทั้งด้านแรงกระทำของพื้นผิววัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิววัสดุกับหยดของเหลว (Contact angle) เพื่อหาระดับพลังงานอิสระการดูดซับของพื้นผิว และด้านสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อสังเกตถึงความแตกต่างระหว่างผิวหน้าแผ่นพอลิเมอร์สะอาดและแผ่นที่ผ่านการสัมผัสอากาศในลักษณะต่างๆ มาก่อน

วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ วัสดุอุปกรณ์ กระบวนการทดลอง และการประกันคุณภาพงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุอุปกรณ์

รายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบการดูดซับประกอบด้วย การเลือกสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวแทนสารมลพิษในอาคาร การเลือกวัสดุภายในอาคาร และระบบทดลอง

1.1 สารอินทรีย์ที่ใช้ทดสอบ

การเลือกชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองพิจารณาจากปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ คุณสมบัติแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสาร สารมลพิษอินทรีย์ถูกตรวจพบได้ในอาคาร และวิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซรวมทั้งการวิเคราะห์ทางเคมีสามารถกระทำได้ที่ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(1) แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์

เนื่องจากการดูดซับของโมเลกุลก๊าซอินทรีย์ที่พื้นผิววัสดุดูดซับเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำระหว่างกัน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ และ แรงกรด-เบส (หรือพันธะไฮโดรเจน) โดยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลแบบไม่เจาะจง หรือ Nonspecific intermolecular interactions ซึ่งในที่นี้คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ สำหรับตัวเลขเชิงปริมาณของแรงยึดเหนี่ยวชนิดนี้ของโมเลกุลก๊าซถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของก๊าซนั้นระหว่าง Hexadecane และอากาศ ($K_{i, \text{hexadecanair}}$) ส่วนแรงกระทำกรด-เบส เป็นแรงกระทำระหว่างโมเลกุลแบบเจาะจง หรือ Specific intermolecular interactions แรงกระทำกรด-เบสของโมเลกุลสารอินทรีย์สามารถแสดงได้ด้วยสเกลของพารามิเตอร์พันธะไฮโดรเจน (Scales of hydrogen bond parameters) ซึ่งมีการรวบรวมและนำเสนอโดย Abraham et al. (1994) บอกถึงค่าประสิทธิผลพันธะไฮโดรเจนความเป็นกรด (Effective hydrogen-bond acidity, $\Sigma\alpha^H$) และค่าประสิทธิผลพันธะไฮโดรเจนความเป็นเบส (Effective hydrogen-bond basicity, $\Sigma\beta^H$) ของโมเลกุลสารอินทรีย์แต่ละชนิด ทั้งนี้สมบัติพารามิเตอร์ของแรงแวนเดอร์วาลส์และพันธะไฮโดรเจนคาดว่าจะมีอิทธิพลสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับของสารอินทรีย์ที่พื้นผิววัสดุทดสอบทั้งในกรณีที่มีไอน้ำและไม่มีไอน้ำปรากฏในบรรยากาศ ส่วนแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงกรด-เบสของพื้นผิววัสดุจะกล่าวถึงในหัวข้อ 1.2

(2) สารมลพิษอินทรีย์ตรวจพบในอากาศภายในอาคารทั่วไป

สารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นสารมลพิษอากาศที่ตรวจพบได้ภายในอาคารทั่วไป เช่น อาคารสำนักงาน ที่พักอาศัย เป็นต้น ไม่เจาะจงมาจากสถานประกอบการภาคอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น Toluene และ Decane เป็นตัวทำละลายที่มีใช้กับวัสดุอาคารหลายชนิด ทั้งสารเคลือบเฟอร์นิเจอร์

เครื่องเขียนสำนักงาน และอื่นๆ ในขณะที่ Tetrachloroethylene ใช้ในสารซักแห้งเสื้อผ้า ส่วน Nicotine และ Phenol มีแหล่งกำเนิดมาจากการสูบบุหรี่ เป็นต้น

(3) วิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซและการวิเคราะห์ทางเคมี

สารอินทรีย์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้สามารถเก็บตัวอย่างในรูปก๊าซด้วยด้วยอุปกรณ์ เครื่องมือ และวิเคราะห์ปริมาณทางเคมีตามวิธีมาตรฐานสากลที่ผู้วิจัยและมหาวิทยาลัยที่ผู้วิจัยสังกัดมีใช้อยู่ ณ ปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการดำเนินการทดลอง

ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้คัดเลือกสารอินทรีย์ 7 ชนิด ได้แก่ Toluene, Tetrachloroethylene (PERC), Decane, Nicotine, Phenol, Pyridine และ Acetic acid ซึ่งจากผลการทดสอบเบื้องต้นตามหลักการประกันคุณภาพงานวิจัยของการเก็บตัวอย่างก๊าซและการวิเคราะห์ทางเคมี สามารถคัดเลือกสารอินทรีย์ 5 ชนิดที่ใช้เป็นตัวแทนสารดูดซับในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย Toluene, PERC, Decane, Nicotine และ Phenol ซึ่งสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดมีสมบัติพารามิเตอร์แรงกระทำระหว่างโมเลกุลและสมบัติทางเคมีดังตาราง 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนตาราง 3 แสดงรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ดูดซับในการทดลอง

ตาราง 1 พารามิเตอร์แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารดูดซับ

Sorbate	Vapor pressure *	$K_{\text{hexadecane/air}}$ ** (m^3/m^3)	Effective hydrogen-bond acidity **	Effective hydrogen-bond basicity **
Toluene	3466 (25°C)	3.325	0.00	0.14
Tetrachloroethylene	2533 (25°C)	3.584	0.00	0.00
n-Decane	122 (25°C)	4.686	0.00	0.00
Nicotine	5.3 (25°C)	5.870	0.00	0.6 ***
Phenol	47 (20°C)	3.766	0.60	0.31

* Bloch (1999)

** Abraham et al. (1994)

*** ประมวลค่าจาก Pyridine

ตาราง 2 สมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารดูดซับ*

Class	Sorbate	structure	Formula	Molecular weight (g/mol)	Density (g/ml)	Boiling point (°C)	Melting point (°C)
Aromatic	Toluene		C ₇ H ₈	92.14	0.8669	110.6	-93
	Phenol		C ₆ H ₆ O	94.11	1.079	181.7	40.5
	n-Decane		C ₁₀ H ₂₂	142.28	0.730	174	-30 - -29
Amine	Nicotine		C ₁₀ H ₁₄ N ₂	162.26	1.01	247	-79
Chlorinated	Tetrachloethylene		C ₂ Cl ₄	165.38	1.622	121.1	-19

* Bloch (1999)

ตาราง 3 รายละเอียดของสารเคมีที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ดูดซับในการทดลอง

Chemical	CAS. No	% Purity	Company
Toluene	108-88-3	99.5	Panreac Quimica, S.A.U.
PERC	127-18-4	99	Merck Chemicals, Ltd.
n-Decane	124-18-5	99	Sigma-Aldrich, Co.
Nicotine	54-11-5	99	Sigma-Aldrich, Co.
Phenol	108-95-2	99	Sigma-Aldrich, Co.

1.2 วัสดุทดสอบ

หนึ่งในวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของแรงยึดเหนี่ยวของการดูดซับระหว่างโมเลกุลสารมลพิษอินทรีย์และวัสดุอาคาร อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้ในอาคารมีหลากหลายชนิด มีความแตกต่างกันค่อนข้างมากทั้งลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการควบคุมตัวแปรอื่นๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาวัสดุประเภทพอลิเมอร์เพราะเป็นวัสดุพื้นฐาน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) และมีโครงสร้างเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ทำวัสดุเครื่องใช้ในอาคารจำนวนมากและยังมีการใช้เป็นส่วนประกอบใน สีทาอาคาร กาว สารประสาน สารเคลือบผิว เป็นต้น (Yu and Crump, 1998) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิโพรพิลีน และ พอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างของค่าพลังงานอิสระพื้นผิวสำหรับการดูดซับซึ่งแสดงในตาราง 3 หมายถึง γ_{surf}^{vdW} คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ของพลังงานอิสระพื้นผิว (van der Waals

component of the surface free energy), EA_{surf} คือพารามิเตอร์แสดงความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของพื้นผิวหรือพารามิเตอร์แสดงความเป็นเบส (Electron acceptor parameter) และ ED_{surf} คือพารามิเตอร์แสดงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของพื้นผิวหรือพารามิเตอร์แสดงความเป็นกรด (Electron donor parameter) ตาราง 3 ยังแสดงพารามิเตอร์แรงกระทำของน้ำซึ่งจะเกี่ยวข้องการทดลองการดูดซับที่มีไอน้ำในอากาศด้วย

ตาราง 3 พารามิเตอร์แรงกระทำของวัสดุพื้นฐานที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับในอาคาร*

Surface	γ_{surf}^{vdW}	EA_{surf}	ED_{surf}
Polypropylene	33	0	0
Polyvinylchloride	43	0.04	3.5
Water	21.8	25.5	25.5

* Goss (1997)

แผ่นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แผ่นพอลิโพรพิลีน ความหนา 0.05 มม. (Cole-Palmer Co., USA) และแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ ความหนา 0.07 มม. (OPPC Public CO. Ltd., Thailand)

1.3 ระบบทดลองการดูดซับ

ระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

(1) ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซประกอบด้วย มิเตอร์คุมอัตราการไหล 2 เครื่อง และเครื่องควบคุม 1 เครื่อง (Mass flow meters and controller, MKS Instruments, USA)

(2) ห้องทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 304) ขนาด 25 ลิตร ฝาด้านบนต่อกับข้อต่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Fittings) ขนาด ¼ นิ้ว (Swagelok, USA) เชื่อมต่อกับสายเทฟลอน (Teflon®) สำหรับนำก๊าซเข้าออก ฝายึดกับตัวห้องด้วย C-clamp จำนวน 8 ตัว มีแหวนรองระหว่างตัวห้องกับฝาดำจากยาง Viton® เพื่อป้องกันก๊าซรั่วซึมจากห้องทดสอบ

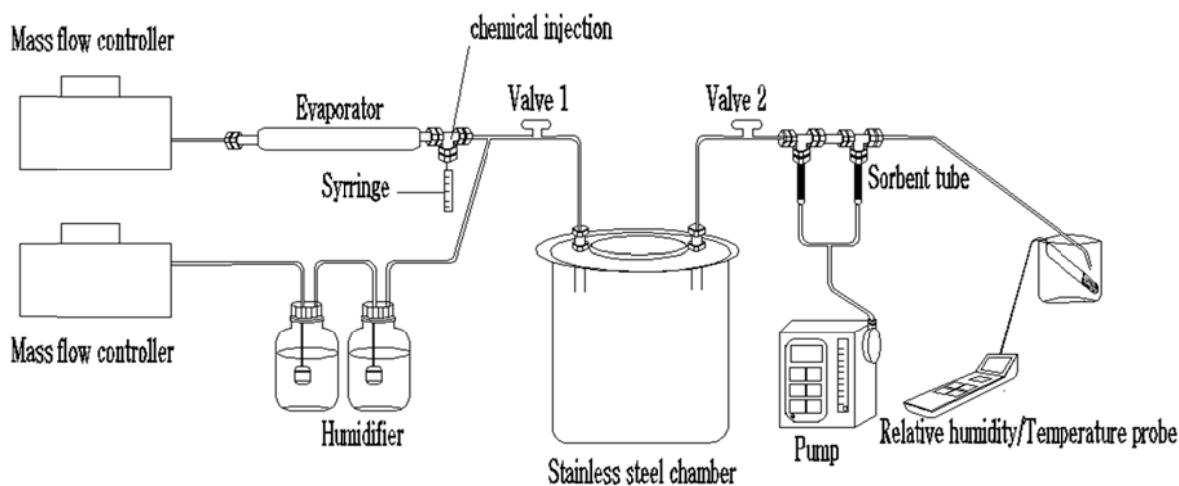
(3) อุปกรณ์สร้างไอระเหยสารอินทรีย์ (Evaporator) ทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด ¼ นิ้ว ยาว 7.5 ซม. หุ้มด้วยท่อให้ความร้อนซึ่งต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่ 288-300°C. และข้อต่อสามทาง (Tee fitting) สำหรับใช้ในการฉีดของเหลวสารอินทรีย์ที่ต้องการทำให้เป็นไอระเหย (Chemical injection)

(4) อุปกรณ์สร้างความชื้นให้กับก๊าซ (Humidifier) โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในช่วงแก้วปิดสนิทที่บรรจุน้ำกลั่น (DI water) เพื่อให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์ตามค่าที่กำหนด

(5) ถังก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.999% ซึ่งใช้เป็นก๊าซสำหรับผสมไอสารอินทรีย์ให้ได้ตามความเข้มข้นที่กำหนด และเป็นก๊าซพาในระบบทดสอบ

(6) ชุดเก็บตัวอย่างก๊าซอินทรีย์ ประกอบด้วยหลอดเก็บตัวอย่างและปั๊มเก็บตัวอย่าง (Sorbent tubes and sampling pump, SKC, USA) รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 2.4

(7) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในก๊าซภายในห้องทดสอบ (Hanna Instruments, USA) ซึ่งสอดอยู่ในขวดลูกชมฟุ้งขนาด 250 มล. โดยให้สัมผัสกับก๊าซที่ไหลออกมาจากห้องทดสอบ

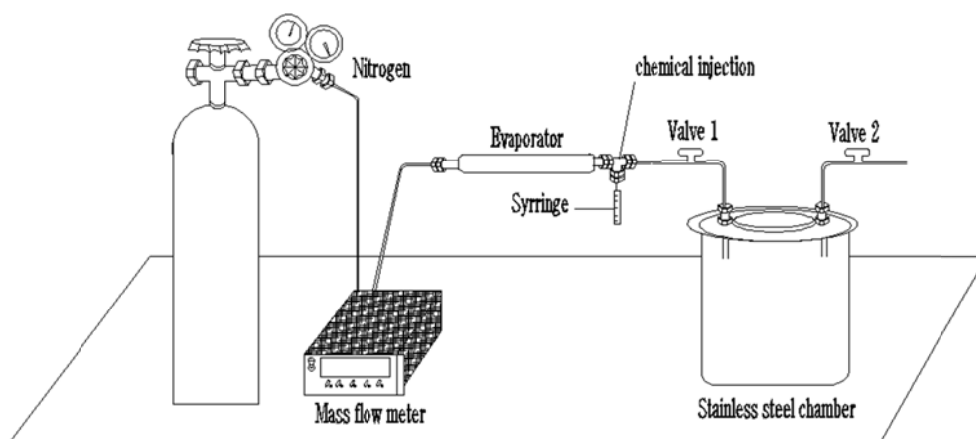


รูปที่ 3 ระบบการทดลองการดูดซับ

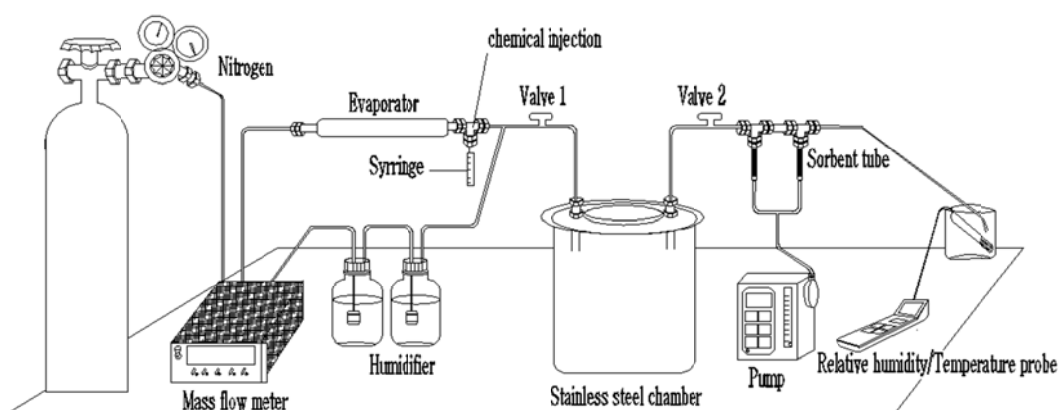
2. กระบวนการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองเริ่มโดยการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดหรือทำให้สกปรกมาแล้ว ให้คลุมพื้นผิวของห้องทดสอบทั้งหมด รวมเป็นพื้นที่ผิวการดูดซับ 0.48 ตร.ม. จากนั้นสร้างความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซภายในห้องทดสอบให้ได้ตามค่าที่กำหนด ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1-2 ชม. ขั้นตอนการทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการดูดซับแสดงดังรูปที่ 4 (Sorption stage) และช่วงการคายแสดงดังรูปที่ 5 (Desorption stage) เริ่มต้นด้วยการระเหยสารเคมีที่ใช้เป็นสารมลพิษในการดูดซับโดยการฉีดของเหลวสารเคมีบริสุทธิ์ด้วยเข็มฉีดยา (Micro-syringe, SGE, Australia) ปริมาตร 0.08 มล. เข้าไปที่อุปกรณ์สร้างไอรระเหย พร้อมทั้งปล่อยก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 50 มล./นาที เข้าในห้องทดสอบเป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที และปิดวาล์วที่ 2 (รูปที่ 4) ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดการดูดซับสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุทดสอบมากกว่าการคายกลับสู่บรรยากาศในห้อง หลังจากนั้นจึงผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ตามกำหนดเข้าห้องทดสอบด้วยอัตราการไหล 500 มล./นาที พร้อมทั้งเปิดวาล์วที่ 2 (รูปที่ 5) และเริ่มเก็บตัวอย่างก๊าซในห้องทดสอบโดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดแบบพกพาต่อเข้ากับหลอดเก็บตัวอย่าง ดูดก๊าซด้วยอัตราการไหล 0.23 ลิตร/นาที ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซในห้องทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 18 ชม. จำนวนตัวอย่างที่เก็บทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง ตัวละอย่าง 2 หลอด (เก็บซ้ำ) รายละเอียดของการเก็บตัวอย่างแสดงดังตาราง 4 หมายเหตุ ก่อนทำการทดลองแต่ละครั้งจะทำความสะอาดห้องทดสอบด้วยMethanol จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และเป่าให้แห้ง



รูปที่ 4 ระบบทดลองช่วงการดูดซับสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุ



รูปที่ 5 ระบบทดลองช่วงการคายสารอินทรีย์จากแผ่นวัสดุ

หลังเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์แล้ว หลอดเก็บตัวอย่างจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °ซ. จนกว่าจะทำการสกัดและวิเคราะห์ตัวอย่าง ค่าความเข้มข้นสารมลพิษในห้องทดสอบที่เวลาต่างๆ จะใช้สำหรับคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การดูดซับต่อไป หมายถึง ระบบการทดลองถูกติดตั้งในตู้ดูดควัน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 25°ซ. ทุกการทดลอง ความเข้มข้นในห้องทดสอบที่เวลาเริ่มต้นมีค่าตามการคำนวณจากความหนาแน่นของสารเคมี ปริมาณสารที่ฉีดเข้าระบบ และปริมาตรห้องทดสอบ ได้ดังนี้ Toluene 2752 มค.ก./ลบ.ม., PERC 5135 มค.ก./ลบ.ม., Decane 2312 มค.ก./ลบ.ม., Nicotine 3200 มค.ก./ลบ.ม. และ Phenol 3390 มค.ก./ลบ.ม. ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า 0.9% ของความเข้มข้นอิ่มตัวของสารอินทรีย์แต่ละชนิด ดังนั้นจึงจัดได้ว่าเป็นความเข้มข้นของก๊าซเจือจางซึ่งอยู่ในขอบเขตของทฤษฎีการดูดซับของก๊าซเจือจางได้ (Roth et al., 2002)

ตาราง 4 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างก๊าซอินทรีย์ในห้องทดสอบ

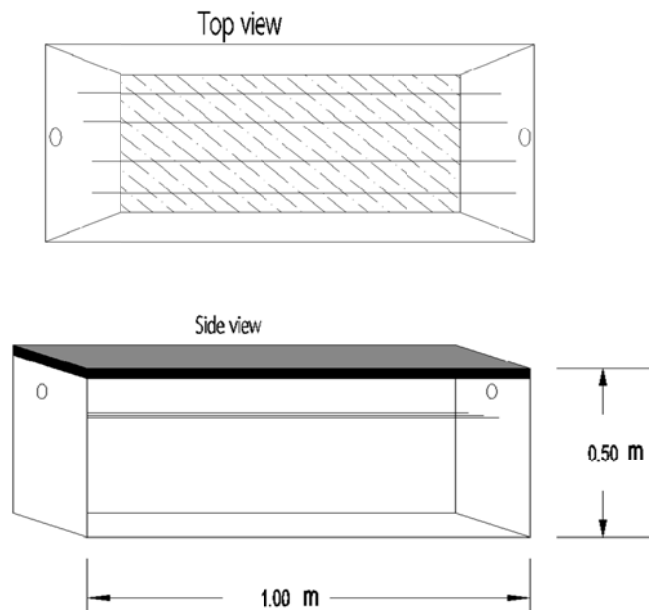
หลอดเก็บ ตัวอย่าง	ระยะเวลาที่เก็บ (นาที)	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	ปริมาตรอากาศที่ไหลผ่านหลอดดูดซับ (ลิตร)
1	10	0.23	2.3
2	10	0.23	2.3
3	10	0.23	2.3
4	20	0.23	4.6
5	20	0.23	4.6
6	40	0.23	9.2
7	60	0.23	13.8
8	80	0.23	18.4
9	120	0.23	27.6
10	180	0.23	41.4
11	240	0.23	55.2
12	300	0.23	69

2.2 การเตรียมแผ่นวัสดุทดสอบ

การเตรียมแผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งออกเป็น 2 วิธีการเตรียม ดังนี้

(1) การเตรียมแผ่นวัสดุสะอาด

โดยนำแผ่นพอลิเมอร์มาล้างทำความสะอาด 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 ล้างด้วยสารละลายผสม Methanol : Ethylacetate : น้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:1:100 แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง จากนั้นนำแผ่นวัสดุมาเป่าให้แห้งในห้องสะอาด (Clean room) ที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนา 9 มม. กว้าง 0.5 ม. สูง 0.5 ม. และ ยาว 1 ม. แสดงดังรูปที่ 6 พร้อมทั้งผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปในห้อง ปิดฝาห้องให้เรียบร้อยทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นจึงนำแผ่นพอลิเมอร์สะอาดมาติดตั้งในห้องทดสอบเพื่อทำการทดลองต่อไป



รูปที่ 6 ห้องสะอาดสำหรับใช้ทำความสะอาดวัสดุทดสอบ

(2) การเตรียมแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศมาก่อน

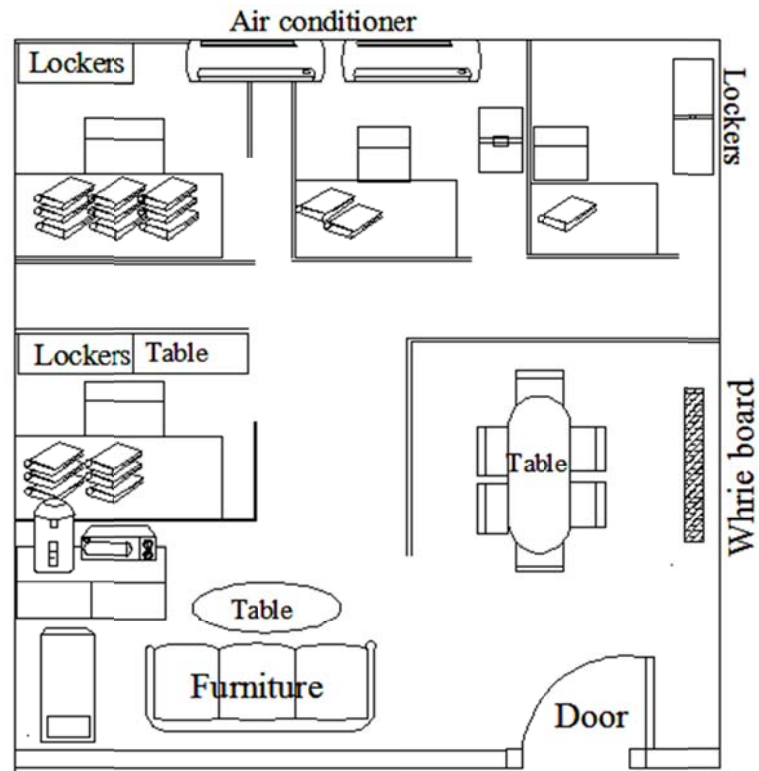
โดยนำแผ่นพอลิเมอร์ที่ทำความสะอาดแล้วมาติดตั้งในห้องทดสอบ จากนั้นนำไปตั้งไว้ในห้องที่กำหนด คือ ห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย (1 ชุดการทดลองต่อ 1 ห้อง) เป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน เพื่อให้ผิวหน้าแผ่นพอลิเมอร์สัมผัสกับอากาศจริงภายในห้องดังกล่าว ซึ่งแผ่นวัสดุจะดูดซับสิ่งเจือปนต่างๆ ในบรรยากาศไว้ เช่น อนุภาคนาโนเล็ก สารอินทรีย์กึ่งระเหย เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเตรียมแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศภายในอาคารมาก่อน

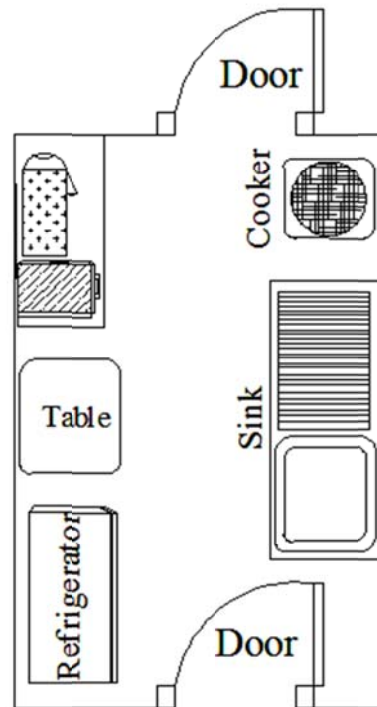
ลักษณะของห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย ที่ใช้ในการทดลองเป็นดังนี้

- (ก) ห้องทำงาน เป็นห้องทำงานรวมของคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ลักษณะห้องเป็นแบบปิดทึบมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศค่อนข้างต่ำ 0.7 ต่อชม. ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในห้องมีค่าประมาณ 61-65% ภายในห้องประกอบด้วย โต๊ะทำงานไม้ประกอบ แก้วน้ำ กระดาษไวท์บอร์ด ตู้ไม้ปาติเคิล เครื่องปรับอากาศ พัดลม ดูดอากาศ ตู้เย็น ดังแสดงในรูปที่ 8



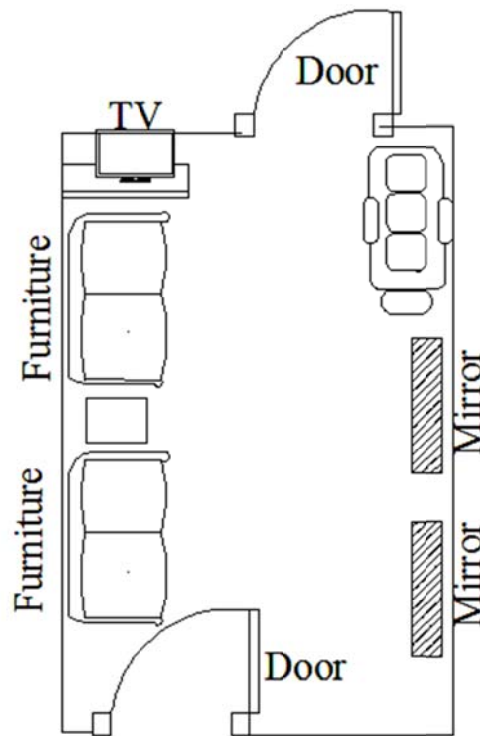
รูปที่ 8 ลักษณะห้องทำงานสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ

(ข) ห้องครัว เป็นห้องหนึ่งของบ้านเดี่ยว โดยปกติประตูด้านหลังห้องครัวจะถูกเปิดไว้ในขณะที่มีการทำครัว ประตูอีกด้านติดกับพื้นที่หลักของบ้าน มีหน้าต่างเป็นแบบบานเกร็ด อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องครัวประมาณ 8 ต่อ ชม. ภายในห้องครัวประกอบด้วย เตาแก๊สชุด 3 ต้ม ตู้กับข้าว ตู้เย็น อ่างล้างจาน เครื่องครัว ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะห้องครัวสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ

- (ค) ร้านเสริมสวย เป็นห้องแถว ตั้งอยู่ติดกับถนนของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประตูด้านหน้าและด้านหลังถูกเปิดตลอดเวลาในขณะที่ร้านเปิดให้บริการ มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 12 ต่อ ชม. ภายในร้านเสริมสวยประกอบด้วย อ่างล้างผม ตู้อุปกรณ์เคลือบผม ทำสีผม ทีวี เฟอร์นิเจอร์ พัดลมตั้งพื้น พัดลมติดเพดาน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 10

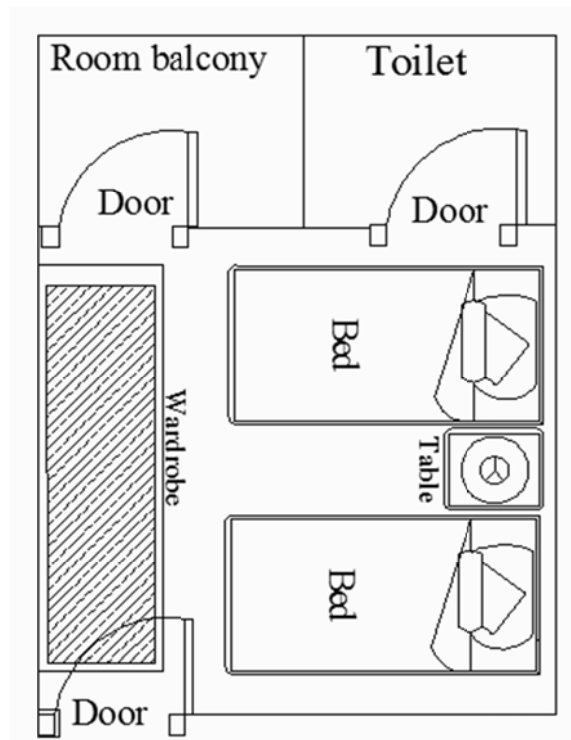


รูปที่ 10 ลักษณะร้านเสริมสวยสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ

2.3 ผลของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพักต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องมาก่อน

ทำการทดสอบบนสมมติฐานว่า อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพักมีผลต่อความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในอากาศภายในห้องพัก ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องถึงระดับความสกปรกที่ผิวหน้าแผ่นวัสดุทดสอบซึ่งตั้งสัมผัสกับอากาศภายในห้องพักดังกล่าว และมีผลต่อถึงความสามารถของแผ่นวัสดุนั้นในการดูดซับสารมลพิษอากาศชนิดอื่นที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศในห้องในภายหลัง ตัวแปรที่กำหนดใช้ในการทดลองมีดังนี้

- (1) ห้องพัก เป็นแบบสตูดิโอตกแต่งภายในเรียบร้อยแล้วพร้อมห้องน้ำของหอพักแห่งหนึ่งในบริเวณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มีเฟอร์นิเจอร์ประกอบด้วย เตียง โต๊ะ เก้าอี้ ตู้เสื้อผ้าทำจากไม้ปาติเกิล ดังรายละเอียดในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะห้องพักสตูดิโอของหอพักสำหรับใช้สร้างความสกปรกที่พื้นผิววัสดุทดสอบ

- (2) อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพัก ความคุมที่ค่าโดยประมาณ 0.7, 2 และ 10 ต่อ ชม. ด้วยพัดลมระบายอากาศแบบติดตั้งซึ่งติดตั้งเพิ่มเติมบริเวณประตูระเบียง
- (3) แผ่นวัสดุทดสอบ คือ พอลิโพรพิลีน
- (4) สารอินทรีย์ที่ทดสอบ คือ PERC และ Nicotine ใช้เป็นตัวแทนของสารที่มีเฉพาะแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาล์ และแรงยึดเหนี่ยวทั้งแวนเดอร์วาล์และแรงกรดเบส ตามลำดับ

ห้องพักจะถูกปรับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศตามที่กำหนดและปล่อยไว้เป็นเวลา 1-2 วัน เพื่อให้ระบบ (ห้องพัก) เข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นจึงนำแผ่นวัสดุพอลิเมอร์สะอาดที่ติดตั้งในห้องทดสอบแล้ว ไปตั้งในห้องพักเพื่อให้สัมผัสกับอากาศภายในห้องเป็นเวลา 5 วันต่อเนื่อง

นอกจากนี้มีการตรวจวัดมลพิษอากาศในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่กำหนดไว้ 3 ค่า ด้วยเช่นกัน เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้น มลพิษอากาศที่ตรวจวัด ได้แก่

- สารอินทรีย์ระเหย และสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (TVOC) เก็บตัวอย่างอากาศในห้องพักเป็นเวลา 5 ชม. ด้วยหลอดดูดซับ Carbo trap ใช้ปั๊มดูดอากาศอัตราการไหล 0.1 ลิตร/ชม. วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermal Desorption (Markes, UK) และ Gas chromatography Mass spectrometer (Agilent, USA) ตรวจวัดโดยบริษัท ALS Testing Services (Thailand) Co., Ltd
- อนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) วัดด้วยเครื่อง DustTrak II (TSI, USA) ทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลา 5 ชม.

2.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์สารอินทรีย์

2.4.1 วิธีการเก็บตัวอย่างด้วยหลอดดูดซับและการสกัดกลับ

(1) Toluene, PERC และ Decane

การเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยทั้งสามชนิดและการวิเคราะห์ปริมาณใช้วิธีการของ National Institute for Occupational Safety and Health ประเทศสหรัฐอเมริกา (NIOSH, 2003) ซึ่งใช้สำหรับสารในกลุ่ม Aromatic hydrocarbons โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างแบบพกพา (Aircheck2000, SKC, USA) ดูดก๊าซอินทรีย์เข้าหลอดเก็บตัวอย่างซึ่งภายในบรรจุชาร์โคล (Charcoal) (SKC, USA) ส่วนการสกัดสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนชาร์โคลทำโดยหักหลอดเก็บตัวอย่างแล้วนำชาร์โคลจากทั้ง 2 ส่วน (ส่วนหน้าและส่วนหลัง) แยกใส่ขวดแก้ว (Vial) ขนาด 4 มล. อย่างละขวด จากนั้นเติมสารละลาย Carbon disulfide (CS_2) จำนวน 1 มล. ลงในแต่ละขวด นำขวดมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายใส่ในขวด 2 มล. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography / Mass spectrometer (GC/MS)

(2) Nicotine

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ปริมาณใช้วิธีการของ NIOSH (1998) สำหรับสาร Nicotine โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างแบบพกพาดูดก๊าซ Nicotine เข้าหลอดเก็บตัวอย่างซึ่งภายในบรรจุเรซิน XAD-4 (SKC, USA) ส่วนการสกัดกลับสารอินทรีย์ที่ดูดซับกระทำโดยหักหลอดเก็บตัวอย่างแล้วนำเรซินจากทั้ง 2 ส่วน (ส่วนหน้าและส่วนหลัง) มาแยกใส่ขวดแก้ว (Vial) ขนาด 4 มล. อย่างละขวด จากนั้นเติมสารละลาย Ethyl acetate ผสม Triethylamine 0.1% จำนวน 1 มล. ลงในแต่ละขวด นำขวดมาเขย่าด้วยเครื่องสั่นด้วยเสียง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายใส่ในขวด 2 มล. แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS

(3) Phenol

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ปริมาณเป็นการประยุกต์ใช้วิธีการของ NIOSH (1994) สำหรับสาร Phenol โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างแบบพกพาดูดก๊าซ Phenol เข้าหลอดเก็บตัวอย่างซึ่งภายในบรรจุเรซิน XAD-7 (SKC, USA) ส่วนการสกัดกลับสารอินทรีย์ที่ดูดซับกระทำโดยหักหลอดเก็บตัวอย่างแล้วนำเรซินจากทั้ง 2 ส่วน (ส่วนหน้าและส่วนหลัง) มาแยกใส่ขวดแก้ว (Vial) ขนาด 4 มล. อย่างละขวด จากนั้นเติม Methanol จำนวน 1 มล. ลงในแต่ละขวด นำขวดมาเขย่าด้วยเครื่องสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายใส่ในขวด 2 มล. แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS

การเปรียบเทียบปริมาณสารทำได้โดยการสร้างเส้นกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ด้วยสารละลายที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน แบ่งกราฟมาตรฐานเป็น 2 ช่วงความเข้มข้น ช่วงที่หนึ่ง คือค่าความเข้มข้น 0, 3, 5, 7 และ 10 มก.ก./มล. ช่วงที่สอง คือค่าความเข้มข้น 0, 30, 50, 70 และ 100 มก.ก./มล.

2.4.2 การตั้งสภาวะการทำงานของเครื่อง GC/MS

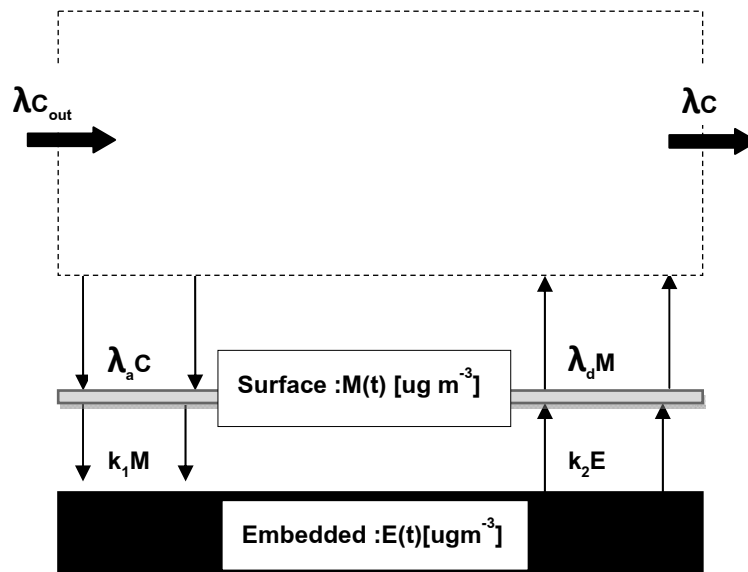
การตั้งสภาวะการทำงานของเครื่อง GC/MS เป็นไปตามวิธีการของ NIOSH และผลจากการทดลองวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ สภาวะของเครื่อง GC/MS (Shimadzu, Japan) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 สภาวะการทำงานของเครื่อง GC/MS สำหรับใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์ 5 ชนิด

	Toluene และ PERC	Decane	Nicotine	Phenol
Column Type	Rtx [®] -5MS (Crossbond [®] 5% diphenyl 95%			Rtx [®] -wax (Crossbond [®] Carbowax [®] polyethylene glycol)
Colum Oven Temp.	40 °C	60 °C	60 °C	160 °C
Injection Temp.	250 °C	250 °C	200 °C	250 °C
Injection Mode	Split	Split	Split	Split
Flow Control Mode	Linear Velocity	Linear Velocity	Linear Velocity	Linear Velocity
Pressure	63.1 kPa	69.7 kPa	144.6 kPa	91.3 kPa
Total Flow	16.1 mL/ min	15.8 mL/ min	29.4 mL/ min	13.5 mL/ min
Column Flow	1.19 mL/min	1.16 mL/min	2.4 mL/min	0.95 mL/min
Split Ratio	10	10	10	10
Oven Temp. Program	40 °C Ramp 1 °C/ min to 50 °C	60 °C Ramp 2 °C/ min to 80 °C	60 °C Ramp 20 °C/ min to 200 °C hold 1 min	160 °C Ramp 10 °C/ min to 225 °C
Ion Source Temp.	200 °C	200 °C	200 °C	200 °C
Interface Temp.	250 °C	250 °C	300 °C	250 °C
Solvent Cut Time	2.5 min	2.5 min	2.0 min	2.0 min
ACQ Mode	SIM	SIM	SIM	SIM

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Sorption model with surface and embedded sinks เพื่อใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน ณ สภาวะสมดุล หรือ Equilibrium partitioning coefficient (K_{part}) ซึ่งพัฒนาโดย Singer et al. (2005) แบบจำลองนี้กำหนดให้วัสดุเป็นแหล่งดูดซับสารมลพิษ (Sink) และการดูดซับเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ (Reversible sorption) โดยแบบจำลองรวมการดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์บนผิวหน้าวัสดุ คือ ชั้นที่สัมผัสกับอากาศโดยตรง และการแทรกของโมเลกุลสารอินทรีย์เข้าสู่ชั้นของเนื้อวัสดุ (Permeation) ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ (Diffusion) และการละลาย (Solution) ในที่นี้ คือ การแทรกของโมเลกุลสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อพอลิเมอร์ รูปที่ 12 แสดงภาพวาดแบบจำลองการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบ และสมการ (4) – (6) แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลสารมลพิษที่สนใจในขอบเขตใดขอบเขตหนึ่ง ณ เวลาใดๆ แบ่งออกเป็น 3 ขอบเขต (Boundary) คือ ในอากาศของห้องทดสอบที่อยู่เหนือพื้นผิววัสดุ (Bulk air), ที่ผิวหน้าวัสดุทดสอบที่สัมผัสกับอากาศในห้อง และ ในเนื้อวัสดุที่อยู่ด้านล่างผิวหน้าวัสดุทดสอบ โดยในที่นี้สมการสมดุลมวลสารมลพิษอยู่บนพื้นฐานว่า ห้องทดสอบมีการผสมผสานอย่างดี (Completely mixed flow reactor, CMFR) ไม่มีการรั่วซึมของอากาศนอกจากการพามลพิษเข้าออกตามช่องที่ควบคุมไว้เท่านั้น



รูปที่ 12 ภาพวาดการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบด้วยแบบจำลองคุณภาพอากาศที่รวมการดูดซับที่พื้นผิวและในเนื้อวัสดุ

$$\frac{dC}{dt} = -(\lambda + \lambda_a)C + \lambda_d M \quad (4)$$

$$\frac{dM}{dt} = \lambda_a C - (\lambda_d + k_1)M + k_2 E \quad (5)$$

$$\frac{dE}{dt} = -k_2 E + k_1 M \quad (6)$$

โดยที่	C	คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในห้องทดสอบ (มก.ก./ลบ.ม.)
	C_{out}	คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษนอกห้องทดสอบ (มก.ก./ลบ.ม.)
	M	คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ดูดติดบนผิวหน้าวัสดุ (มก.ก./ลบ.ม.)
	E	คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในเนื้อวัสดุ (มก.ก./ลบ.ม.)
	λ	คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ต่อ ชม.)
	λ_a	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากอากาศสู่ผิวหน้าวัสดุ (ต่อ ชม.)
	λ_d	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากผิวหน้าวัสดุกลับสู่อากาศ (ต่อ ชม.)
	k_1	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากผิวหน้าวัสดุสู่เนื้อวัสดุ (ต่อ ชม.)
	k_2	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากเนื้อวัสดุกลับสู่ผิวหน้าวัสดุ (ต่อ ชม.)

การหาค่าพารามิเตอร์การดูดซับ λ_a , λ_d , k_1 , และ k_2 สามารถทำได้โดยใช้การพยากรณ์ด้วย Genetic algorithm (GA) ทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB[®] version 7.6.0.324 (R2008) โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นสารมลพิษในอากาศในห้องทดสอบที่วัดได้ตามเวลาที่ผ่านไป และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้ง 3 สมการข้างต้น โดยมีเงื่อนไขการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ค่าความเหมาะสมที่ดี (Good-of-fit, GF) ซึ่งจะต้องมีค่าต่ำที่สุด ค่า GF สามารถแสดงได้ดังสมการ (7)

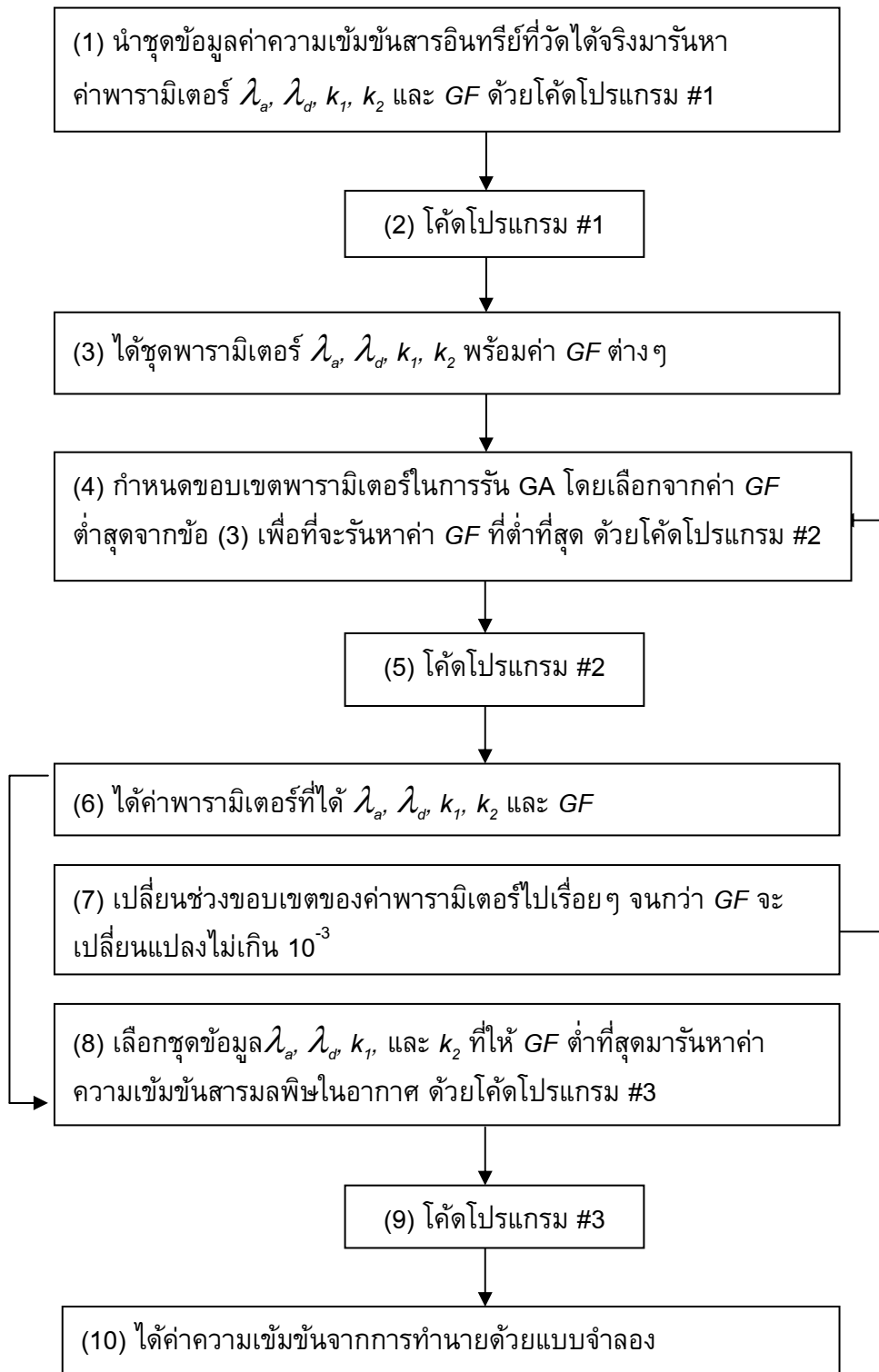
$$GF = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_i^*)^2}{N}} \quad (7)$$

โดยที่	y_i	คือ ค่าที่ได้จากการวัด
	y_i^*	คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง
	N	คือ จำนวนครั้งที่วัด

ค่าพารามิเตอร์การดูดซับ λ_a , λ_d , k_1 , และ k_2 ที่ได้ สามารถใช้คำนวณหาความสามารถของวัสดุในการดูดซับสารมลพิษ หรือ K_{part} ได้ตามสมการ (8)

$$K_{part} = \frac{M + E}{C} = \left(\frac{k_2 + k_1}{k_2} \right) \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_d} \right) \quad (8)$$

ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่ด้วย GA ทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB มีรายละเอียดแสดงดังแผนผังรูปที่ 13 หมายเหตุ โค้ดโปรแกรม MATLAB #1, #2 และ #3 แสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 13 แผนผังขั้นตอนการทำนายพารามิเตอร์การดูดซับด้วยฟังก์ชัน GA โดยใช้โปรแกรม MATLAB

2.6 การศึกษาพื้นผิววัสดุทดสอบ

2.6.1 การวัดมุมสัมผัสของพื้นผิววัสดุทดสอบ

การวัดมุมสัมผัสระหว่างผิววัสดุพอลิเมอร์กับหยดของเหลว คือ น้ำ ได้ส่งตรวจวัดที่ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผู้ดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่อง Contact angle tester (DSA 10 MK2, Krüss, Germany) แผ่นพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ส่งทดสอบได้ผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการทดลองการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์

2.6.2 การศึกษาสัณฐานของพื้นผิววัสดุทดสอบ

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองทำโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, Jeol, USA) เพื่อสังเกตถึงความแตกต่างระหว่างพื้นผิวแผ่นวัสดุที่ผ่านการทำความสะอาด และแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องลักษณะต่างๆ เป็นเวลา 3-4 วัน โดยใช้กำลังขยาย 100-5000 เท่า

2.7 สรุปวิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ลักษณะตามจุดประสงค์การศึกษา ได้แก่ การศึกษาการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ และการศึกษาพื้นผิววัสดุทดสอบ สรุปตัวแปรและวิธีการทดสอบได้ดังตาราง 6 สำหรับการทดลองการดูดซับมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25°C. ซึ่งอุณหภูมิในการทดลองจริงอยู่ในช่วง 24-26°C. ส่วนความชื้นสัมพัทธ์กำหนดไว้ที่ 0% ในการทดลองจริงวัดได้ 0-5% ความชื้นสัมพัทธ์กำหนดไว้ที่ 50% ในการทดลองจริงวัดได้ 48-55% ความชื้นสัมพัทธ์กำหนดไว้ที่ 90% ในการทดลองจริงวัดได้ 90-96%

ตาราง 6 สรุปการทดลอง

จุดประสงค์การศึกษา	วัสดุทดสอบ	สภาวะการทดสอบ	สารมลพิษดูดซับ	ระบบทดสอบ / การวัด
	ชนิด	สภาพ		
การศึกษาการดูดซับ	PP, PVC	สะอาด, สกปรกจาก การสัมผัสอากาศ	ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90%	Toluene, PERC, Decane, Nicotine, Phenol
การศึกษาพื้นผิววัสดุ	PP, PVC	สะอาด	ความชื้นสัมพัทธ์ 50%	NA
	PP, PVC	สะอาด,	ความชื้นสัมพัทธ์	NA

สกปรกจาก 50%
การสัมผัส
อากาศ

microscope

NA = Not applied

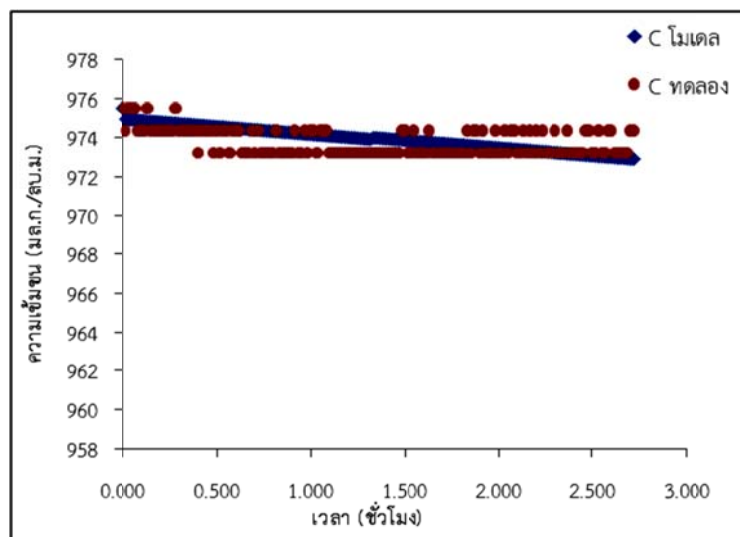
3. การประกันคุณภาพงานวิจัย

3.1 การทดสอบการรั่วซึมของห้องทดสอบ (Chamber Leakage)

ทำการทดสอบโดยใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นก๊าซทำรอย (Tracer gas) โดยเริ่มต้นด้วยการสร้างก๊าซ CO ปริมาณหนึ่งจากการจุดธูปในห้องทดสอบที่ปิดสนิท ภายในติดตั้งเครื่องวัด CO Testo[®] 454 (Testo, Germany) จากนั้นบันทึกค่าความเข้มข้นของ CO ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบอัตโนมัติทุก 1 นาที เป็นเวลา 3 ชม. แล้วจึงนำชุดข้อมูลความเข้มข้นที่วัดได้มาวิเคราะห์หาอัตราการรั่วซึมของห้องทดสอบที่ปิดสนิทดังกล่าว (9) ด้วยโปรแกรม NLREG[®] โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 14

$$C_t = C_0 \exp(-\lambda t) \quad (9)$$

โดยที่ C_t คือ ความเข้มข้นของก๊าซ CO ที่เวลาใดๆ
 C_0 คือ ความเข้มข้นของก๊าซ CO ที่เวลาเริ่มต้น
 λ คือ อัตราการรั่วซึมของห้องทดสอบ

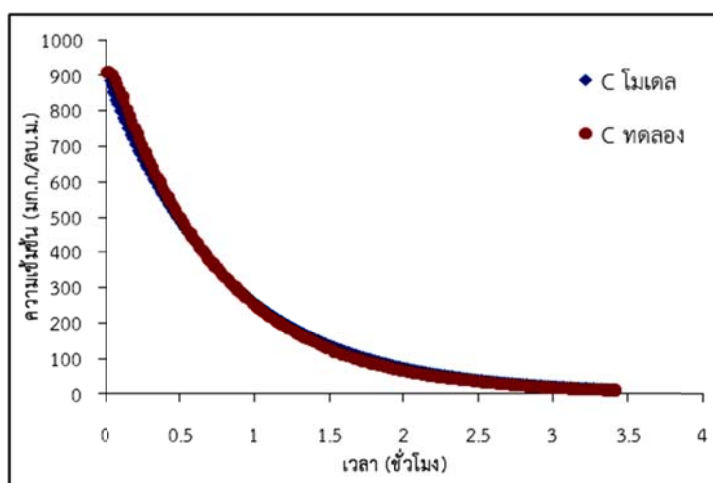


รูปที่ 14 การวัดค่าการรั่วซึมของห้องทดสอบด้วยก๊าซ CO

ผลการทดสอบความแม่นยำของห้องทดสอบ พบว่า ค่า λ มีค่าเท่ากับ 0.00087 ต่อ ซม. ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.012 ต่อ ซม. หรือต่ำกว่า 1% ของค่า λ ที่กำหนดใช้ในการทดลอง อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ECA, 1991)

3.2 ระดับการผสมผสานของอากาศภายในห้องทดสอบ (Chamber mixing)

ทำการทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบการรั่วซึมของห้องโดยใช้ก๊าซ CO เป็นก๊าซทำรอย แต่มีการส่งผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ห้องทดสอบด้วยอัตรา 500 มล./นาที่ ซึ่งเป็นอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้ บันทึกค่าความเข้มข้นของ CO ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบอัตโนมัติทุก 1 นาที่ เป็นเวลา 3 ชม. แล้วจึงนำชุดข้อมูลความเข้มข้นที่วัดได้มาวิเคราะห์หาอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศจริงของห้องทดสอบตามสมการ (9) ด้วยโปรแกรม NLREG[®] โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 15



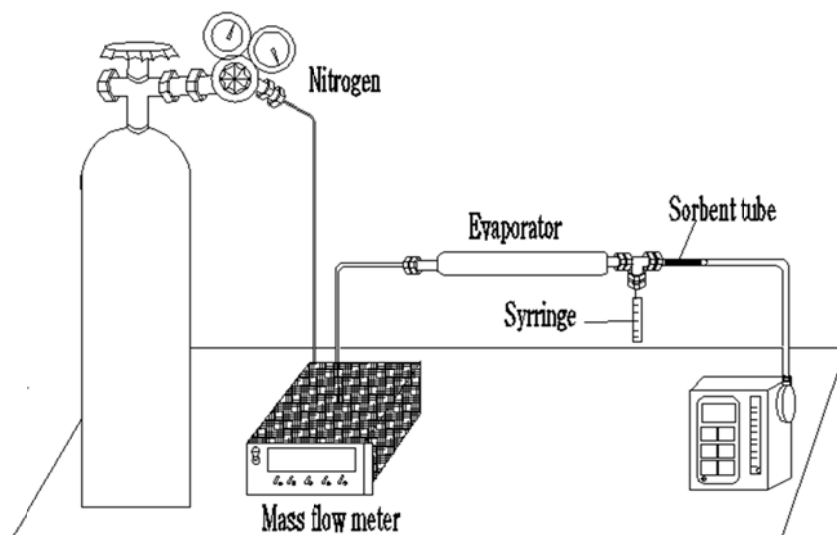
รูปที่ 15 การวัดระดับการผสมผสานของอากาศภายในห้องทดสอบด้วยก๊าซ CO

ผลการทดสอบระดับความผสมผสานของอากาศภายในห้องทดสอบ พบว่า ค่า λ มีค่าเท่ากับ 1.26 ต่อ ซม. หรือคิดเป็น $1.2 \pm 5\%$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ $\pm 10\%$ ของค่า λ ที่กำหนดใช้ในการทดลอง ดังนั้นความผสมผสานของอากาศภายในห้องจึงเป็นไปอย่างทั่วถึง (ECA, 1991)

3.3 ประสิทธิภาพการนำกลับสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหย (Recovery efficiency of organic sorbates from evaporator)

ทำการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์สร้างไอระเหยว่าสามารถเปลี่ยนสารเคมีในรูปของเหลวเป็นไอระเหยได้ทั้งหมดภายใต้สภาวะที่กำหนดหรือไม่ ระบบการทดสอบแสดงดังรูปที่ 16 โดยตัดส่วนของห้องทดสอบออกไป ต่ออุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซสารอินทรีย์เข้ากับอุปกรณ์สร้างไอระเหยโดยตรง ขั้นตอนการทดสอบเริ่มด้วยการฉีดสารอินทรีย์บริสุทธิ์ด้วยเข็มฉีดยาปริมาตร 0.08 มล. เข้าไปที่อุปกรณ์สร้างไอระเหยที่ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิ 250°C. พร้อมทั้งปล่อยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ด้วย

อัตราการไหล 50 มล./นาที่ และเริ่มเก็บตัวอย่างก๊าซด้วยหลอดดูดซับทันทีเป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที ทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งสำหรับแต่ละสารอินทรีย์ นำหลอดเก็บตัวอย่างมาสกัดด้วยสารละลาย แล้วแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS ส่วนเข็มฉีดยาและฟิตติงส์ที่ใช้ในการทดสอบได้นำมาล้างด้วยสารละลายสำหรับสกัดตัวอย่าง จำนวน 3 ครั้ง สารละลายที่ล้างแต่ละครั้งถูกแยกวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือ ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 7



รูปที่ 16 การทดสอบประสิทธิภาพการนำกลับสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหย

ตาราง 7 ประสิทธิภาพการนำกลับของสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหย

สารอินทรีย์	ปริมาณที่ใส่ เข้าระบบ (มค.ก.)	ประสิทธิภาพ การนำกลับ (%)	ครั้งที่ล้างเข็ม และฟิตติงส์	ปริมาณ สารอินทรีย์ที่ เหลือ (มค.ก.)	% ปริมาณสาร อินทรีย์ที่เหลือเทียบ กับปริมาณที่ใส่
Toluene	68.6	97.3	#1, #2, #3	nd	-
PERC	128.4	95.5	#1	0.03	0.02
			#2, #3	nd	-
Decane	57.8	92.7	#1	0.24	0.42
			#2, #3	nd	
Nicotine	79.9	92.9	#1, #2, #3	nd	-
Phenol	50.8	91.7	#1	0.06	0.07
			#2, #3	nd	-

*หมายเหตุ nd= non detectable

ประสิทธิภาพการนำกลับของสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดจากอุปกรณ์สร้างไอระเหยมีค่าอยู่ในช่วง 92 – 97% โดยปริมาณของสารอินทรีย์ที่เหลือหลังจากการระเหยมีค่าน้อยกว่า 0.5% ของปริมาณสารที่ใส่เข้าอุปกรณ์สร้างไอระเหยซึ่งคิดเป็นสัดส่วนที่น้อยมาก

นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์สูงอาจมีผลกระทบต่อการเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ด้วยหลอดเก็บตัวอย่างชนิดสารดูดซับซาร์โคล ซึ่งได้แก่ Toluene, PERC และ Decane เช่น โมเลกุลของน้ำอาจแย่งพื้นที่การดูดซับบนซาร์โคล ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยการฉีดสารอินทรีย์ที่ต้องการทดสอบเข้าอุปกรณ์สร้างไอระเหยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ (1) เมื่อก๊าซไนโตรเจนที่ผ่านอุปกรณ์สร้างไอระเหยเป็นก๊าซแห้ง (ความชื้นสัมพัทธ์ 0%) และ (2) เมื่อก๊าซไนโตรเจนที่ผ่านเข้าไปมีความชื้นสัมพัทธ์ 90% โดยทั้ง 2 กรณีใช้เวลาระเหยไอสารและเก็บตัวอย่างก๊าซ 10 นาที เก็บซ้ำ 2 หลอด ผลของประสิทธิภาพการนำกลับแสดงดังตาราง 8

ตาราง 8 ประสิทธิภาพการนำกลับของสารอินทรีย์จากอุปกรณ์สร้างไอระเหยเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ 90% ในระบบ

ชนิดสารอินทรีย์	ประสิทธิภาพการนำกลับ (%)
Toluene	
กรณี 1 ความชื้นสัมพัทธ์ 0%	91.1 ± 5.3
กรณี 2 ความชื้นสัมพัทธ์ 90%	105.7 ± 10.1
PERC	
กรณี 1 ความชื้นสัมพัทธ์ 0%	88.9 ± 6.3
กรณี 2 ความชื้นสัมพัทธ์ 90%	93.3 ± 1.7
Decane	
กรณี 1 ความชื้นสัมพัทธ์ 0%	91.9
กรณี 2 ความชื้นสัมพัทธ์ 90%	103.3

3.4 ประสิทธิภาพการสกัดกลับสารอินทรีย์จากหลอดเก็บตัวอย่าง (Desorption efficiency)

จุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบประสิทธิภาพการสกัดกลับสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนสารดูดซับทดสอบโดยฉีดสารละลายมาตรฐานที่ทราบปริมาณสารอินทรีย์ที่แน่นอนของ Toluene, PERC และ Decane ชนิดละ 4 มค.ก. ในสารละลาย Carbon disulfide เข้าภายในหลอดเก็บตัวอย่างบรรจุซาร์โคล จากนั้นปิดฝาหลอดเก็บตัวอย่างทั้ง 2 ด้าน แล้วเก็บไว้เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นจึงทำการสกัดตามปกติ ส่วน Nicotine ทำการทดสอบแบบเดียวกันแต่ใช้หลอดเก็บตัวอย่าง XAD-4 และตัวทำละลายเป็น Ethyl acetate ผสม Triethylamine 0.1% สำหรับ Phenol ใช้หลอดเก็บตัวอย่าง XAD-7 และตัวทำละลายคือ Methanol ทุกชุดการทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 9

ตาราง 9 ประสิทธิภาพการสกัดกลับสารอินทรีย์จากหลอดเก็บตัวอย่าง

ชนิดสารอินทรีย์	ประสิทธิภาพการสกัดกลับ (%)
Toluene	97.6 ± 5.0
PERC	97.3 ± 2.1
Decane	96.1 ± 0.7
Nicotine	91.8 ± 5.7
Phenol	89.7 ± 1.7

3.5 ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (Method Detection Limits, MDL)

องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (USEPA, 2004) ได้ให้คำจำกัดความของปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ที่ความเชื่อมั่นที่ 99% ว่าความเข้มข้นของสารที่ต้องการวัดมีค่ามากกว่าศูนย์ โดยค่าปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (MDL) สามารถหาได้จากสมการ (10)

$$MDL = t_{n-1, \alpha=0.01} \sigma \quad (10)$$

โดยที่ n คือ จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทำการทดลองซ้ำ

$t_{n-1, \alpha=0.01}$ คือ ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 99% และการประมาณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยที่ค่า degree of freedom เท่ากับ $n-1$

ทำโดยเตรียมสารละลายที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ในที่นี้ใช้ความเข้มข้น 5 นาโนกรัม/มล. จำนวน 8 ขวด วัดด้วยเครื่อง GC/MS และเปรียบเทียบปริมาณด้วยกราฟมาตรฐาน สามารถคำนวณค่า MDL ได้ตามสมการ (10) แสดงในตาราง 10 ส่วนความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศคำนวณจากปริมาตรอากาศในการเก็บตัวอย่างสูงสุด คือ 69 ลิตร

ตาราง 10 ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดค่าได้

สารอินทรีย์	ปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (นาโนกรัม)	ความเข้มข้นต่ำสุดในอากาศที่สามารถวัดได้ (มค.ก./ลบ.ม.)
Toluene	1.06	0.012
PERC	1.38	0.020
Decane	1.10	0.016
Nicotine	3.59	0.052
Phenol	0.67	0.010

3.6 การปล่อยผ่านสารที่ถูกดูดซับ (Breakthrough)

หลอดเก็บตัวอย่างที่ใช้เก็บก๊าซสารอินทรีย์ในการทดลองได้นำมาวิเคราะห์การปล่อยผ่านของสารอินทรีย์ โดยแยกสารดูดซับซึ่งในงานนี้ คือ ซาร์โคล เรซิน XAD-4 และ XAD-7 ส่วนหน้าและส่วนหลังที่บรรจุในหลอดลงในขวด 2 ขวด ทำการสกัดด้วยสารละลายและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS ซึ่งไม่พบสารอินทรีย์จากสารดูดซับในส่วนหลังของหลอดเก็บตัวอย่าง

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การทดลองดูดซับที่ทดสอบปัจจัยต่างๆ และการศึกษาพื้นผิววัสดุทดสอบในลักษณะต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. พฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิเมอร์

สัญลักษณ์ย่อที่กำหนดใช้แทนชุดการทดลองการดูดซับที่ทดสอบปัจจัยต่างๆ เป็นดังนี้

RH0% คือ การทดลองการดูดซับบนแผ่นวัสดุสะอาด ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0%

RH50% คือ การทดลองการดูดซับบนแผ่นวัสดุสะอาด ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50%

RH90% คือ การทดลองการดูดซับบนแผ่นวัสดุสะอาด ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90%

PP คือ แผ่นวัสดุทดสอบพอลิโพรพิลีน

PVC คือ แผ่นวัสดุทดสอบพอลิไวนิลคลอไรด์

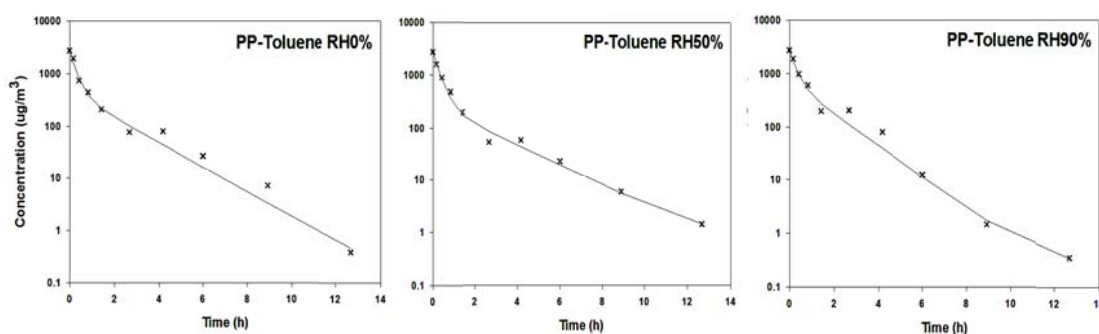
Office room คือ การทดลองการดูดซับบนแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องทำงานมาก่อนเป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน ก่อนนำมาทดสอบที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50%

Kitchen คือ การทดลองการดูดซับบนแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องครัวมาก่อนเป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน ก่อนนำมาทดสอบที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50%

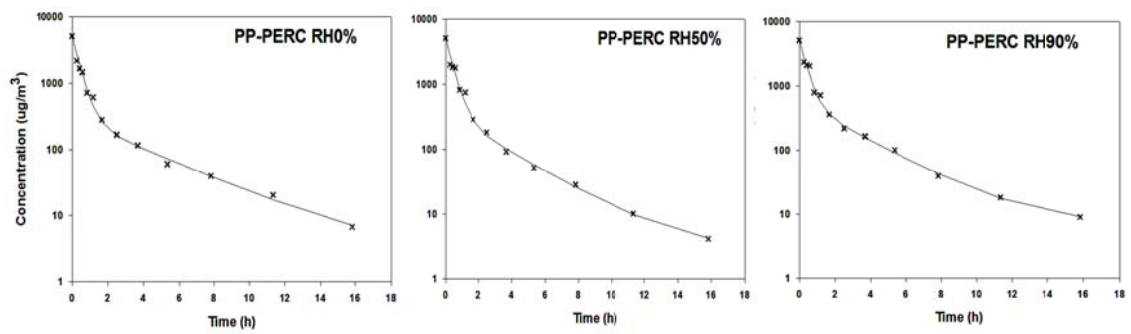
Salon คือ การทดลองการดูดซับบนแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในร้านเสริมสวยมาก่อนเป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน ก่อนนำมาทดสอบที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50%

1.1 พฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน

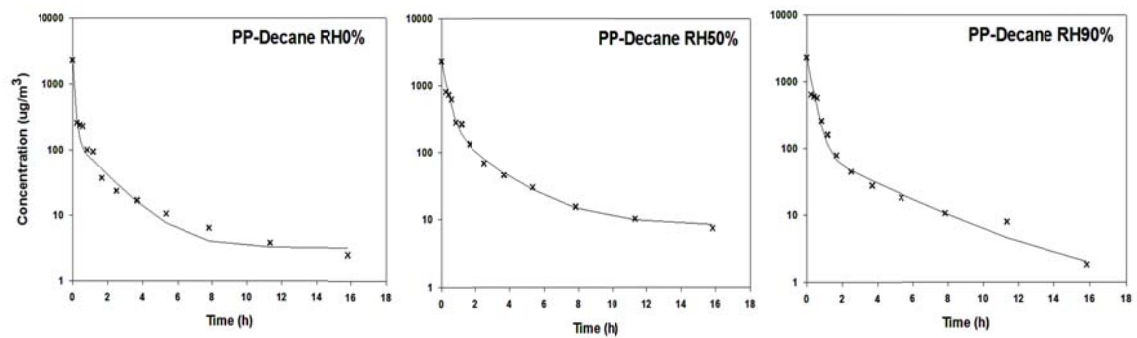
รูปที่ 17 – 21 แสดงลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นเวลา 16 – 18 ชม. ของสารอินทรีย์ ได้แก่ Toluene, PERC, Decane, Nicotine และ Phenol ตามลำดับ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% หมายเหตุ ความเข้มข้นจากแบบจำลองได้จากการทำนายค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ดีที่สุดด้วยแบบจำลองตามสมการ (4) – (6)



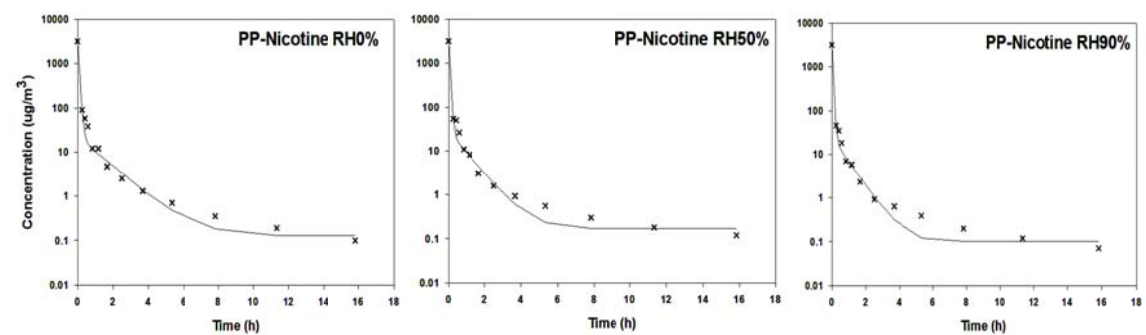
รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Toluene ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน



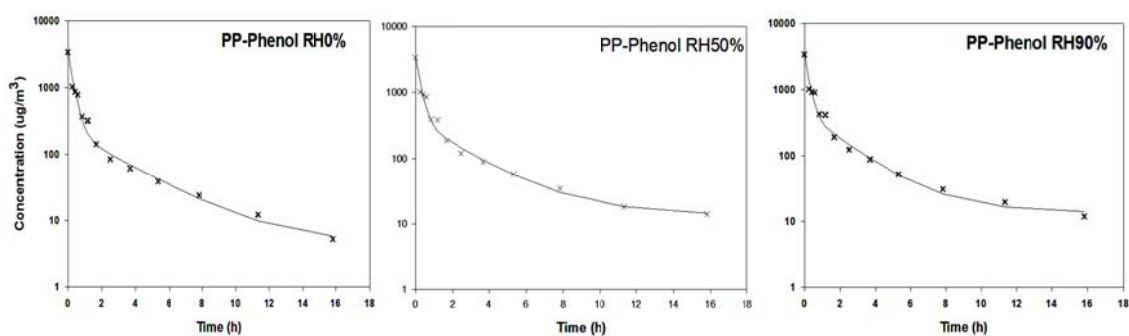
รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PERC ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Decane ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Phenol ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน (สัญลักษณ์ x ความเข้มข้นจากการทดลอง, — ค่าความเข้มข้นจากแบบจำลอง)

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สารมีลักษณะคล้ายคลึงกัน หลังการฉีดสารอินทรีย์เข้าห้องทดสอบที่เวลาเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ชม. แรก ลดลง 76-99% เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น โดยในช่วงแรกโมเลกุลสารอินทรีย์ในอากาศเคลื่อนที่ไปดูดซับที่แผ่นวัสดุมากกว่าอัตราการคายกลับ ดังนั้นความเข้มข้นในอากาศจึงลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้สารอินทรีย์ในอากาศยังถูกพาออกนอกห้องทดสอบเนื่องจากการแลกเปลี่ยนอากาศด้วย หลังจาก 2 ชม. ผ่านไป ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ เพราะอัตราการดูดซับที่แผ่นวัสดุลดลงพร้อมกับอัตราการคายกลับจากที่แผ่นวัสดุสู่บรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เริ่มค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12 โดยความเข้มข้นในชั่วโมงสุดท้ายลดลงเหลือต่ำกว่า 1% ของความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร พบว่าในช่วง 2 ชม. แรก ความเข้มข้นของ Nicotine ลดลงเร็วกว่าสารอื่นอย่างเห็นได้ชัดเจนน ดังรูปที่ 20 โดยลดลงมากกว่า 99% ของความเข้มข้นเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะ Nicotine เป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหย (Semi volatile) มีค่าความดันไอต่ำกว่าเท่ากับ 5.3 Pa และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลผ่านทางแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงกรดเบสสูงกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น (ตาราง 1) ดังนั้น Nicotine จึงมีแนวโน้มอยู่ในรูปโมเลกุลที่ดูดติดบนผิวมากกว่าอยู่ในรูปที่เป็นก๊าซในอากาศ โดยความเข้มข้นในช่วงสุดท้ายของการทดลองลดลงจนค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.13 มก.ก./ลบ.ม. ในขณะที่สารอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ Toluene และ PERC ซึ่งมีค่าความดันไอประมาณ 10^3 Pa มีแนวโน้มการลดลงของความเข้มข้นในอากาศช้ากว่า (รูปที่ 17 และ 18) ความเข้มข้นในช่วงสุดท้ายของ PERC มีค่าประมาณ 10 มก.ก./ลบ.ม. แต่ Toluene กลับมีความเข้มข้นสุดท้ายต่ำกว่า 1 มก.ก./ลบ.ม. ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกลไกอื่นนอกเหนือจากการดูดติดผิวและการคาย เช่น การแทรกซึมของสารอินทรีย์เข้าในเนื้อวัสดุพอลิโพรพิลีน เป็นต้น สำหรับ Phenol และ Decane มีความดันไอต่ำกว่า Toluene และ PERC โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Decane (รูปที่ 19) คล้ายคลึงกับของ Nicotine อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของ Phenol ในอากาศกลับมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Phenol มีแนวโน้มอยู่ในเฟสของก๊าซมากกว่า

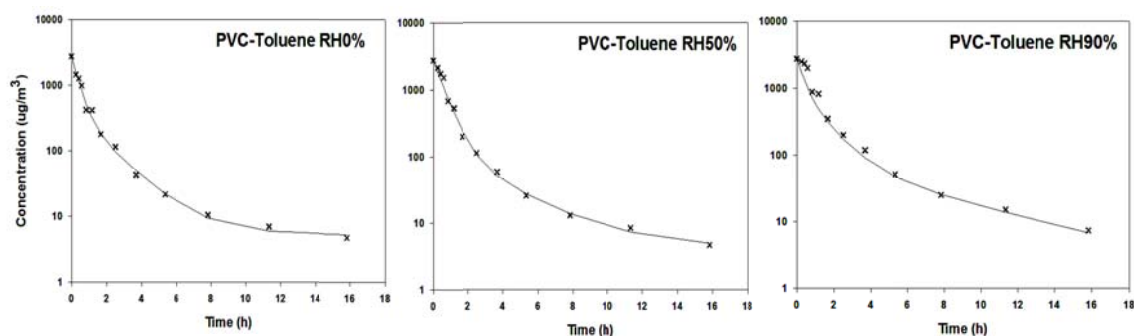
อยู่ที่แผ่นพอลิโพรพิลีนหรืออาจกล่าวว่า Phenol มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับวัสดุพอลิโพรพิลีนค่อนข้างต่ำกว่าของ Decane ดังนั้นการประเมินความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสมบัติทางเคมีของสารถูกดูดซับ คือ ความดันไอ อาจไม่สามารถสะท้อนถึงแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นจริงได้

ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศโดยเฉพาะ Toluene, PERC และ Phenol เช่น เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 0% เป็น 50% ทำให้ความเข้มข้น Toluene ในอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของน้ำอาจขัดขวางการดูดซับโมเลกุล Toluene ที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน หรือโมเลกุลของน้ำอาจเปลี่ยนสภาพพื้นผิวของวัสดุพอลิเมอร์ให้มีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายคลึงกับฟิล์มน้ำแทน เป็นต้น

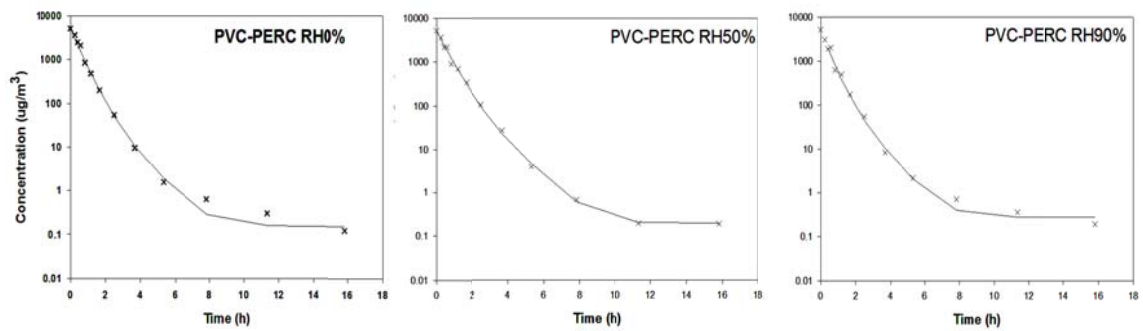
เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์การพยากรณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในช่วง 2 ชม. แรก ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับสารอินทรีย์จากอากาศสู่ผิววัสดุ หรือ Λ_s และกราฟการเปลี่ยนแปลงหลังจาก 6 ชม. ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การคายจากเนื้อวัสดุสู่ผิวหน้าวัสดุ หรือ k_2 ดังตาราง 11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า Λ_s ของ Nicotine มีค่าสูงกว่าสารอื่นกว่า 10 เท่า และเส้นกราฟความเข้มข้นช่วง 2 ชม. แรกลดลงด้วยความชันมากกว่ากราฟของสารอื่น ดังรูปที่ 19 ในขณะที่ค่า k_2 ของ Toluene มีค่าต่ำกว่าสารอินทรีย์อื่น และเส้นกราฟความเข้มข้นช่วง 6 ชม. หลังมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่ากราฟสารอื่น ดังรูปที่ 17

1.2 พฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์

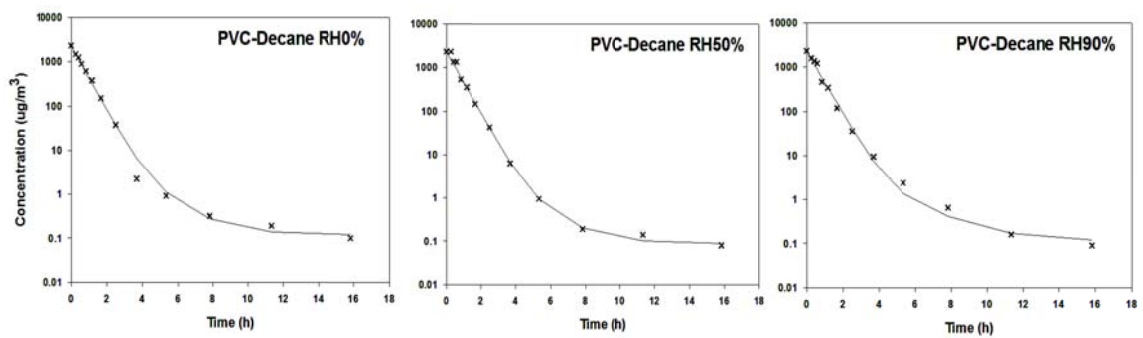
รูปที่ 22 – 26 แสดงลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดูดซับสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นเวลา 16 – 18 ชม. ของสารอินทรีย์ ได้แก่ Toluene, PERC, Decane, Nicotine และ Phenol ตามลำดับ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% หมายเหตุ ความเข้มข้นจากแบบจำลองได้จากการทำนายค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ดีที่สุดด้วยแบบจำลองตามสมการ (4) – (6)



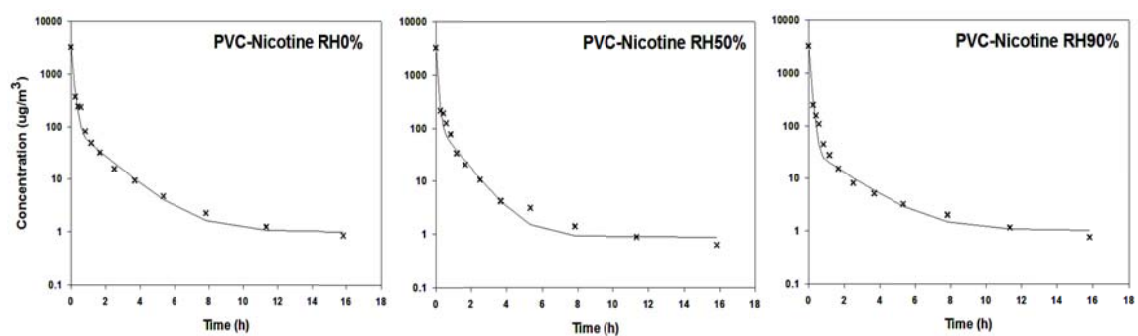
รูปที่ 22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Toluene ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งพอลิไวนิลคลอไรด์



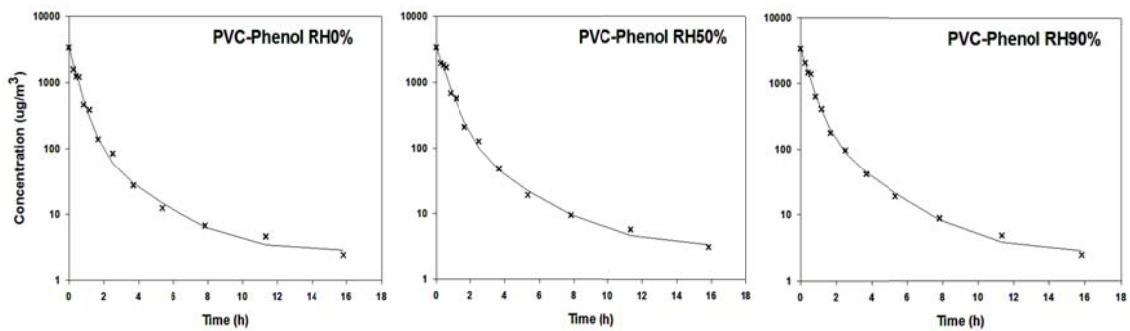
รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PERC ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งพอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 24 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Decane ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งพอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Nicotine ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งพอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 26 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น Phenol ในอากาศในห้องทดสอบที่ติดตั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ (สัญลักษณ์ x ความเข้มข้นจากการทดลอง, — ค่าความเข้มข้นจากแบบจำลอง)

โดยภาพรวมการเปลี่ยนความเข้มข้นสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์มีความคล้ายคลึงกับกราฟการเปลี่ยนแปลงของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน คือ ความเข้มข้นในช่วงเวลาแรกลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม. ความเข้มข้นลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากอัตราการคายกลับสูงขึ้นจนระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่า กราฟความเข้มข้นของ Toluene และ PERC ในการทดลองของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ (รูปที่ 22 และ 23) ค่อนข้างแตกต่างจากกราฟความเข้มข้นในการทดลองของแผ่นพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 17 และ 18) โดยความเข้มข้น Toluene ในอากาศมีค่าสูงกว่า แต่ความเข้มข้น PERC กลับลดต่ำกว่ามาก ซึ่งอาจเป็นผลจากความสามารถของสารอินทรีย์ในการแทรกซึมในเนื้อวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์แตกต่างจากวัสดุพอลิโพรพิลีน ซึ่งจะวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นนี้ในหัวข้อต่อไป สำหรับการทดลองการดูดซับของ Nicotine ความเข้มข้นในอากาศลดลงจนกระทั่งค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 1 มก./ลบ.ม. ซึ่งสูงกว่าในการทดลองของแผ่นพอลิโพรพิลีน

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 90% พบว่า โดยส่วนใหญ่สารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดมีการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างจากกรณีที่ไม่มีความชื้นในอากาศ ซึ่งอาจชี้ให้เห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศค่อนข้างมีผลน้อยต่อการดูดซับสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ มีเพียง PERC เท่านั้นที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่างจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อเวลาการทดลองผ่านไป 6 ชม. ความเข้มข้นของ PERC ลดลงได้ต่ำกว่ากรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำอาจขวางกั้นกระบวนการเคลื่อนที่จากเฟสที่เป็นก๊าซไปสู่เฟสที่อยู่ติดบนผิววัสดุ

2. ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์และค่าสมดุลการดูดซับ

ตาราง 11 และ 12 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด และค่าความสามารถของแผ่นพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ในการดูดซับสารอินทรีย์นั้นๆ ที่สภาวะสมดุล โดยแบ่งเป็นแผ่นวัสดุสะอาดและแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศมาก่อน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารอินทรีย์ λ_s , λ_d , k_1 , และ k_2 สามารถทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังสมการ (4) – (6) โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งได้จากการทดลอง ทำนายค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี GA โดยใช้โปรแกรม MATLAB เนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ค่าความเหมาะสม (Goodness-of-fit, GF) จะต้องมียกค่าต่ำที่สุด สมการที่ใช้ในการหาค่า GF แสดงดังสมการ (7)

โดยความหมายจากแบบจำลอง λ_s บอกให้ทราบถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์จากเฟสที่อยู่ในรูปของก๊าซมาสู่เฟสที่อยู่ในรูปของโมเลกุลดูดติดบนผิววัสดุ λ_d แสดงถึงความเร็วในการคายตัวของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ติดบนผิววัสดุกลับสู่บรรยากาศ k_1 แสดงถึงความเร็วของสารอินทรีย์ในการแทรกซึมหรือละลายเข้าสู่เนื้อในวัสดุ และ k_2 แสดงถึงความเร็วของสารอินทรีย์ในการที่คายจากเนื้อในวัสดุสู่ผิวบนของวัสดุที่สัมผัสอากาศ ส่วนสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน ณ สภาวะสมดุล (Equilibrium partition coefficient, K_{part}) มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่อยู่ในแผ่นวัสดุ ต่อค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศ แสดงดังสมการ (8) ค่า K_{part} ยิ่งสูง นั้นหมายถึง วัสดุมีความสามารถในการดูดติดและดูดซึมโมเลกุลของสารอินทรีย์สูงตามไปด้วย

ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนแบบสะอาดและสกปรกที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องต่างๆ มาก่อน

	ชุดการทดลอง	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	λ_a (ต่อ ซม.)	λ_d (ต่อ ซม.)	k_1 (ต่อ ซม.)	k_2 (ต่อ ซม.)	GF	K_{part}
PP-Toluene	RH0% (0.09%)	24.8±0.5	1.95	0.68	0.40	0.3×10^{-3}	0.30	3813
	RH50% (48±1.6)	25.0±0.9	1.73	0.40	0.33	1.8×10^{-3}	0.22	791
	RH90% (90±3)	25.4±0.5	1.66	0.96	0.46	0.7×10^{-3}	0.26	1139
	Office							
	(RH ห้อง 64%, RH ทดลอง 51±0.5)	25.4±0.5	0.82	0.40	0.54	4.0×10^{-3}	0.10	279
	Kitchen (RH ทดลอง 51±3%)	25.2±0.3	1.39	0.28	0.37	3.0×10^{-3}	0.10	614
	Salon (RH ทดลอง 45±0.9%)	24.7±0.7	1.97	0.37	0.41	3.9×10^{-3}	0.12	565
PP-PERC	RH0% (0%)	22.2±0.2	1.20	0.23	0.16	5.0×10^{-3}	0.14	173
	RH50% (49±2.3)	22.5±0.6	1.10	0.26	0.23	6.0×10^{-3}	0.17	167
	RH90% (89±5.5)	22.2±0.4	1.16	0.42	0.17	14.7×10^{-3}	0.13	34
	Office							
	(RH ห้อง 65%, RH ทดลอง 47±1.4)	23.3±0.4	1.11	0.41	0.20	1.8×10^{-3}	0.16	303
PP-Decane	RH0% (03.1%)	25.1±0.3	8.01	0.61	0.60	18.9×10^{-3}	0.29	428
	RH50% (48±1)	25.0±0.5	1.79	0.42	0.32	38.8×10^{-3}	0.16	40
	RH90% (90±1.7)	24.8±0.4	1.93	0.20	0.29	12.1×10^{-3}	0.28	246
	Office							
	(RH ห้อง 71%, RH ทดลอง 44±0.9)	25.1±0.3	1.54	0.27	0.22	13.1×10^{-3}	0.21	102

PP-Nicotine	RH0% (09.9%)	25.1±0.3	13.28	0.10	0.78	5.0×10^{-3}	0.34	20,632
	RH50% (48±1.8)	24.6±0.4	16.39	0.15	1.13	7.9×10^{-3}	0.35	16,245
	RH90% (85±2.8)	24.6±0.5	17.45	0.13	1.29	6.1×10^{-3}	0.36	27,740
	Office (RH ห้อง 52%, RH ทดลอง 44±0.9)	25.1±0.3	21.19	0.11	1.73	8.7×10^{-3}	0.38	38,901
PP-Phenol	RH0% (03.0%)	25.0±0.4	2.15	0.30	0.24	12.8×10^{-3}	0.20	140
	RH50% (52±3.2)	25.1±0.4	2.40	0.52	0.25	37.6×10^{-3}	0.18	35
	RH90% (95±0.5)	25.4±0.2	2.50	0.62	0.30	36.2×10^{-3}	0.19	37
	Office (RH ห้อง 77, RH ทดลอง 52.±1.2)	25.0±0.4	2.54	0.30	0.20	3.3×10^{-3}	0.21	515

*หมายเหตุ ชุดการทดลอง Office, Kitchen และ Salon ทำการทดลองที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50%

ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์แบบสะอาดและสกปรกที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องต่างๆ มาก่อน

	ชุดการทดลอง	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	λ_a (ต่อ ซม.)	λ_d (ต่อ ซม.)	k_1 (ต่อ ซม.)	k_2 (ต่อ ซม.)	GF	K_{part}
PVC-Toluene	RH0% (0.05%)	25.2±0.3	1.04	0.42	0.42	24.6×10^{-3}	0.14	44
	RH50% (51±3.4)	25.5±0.1	0.41	0.24	0.19	37.7×10^{-3}	0.14	10
	RH90% (85±0.1)	25.1±0.1	0.72	0.97	0.26	265×10^{-3}	0.25	1.6
	Office							
	(RH ห้อง 76%, RH ทดลอง 45±2.3)	25.6±0.1	0.43	0.03	0.30	7.4×10^{-3}	0.12	643
	Kitchen (RH ทดลอง 50±3.0%)	24.6±0.2	0.76	0.17	0.24	44.1×10^{-3}	0.11	30
	Salon (RH ทดลอง 47±3.4%)	24.8±0.4	1.60	0.25	0.43	17.1×10^{-3}	0.15	166
PVC-PERC	RH0% (0.04%)	25.1±0.1	0.89	0.10	1.00	1.6×10^{-3}	0.24	5,453
	RH50% (55±2.5)	24.5±0.3	0.61	0.16	0.87	1.4×10^{-3}	0.13	2,357
	RH90% (90±0.3)	24.8±0.3	1.11	0.14	1.03	2.2×10^{-3}	0.21	3,725
	Office							
	(RH ห้อง 76%, RH ทดลอง 49±1.3)	24.9±0.5	1.21	0.14	0.69	0.4×10^{-3}	0.23	14,473
PVC-Decane	RH0% (4.4%)	24.4±0.6	0.49	0.02	0.62	9.2×10^{-3}	0.13	1,549
	RH50% (51±0.02)	24.7±0.3	0.43	0.01	0.59	1.2×10^{-3}	0.16	1,732
	RH90% (94±0.8)	24.9±0.5	0.44	0.01	0.43	9.0×10^{-3}	0.23	1,511
	Office							
	(RH ห้อง 89%, RH ทดลอง 56±1.5)	24.7±0.3	0.46	0.01	0.57	10.5×10^{-3}	0.16	2,153

PVC-Nicotine	RH0% (4.4)	25.1±0.3	6.53	0.24	0.62	4.8×10^{-3}	0.25	2,011
	RH50% (55±1.4)	25.±0.2	10.00	0.41	0.97	9.0×10^{-3}	0.29	2,657
	RH90% (94±0.5)	24.8±0.3	7.77	0.11	0.52	17.7×10^{-3}	0.30	2,234
	Office (RH ห้อง 69%, RH ทดลอง 52±1.7)	24.2±0.4	8.59	0.36	0.72	15.5×10^{-3}	0.23	1,148
PVC-Phenol	RH0% (3.1%)	25.2±0.3	1.05	0.15	0.42	16.6×10^{-3}	0.18	180
	RH50% (53±1.7)	24.9±0.4	0.56	0.19	0.31	17.7×10^{-3}	0.15	55
	RH90% (94±1.1)	25.2±0.3	0.80	0.21	0.36	13.2×10^{-3}	0.11	108
	Office (RH ห้อง 69, RH ทดลอง 55±0.3)	25.0±0.3	0.58	0.13	0.28	15.2×10^{-3}	0.14	84

*หมายเหตุ ชุดการทดลอง Office, Kitchen และ Salon ทำการทดลองที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50%

จากตาราง 11 และ 12 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ Λ_a, Λ_d และ k_1 ของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิเมอร์อยู่ในช่วงเลขยกกำลัง (Order of magnitude) เดียวกัน ยกเว้นค่า Λ_a ของ Nicotine ที่มีค่ามากกว่าสารอินทรีย์อื่นประมาณ 10 เท่า ส่วนค่า k_2 ของสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าพารามิเตอร์ทั้งสาม โดยอยู่ในช่วง $10^{-4} - 10^{-1}$ ต่อ ชม. สะท้อนให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ในเนื้อพอลิเมอร์กลับสู่ชั้นผิวหน้าเป็นไปได้ค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในส่วนอื่นของระบบพอลิเมอร์ เช่น พอลิโพรพิลีน อาจจัดเป็นแหล่งรองรับโมเลกุลสารอินทรีย์ เช่น Toluene แบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible sink) เนื่องจากมีอัตราการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 10^{-4} ต่อ ชม.

พิจารณาค่า Λ_a ของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ที่ดูดติดบนแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่า โดยส่วนใหญ่โมเลกุลของสารอินทรีย์ใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากเฟสที่เป็นก๊าซไปสู่เฟสที่เป็นโมเลกุลดูดติดบนผิวใกล้เคียงกับช่วงเวลา (Time scale) ของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบที่ 1.2 ต่อ ชม. นั้นหมายถึงโมเลกุลบางส่วนจะดูดติดที่ผิวหน้าของแผ่นพอลิเมอร์ ในขณะที่บางส่วนจะถูกพาออกนอกห้องทดสอบเนื่องจากการระบายอากาศ สำหรับ Nicotine ซึ่งจัดว่าเป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหยใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากเฟสที่อยู่ในรูปของก๊าซไปสู่เฟสที่อยู่ในรูปของโมเลกุลดูดติดบนผิวได้เร็วกว่าสารอื่น นั้นแสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของ Nicotine ถูกกำจัดออกจากห้องทดสอบด้วยการระบายอากาศเพียงประมาณ 10% เท่านั้น โดยส่วนใหญ่ถูกกำจัดด้วยการเคลื่อนที่ไปที่แผ่นวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า Λ_a กับ Λ_d ของการดูดติดผิวและการคายกลับของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สารที่แผ่นวัสดุพอลิเมอร์ทั้งสอง พบว่า อัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารอินทรีย์จากบรรยากาศสู่แผ่นวัสดุมีค่ามากกว่าอัตราที่โมเลกุลสารอินทรีย์คายตัวกลับสู่บรรยากาศอีกครั้ง ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 10 – 100 เท่า อัตราการคายกลับที่ค่อนข้างนี้ส่งผลให้สารอินทรีย์สามารถคงอยู่ในบรรยากาศภายในห้องได้เป็นเวลานาน

เมื่อพิจารณา k_1 เทียบกับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบที่ 1.2 ต่อชม. พบว่าค่า k_1 ของการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ที่พอลิเมอร์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบ แสดงว่าสารอินทรีย์มีโอกาสแทรกหรือละลายเข้าสู่เนื้อของพอลิเมอร์ได้ เมื่อพิจารณาค่า k_1 เทียบกับค่า k_2 ของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนย้ายมวลสารเข้าสู่เนื้อในวัสดุมีค่ามากกว่าความเร็วในการเคลื่อนย้ายมวลสารกลับจากเนื้อในวัสดุสู่ผิวหน้าวัสดุ โดยเฉพาะค่า k_2 ที่ได้จากการคายตัวกลับจากเนื้อในวัสดุพอลิโพรพิลีนของ Toluene และการคายตัวกลับจากเนื้อในวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ของ PERC นั้นหมายความว่า โมเลกุลสารอินทรีย์ Toluene และ PERC ที่เคลื่อนที่แทรกเข้าไปสู่ในเนื้อวัสดุ หรือละลายเข้าไปในเนื้อในวัสดุ ต้องใช้เวลานานมากในการคายตัวกลับสู่บรรยากาศอีกครั้ง ซึ่งอาจถือได้ว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นวัสดุซับที่ไม่สามารถย้อนกลับได้สำหรับ Toluene และ PERC ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้ระดับของสารอินทรีย์ที่คายกลับมาอาจจะมีค่าค่อนข้างต่ำก็ตาม แต่ระดับความเป็นอันตรายต่อผู้ที่ได้รับการสัมผัสยังคงมีอยู่ เนื่องจากระยะเวลาในการอาศัยภายในอาคารที่ยาวนานนั่นเอง

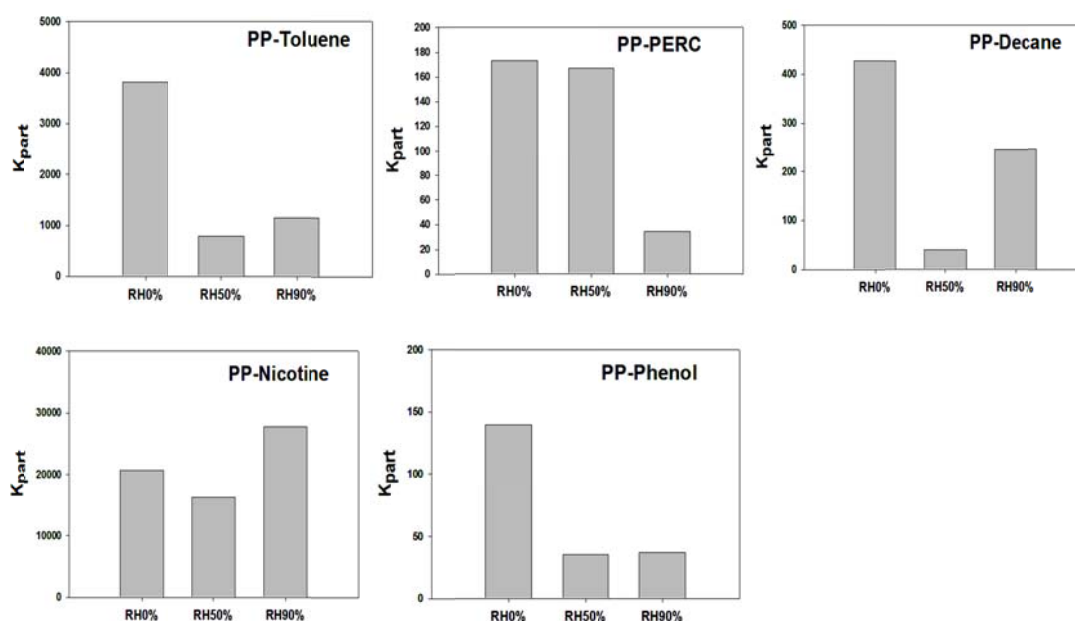
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สารที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการ (4) – (6) ของแผ่นพอลิเมอร์ทั้งสอง พบว่า ค่า GF อยู่ในช่วงประมาณ 0.1-0.3 โดย Toluene และ Nicotine มีค่า GF สูงกว่าสารอื่น ทั้งนี้เพราะการ

ทดลอง Toluene มีจำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่างน้อย (N) กว่าทดลองดูดซับของสารอื่น ดังนั้นค่า GF ที่คำนวณได้จากสมการ (7) จึงมีค่าสูง ส่วน GF ของการทดลอง Nicotine มีค่าสูงอาจเนื่องมาจากเส้นกราฟความเข้มข้นของ Nicotine ที่ได้จากการทดลองไม่แนบสนิทกับเส้นกราฟความเข้มข้นที่ได้จากโมเดลในช่วง 4-10 ซม. (รูปที่ 20 และ 25) เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของการทดลองของสารอื่น

3. ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิเมอร์

3.1 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน

รูปที่ 27 แสดงค่า K_{part} หรือความสามารถของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนในการดูดซับสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% หมายถึงค่า K_{part} คำนวณได้ตามสมการ (8)



รูปที่ 27 K_{part} ของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ดูดซับสารอินทรีย์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90%

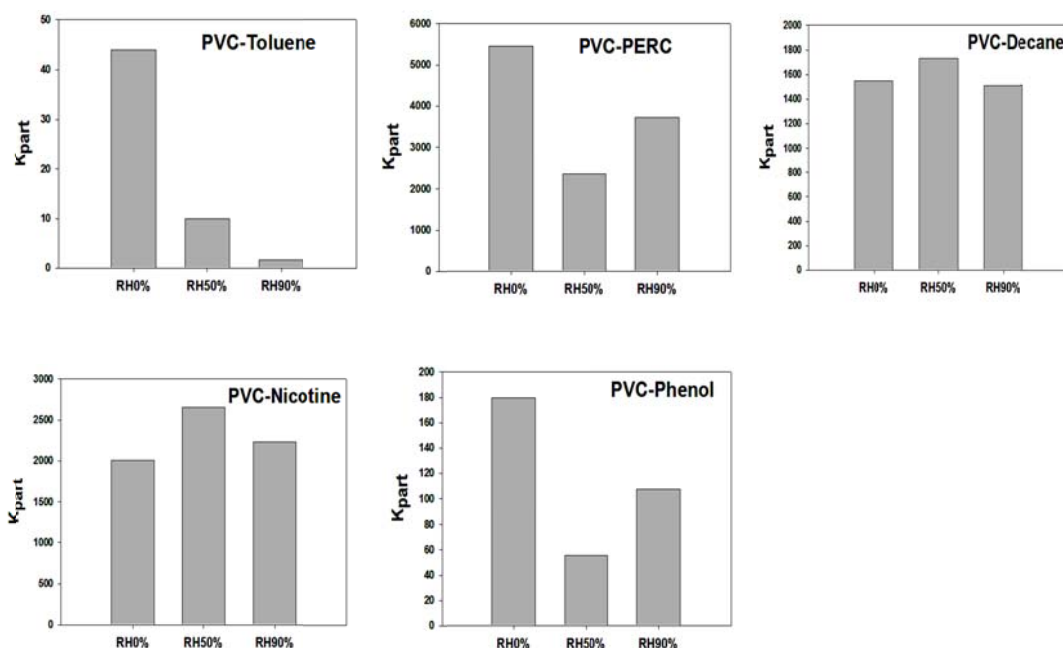
เมื่อพิจารณา K_{part} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 50% พบว่า ความชื้นในอากาศที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถของแผ่นพอลิโพรพิลีนในการดูดซับสาร Toluene, Decane และ Phenol ลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับกรณีของ Decane และ Phenol อาจเป็นไปได้ว่า พื้นผิววัสดุบางส่วนที่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำอาจขวางกั้นกระบวนการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์จากเฟสของก๊าซมาสู่เฟสที่เป็นโมเลกุลดูดติดบนผิววัสดุ ส่วน Toluene เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมากขึ้น ค่า K_{part} ลดลงกว่า 79% เนื่องจากกลไกการดูดซับที่สำคัญของ Toluene คือการแทรกตัว (Partitioning) เข้าไปติดในเนื้อในวัสดุพอลิโพรพิลีน (Bloch, 1999) ดังนั้นเมื่อมีโมเลกุลของน้ำปกคลุม จึงอาจไปขวางกั้น

กระบวนการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์จากที่ติดบนผิววัสดุเข้าสู่เนื้อในวัสดุ สำหรับการดูดซับของ PERC ได้รับผลกระทบเมื่อมีความชื้นในอากาศสูง ซึ่งเป็นไปได้ว่าพื้นผิววัสดุปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำจำนวนมาก ทำให้แรงยึดเหนี่ยวการดูดซับของโมเลกุล PERC กับพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนเป็นกับโมเลกุลน้ำแทน ซึ่งแรงกระทำผ่านแวนเดอร์วาลส์ของน้ำมีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีน

ส่วน Nicotine ได้รับผลกระทบจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่มากเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ทั้ง 4 ชนิดข้างต้น เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 50% เป็น 90% ค่า K_{part} สูงขึ้นประมาณ 70% ซึ่งอาจเป็นเพราะพื้นผิวหน้าของวัสดุถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำอย่างทั่วถึง อาจมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ Nicotine กับโมเลกุลของน้ำที่ปกคลุมบนพื้นผิววัสดุ ผ่านทางแรงกระทำกรด-เบส หรือแรงพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้วัสดุพอลิโพรพิลีนตามทฤษฎีแล้วมีแรงกระทำผ่านเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น เมื่อมีโมเลกุลของน้ำมาปกคลุมผิวหน้าจึงสร้างแรงยึดเหนี่ยวกรด-เบสขึ้นกับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีแรงชนิดนี้ด้วยเช่นกัน เช่น Nicotine ซึ่งสามารถดูดซับกับสารอื่นได้ผ่านทางแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงกรด-เบส แสดงในตาราง 1 งานวิจัย Ongwandee and Sawanyapanich (2012) ได้ศึกษาความจุของการดูดซับนิโคตินบนแผ่นวัสดุภายในอาคาร ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม พรม และผ้าฝ้าย ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% พบว่า ความจุของการดูดซับนิโคตินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 0% เป็น 90% ทำให้ค่าความจุการดูดซับของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 122%, ของผ้าฝ้ายเพิ่มขึ้น 46% และของพรมเพิ่มขึ้น 53% อย่างไรก็ตามมีข้อน่าสังเกตว่า Phenol ซึ่งสามารถดูดซับกับสารอื่นผ่านแรงทั้ง 2 ชนิดเช่นเดียวกับ Nicotine แต่เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์กลับทำให้ค่า K_{part} ลดลง ซึ่งผลที่แตกต่างนี้อาจเกี่ยวข้องกับกลไกอื่นร่วมด้วยที่พื้นผิว เช่น การแพร่ การละลาย การแทรกตัวของโมเลกุลสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อวัสดุ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ต่อไปในหัวข้อ 4

3.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์

รูปที่ 28 แสดงค่า K_{part} หรือความสามารถของแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ในการดูดซับสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% พบว่า การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดูดซับสารอินทรีย์บนแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์แตกต่างจากของแผ่นพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 28 K_{part} ของแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ดูดซับสารอินทรีย์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90%

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์มีความสามารถดูดซับสาร PERC ได้สูงกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น เนื่องจากโมเลกุลของ PERC แทรกซึมเข้าสู่ในเนื้อวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ได้มากซึ่งสังเกตได้จากค่า k_2 สูงกว่าของสารอื่นประมาณ 10 เท่า (ตาราง 12) เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจาก 0% เป็น 50% และ 90% ค่า K_{part} ของ PERC ได้รับผลกระทบค่อนข้างชัดเจน อาจเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดติดที่ผิวหน้าขวางกั้นการเคลื่อนที่ของ PERC เข้าสู่เนื้อในพอลิไวนิลคลอไรด์

เมื่อพิจารณาการดูดซับของ Toluene บนแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ ให้น้ำมีผลต่อการดูดซับสาร Toluene ค่อนข้างมาก โดยค่า K_{part} ลดลงถึง 77% เนื่องจาก Toluene เป็นสารที่มีแรงกรด-เบสต่ำ ดังนั้นเมื่อเกิดกระบวนการดูดติดบนผิวหน้าจึงผ่านทางแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก การที่มีโมเลกุลของน้ำมาปกคลุมผิวหน้าของแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ จึงอาจไปลดแรงกระทำแวนเดอร์วาลส์ซึ่งมีค่าทางทฤษฎี 43 มิลลิจูล/ตร.ม. ในขณะที่น้ำมีแรงแวนเดอร์วาลส์ประมาณ 21.8 มิลลิจูล/ตร.ม. ส่วนกรณีของ Nicotine และ Decane ที่ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป

สำหรับการดูดซับของ Phenol ที่แผ่น PVC มีค่า K_{part} ลดลงประมาณ 70 และ 40% เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 50% และ 90% ตามลำดับ ถึงแม้ว่า Phenol จัดเป็นสารอินทรีย์ที่มีขั้วทั้งแรงกรด-เบส (Bipolar compound) และละลายน้ำได้ดี แต่ความสามารถในการดูดซับของแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์กลับลดลงเมื่อมีความชื้นในอากาศ ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของน้ำที่เกาะติดที่ผิวหน้าของแผ่นวัสดุอาจไม่เหมือนกับคุณสมบัติของมวลน้ำทั่วไป (Bulk water) ทั้งด้านการละลายและแรงกระทำผ่านทางกรด-เบส ของสารอินทรีย์ที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างชั้นโมเลกุลน้ำและเฟสก๊าซ (Finlayson-Pitts et al., 2003)

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงความสามารถของน้ำในการดูดซับที่แผ่นพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยทดสอบกับแผ่นพอลิเมอร์สะอาดและทำให้แห้งสนิทแล้ว ใช้น้ำกลั่นทำให้เป็นไอน้ำระเหยด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นในห้องทดสอบประมาณ 20 มก./ลบ.ม. จากนั้นผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าสู่ห้องทดสอบด้วยอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 1.2 ต่อ ชม. ซึ่งเท่ากับการทดลองการดูดซับสารอินทรีย์ควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C. วัดความเข้มข้นของน้ำในอากาศในห้องทดสอบเป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นนำชุดข้อมูลดังกล่าวมาทำนายพารามิเตอร์การดูดซับและการคายด้วยแบบจำลองตามสมการ (4)-(6) ทำซ้ำการทดลองละ 2 ชุดโดยเปลี่ยนเวลาในการทำไอระเหยจาก 10 นาที เป็น 1 นาที ได้ผลการทำนายค่าพารามิเตอร์แสดงในตาราง 13

ค่า K_{part} ของแผ่นพอลิโพรพิลีน เท่ากับ 1.5 ± 1.0 และของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ เท่ากับ 1.8 ± 1.2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่า K_{part} ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ทดสอบ โดยแตกต่างกันกว่าระดับเลขยกกำลัง 10^{-10} นั้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นพอลิเมอร์มีความสามารถต่ำมากให้การดูดซับไอน้ำในอากาศทั้งการดูดติดที่พื้นผิวและการแทรกซึมเข้าเนื้อในวัสดุ ดังนั้นผลกระทบของไอน้ำต่อโครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์จึงไม่น่ามีผลสำคัญ

ตาราง 13 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับไอน้ำของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์สะอาด

	ชุดการทดลอง	λ_a (ต่อ ซม.)	λ_d (ต่อ ซม.)	k_1 (ต่อ ซม.)	k_2 (ต่อ ซม.)	GF	K_{part}	$K_{part,surface}$
PP-Water vapor	ครั้งที่ #1	110	162	6.6	2.8	0.04	2.3	0.7
	ครั้งที่ #2	69	150	56	77	0.46	0.8	0.5
PVC-Water vapor	ครั้งที่ #1	162	113	4.2	5.0	0.09	2.6	1.4
	ครั้งที่ #2	70	100	50	180	0.08	0.9	0.7

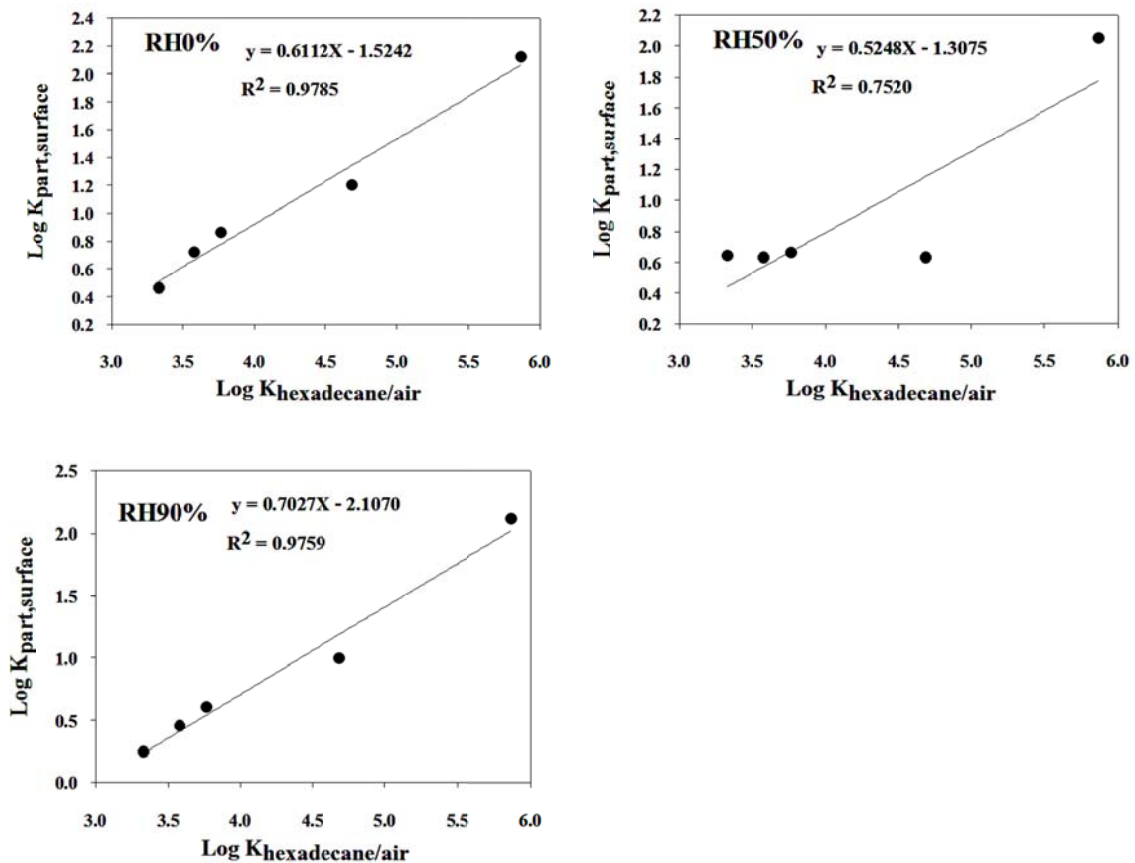
4. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดติดผิวแบบไม่เจาะจง

ในหัวข้อจะพิจารณาเฉพาะขอบเขตของระบบที่ชั้นผิววัสดุที่สัมผัสอากาศเท่านั้น ซึ่งจะมีเพียงกลไกการดูดติดผิว (Adsorption) ของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ผิวหน้าแผ่นพอลิเมอร์ โดยไม่รวมกลไกการดูดซับที่เกิดจากการแพร่ หรือการละลายในเนื้อของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งกลไกเหล่านี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำที่ผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน หรือ K_{part} ของสารอินทรีย์ที่ทดสอบจึงคิดเฉพาะระหว่างที่ผิวหน้าวัสดุและเฟสก๊าซเท่านั้น ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า $K_{part,surface}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (11)

$$K_{part,surface} = \frac{\lambda_a}{\lambda_d} \quad (11)$$

การเกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำกับแผ่นวัสดุ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือแรงที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงที่เกิดจากแรงกรด-เบส หรือพันธะไฮโดรเจน โดยแรงการดูดซับแบบไม่เจาะจง หรือ Nonspecific intermolecular interactions ในที่นี้ คือแรงแวนเดอร์วาลส์สำหรับตัวเลขเชิงปริมาณของแรงยึดเหนี่ยวชนิดนี้ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่สนใจระหว่างของเหลว Hexadecane และ อากาศ ($K_{hexadecane / air}$) ซึ่งแสดงในตาราง 1 ในงานวิจัยนี้ไม่เลือกใช้ค่าความดันไอของสารอินทรีย์เป็นตัวแทนของแรงแวนเดอร์วาลส์เช่นงานวิจัยอื่น เนื่องจากแรงที่เกิดจากการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ไม่ได้มีเฉพาะแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น แต่ยังมีแรงกระทำที่เกิดจากแรงกรด-เบส ที่สามารถกระทำระหว่างกันได้ในการอินทรีย์ที่มีขั้ว

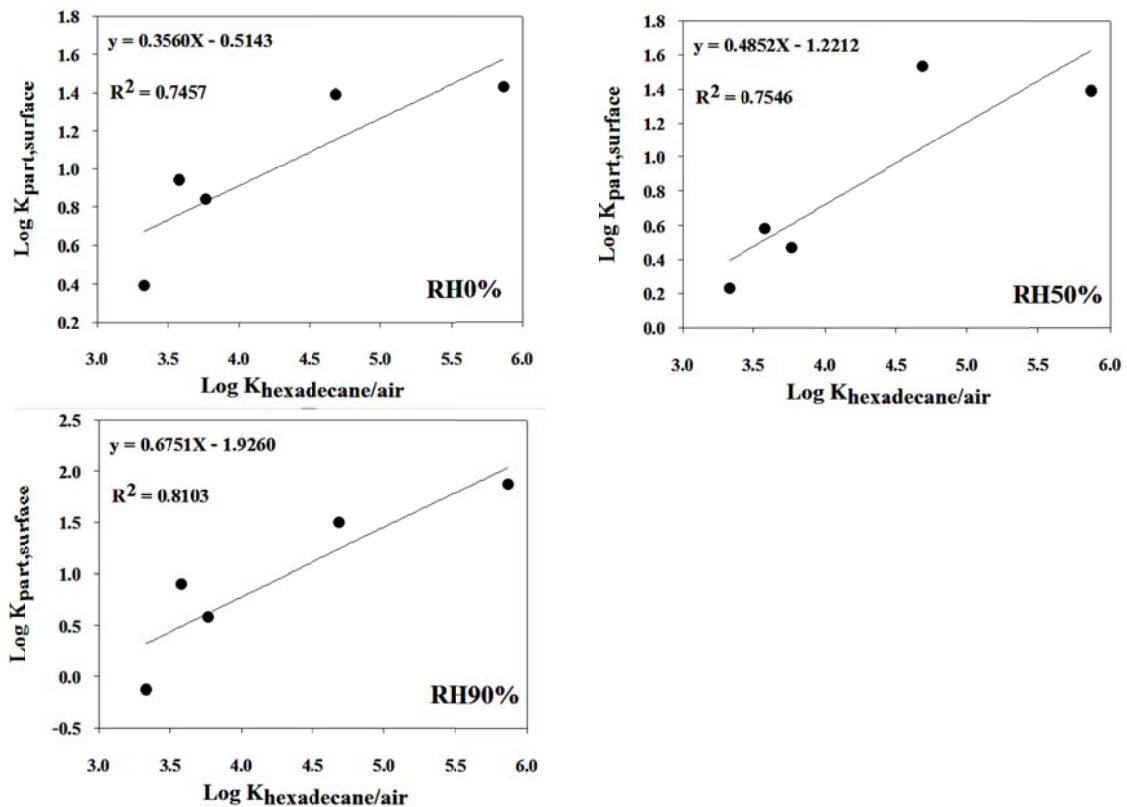
แผ่นพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีนจัดเป็นวัสดุที่มีเฉพาะแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับผ่านทางแรงแบบไม่เจาะจงเท่านั้น คือมีค่าแรงแวนเดอร์วาลส์ 25.7 มิลลิจูล/ตร.ม. ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวแรงแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ทดสอบ กับ ค่า $K_{part,surface}$ รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{part,surface}$ กับ $K_{hexadecane / air}$ ของสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 ระดับ



รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดซับแบบไม่เจาะจงของแผ่นพอลิโพรพิลีน

ผลการวิเคราะห์พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่า $\text{Log } K_{\text{part,surface}}$ และ $\text{Log } K_{\text{hexadecane/air}}$ ของสารอินทรีย์ที่ทดสอบ 5 สาร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 90% ได้ค่า R^2 มากกว่า 0.9 แต่ความสัมพันธ์เชิงเส้นกลับน้อยลงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความชื้น 0% คือสภาวะที่ไม่มีไอน้ำในอากาศ พื้นผิววัสดุพอลิโพรพิลีนจึงไม่มีโมเลกุลน้ำดูดติดที่ผิวหน้า ดังนั้นการดูดซับสารอินทรีย์จึงเกิดขึ้นโดยตรงกับโครงสร้างทางเคมีของเนื้อวัสดุที่ผิวหน้า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ผ่านทางแรงแบบไม่เจาะจงดังความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงรูปที่ 29 โดยค่าความจุหรือความสามารถของพอลิโพรพิลีนในการดูดซับสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามแรงแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีค่ามากขึ้น สำหรับที่ความชื้น 90% เป็นไปได้ว่าโมเลกุลน้ำดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) การยึดเหนี่ยวของการดูดซับจึงอาจเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับโมเลกุลของน้ำหรือชั้นฟิล์มของน้ำที่ปกคลุมพื้นผิว ตรงข้ามกับกรณีการทดสอบที่ความชื้น 50% ซึ่งไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โมเลกุลของน้ำดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุอาจมีลักษณะเป็นจุดๆ ไม่ต่อเนื่องกันทั่วทั้งพื้นผิว ดังนั้นพื้นที่การดูดติด (Adsorption sites) จึงอาจพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ พื้นผิวดังเดิมของวัสดุที่ไม่มีโมเลกุลน้ำปกคลุม และพื้นผิวที่มีโมเลกุลน้ำดูดติดอยู่ พลังงานการดูดซับจึงไม่มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว

กรณีแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นวัสดุที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไม่เฉพาะเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น แต่ยังมีแรงกระทำที่เกิดจากแรงกรด-เบสโดยแสดงความเป็นเบสมากกว่า ซึ่งแตกต่างจากพอลิโพรพิลีนที่มีแต่แรงกระทำแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวแรงแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ทดสอบ กับ ค่า $K_{part,surface}$ รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{part,surface}$ กับ $K_{hexadecane/air}$ ของสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 ระดับ



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดซับแบบไม่เจาะจงของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์

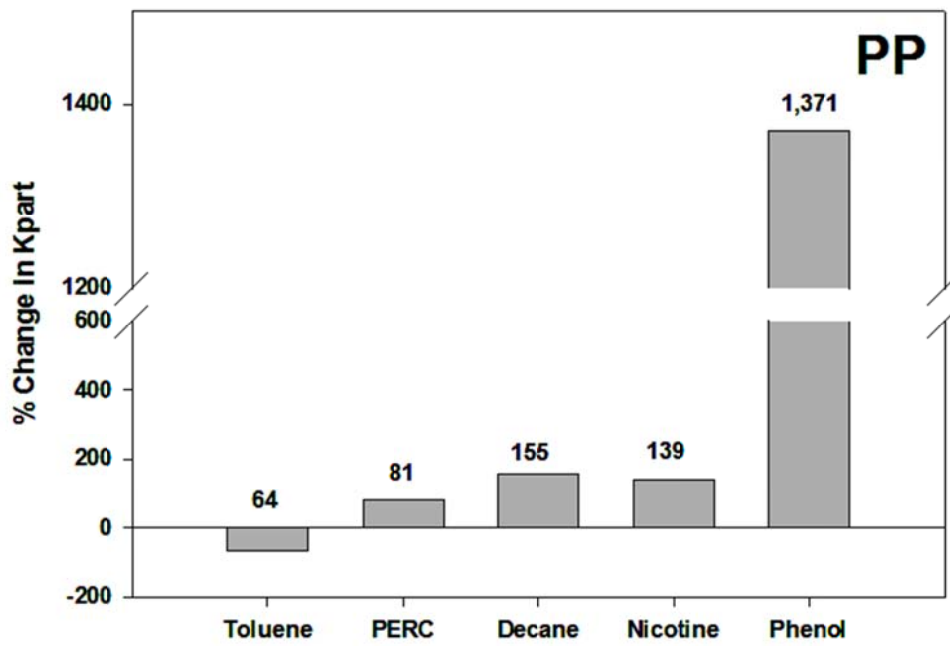
ผลจากการวิเคราะห์พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่า $\text{Log } K_{part,surface}$ และ $\text{Log } K_{hexadecane/air}$ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 50% ได้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันประมาณ 0.7 แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% กลับมีค่า R^2 เพิ่มขึ้นเป็น 0.8 กรณีที่ไม่มีความชื้นในอากาศบนแผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งโดยหลักทางทฤษฎีไม่ควรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เนื่องจากแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลสารอินทรีย์อื่นไม่เฉพาะทางแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น แต่ยังสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลสารอินทรีย์ประเภทมีขั้วผ่านทางแรงกรด-เบส ได้อีกด้วยถึงแม้ระดับความแรงกรด-เบสจะค่อนข้างต่ำก็ตาม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดี สารอินทรีย์ที่ผู้วิจัยเลือกเป็นตัวแทนในการทดสอบทั้ง 5 สารนั้น มีสารอินทรีย์บางสารที่แสดงความเป็นเบส คือ Toluene ซึ่งเป็นเบสอ่อนมีค่าเชิงเทียบเคียงแรงของเบส

เท่ากับ 0.14 และ Nicotine ซึ่งเป็นเบสแรงกว่ามีค่าเชิงเทียบเคียงของเบสประมาณ 0.52 ดังตาราง 1 สารทั้งสองไม่อาจสร้างพันธะกับโมเลกุลพื้นผิววัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ เนื่องจากพื้นผิววัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ก็แสดงความเป็นเบสเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเชิงเทียบเคียงแรงของเบสเท่ากับ 3.5 ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดติดผิวจึงกระทำผ่านเฉพาะแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น ความสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลของสารอินทรีย์ Toluene, PERC, Decane และ Nicotine จึงน่าจะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงยกเว้น Phenol เพราะโมเลกุลของ Phenol สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลอื่นผ่านทางแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงกรด-เบสที่แรงกว่าสารอื่น แต่ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กลับพบว่า เมื่อไม่รวม Phenol ในเส้นความสัมพันธ์กลับไม่ได้ทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ดังนั้นแรงกระทำที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์น่าจะมี ความสำคัญมากกว่าแรงกรด-เบส นอกจากนี้แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบอาจ ไม่ได้มีแต่สารพอลิไวนิลคลอไรด์เท่านั้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่อุตสาหกรรมผลิตพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ จะมีการเติม plasticizer ลงไปในพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และความอ่อนนุ่มของพอลิเมอร์ (ชลธิชา, 2538) ทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวไม่เหมือนกับค่าของวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ทางทฤษฎีที่ไม่ผสมสารเจือปนอื่น สำหรับกรณีที่มีความชื้นในอากาศ 50% พบค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความชื้นในอากาศ อาจเป็นไปได้ว่าพื้นผิววัสดุบางส่วนถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำ บางส่วนไม่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำ ซึ่งอาจมีผลทำให้พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดติดบนพื้นผิววัสดุหลังงานการดูดซับจึงไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ถ้าเมื่อเพิ่มความชื้นในอากาศเป็น 90% ความสัมพันธ์มีค่า R^2 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีความเป็นไปได้ที่พื้นผิวที่ปกคลุมด้วยโมเลกุลของน้ำอย่างทั่วผิวหน้าทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น การสร้างพันธะการดูดเกาะโมเลกุลสารอินทรีย์จึงเกิดขึ้นระหว่างชั้นโมเลกุลน้ำ ถ้าชั้นโมเลกุลน้ำดังกล่าวเป็นโมเลกุลของมวลน้ำทั่วไป (Bulk water) ที่มีแรงกรด-เบสสูง ความสัมพันธ์ที่ได้ไม่ควรเป็นเส้นตรง แต่ในทางตรงกันข้าม จากการหาความสัมพันธ์ในรูปที่ 29 กลับได้กราฟที่มีค่า R^2 สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าโมเลกุลของน้ำที่ปกคลุมพื้นผิววัสดุไม่มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำทั่วไป โดยเฉพาะค่าแรงกรด-เบส จะไม่เท่ากับน้ำทั่วไปแต่จะต่ำกว่า (Goss and Schwarzenbach, 2001) เป็นผลจากการดูดเกาะบนผิววัสดุทำให้ทิศของโมเลกุลน้ำ (Orientation) ถูกควบคุมด้วยแรงที่กระทำกับพื้นผิวที่น้ำดูดติดอยู่

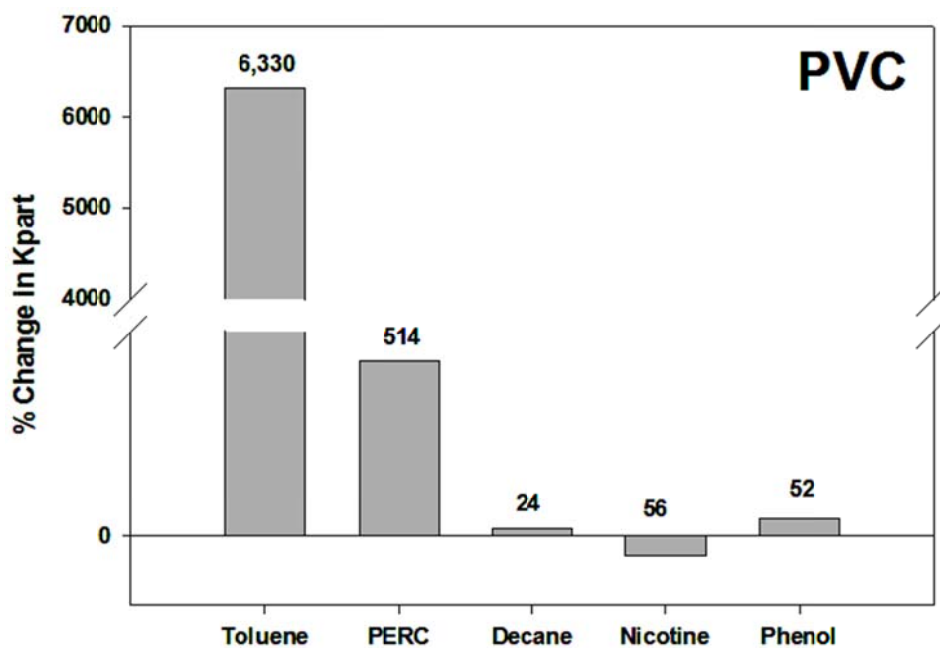
5. ผลของความสกปรกของพื้นผิววัสดุต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์

5.1 การทำให้พื้นผิววัสดุสกปรกจากการสัมผัสอากาศในห้องทำงาน

แผ่นพอลิเมอร์ที่ทำความสะอาดนำไปสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานเป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน จากนั้นนำมาทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของการทดลอง คือ 50% รูปที่ 31 และ 32 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า K_{part} ของสารอินทรีย์ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศมาก่อนเทียบกับแผ่นวัสดุสะอาด



รูปที่ 31 การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของสารอินทรีย์ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีน



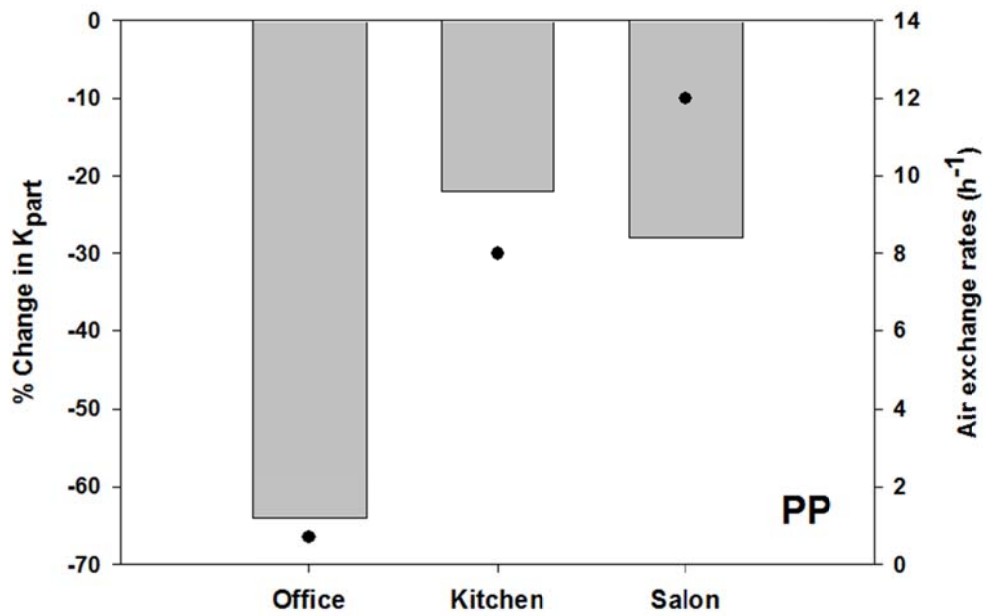
รูปที่ 32 การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของสารอินทรีย์ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์

จากรูปที่ 31 และ 32 แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์บางชนิดมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อพื้นผิววัสดุได้รับการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานมาก่อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเนื่องจากการสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ภายในบรรยากาศ เช่น การมีอยู่ของสารอินทรีย์ต่างๆ ฝุ่นละออง เป็นต้น โดยเฉพาะการดูดซับ Phenol ของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่มีค่า K_{part} เพิ่มขึ้นมากกว่า $10^3\%$ เมื่อเทียบกับแผ่นสะอาด ผิวหน้าของแผ่นวัสดุอาจถูกปกคลุมด้วยสิ่งสกปรก มีผลทำให้เกิดแรงกระทำที่เกิดจากแรงกรด-เบส สามารถสร้างพันธะการดูดซับกับโมเลกุลของ Phenol ได้เพิ่มขึ้น จากเดิมที่แผ่นพอลิโพรพิลีนมีแรงกระทำเพียงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น เพราะ Phenol สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลอื่นได้ทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงกรด-เบส ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับ Toluene ของแผ่นพอลิโพรพิลีนมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสิ่งสกปรกที่ปกคลุมผิวหน้าวัสดุขวางกั้นไม่ให้โมเลกุลของ Toluene เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อพอลิโพรพิลีนได้สะดวก

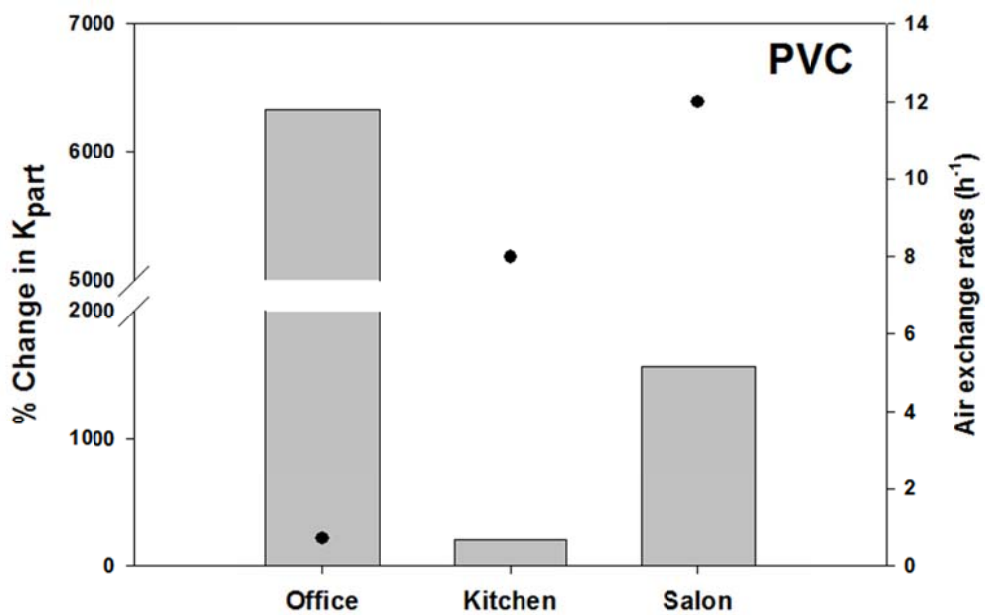
สำหรับการทำให้แผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์สกปรกจากการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงาน พบว่าความสามารถในการดูดซับ Toluene เปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นสะอาดที่มีดูดซับ Toluene ได้ค่อนข้างต่ำ อาจเป็นไปได้ว่าสิ่งสกปรกที่ผิวหน้าของพอลิไวนิลคลอไรด์สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับ Toluene เพิ่มขึ้นทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงกรด-เบส ซึ่งสังเกตได้จากสัมประสิทธิ์การคายกลับสู่บรรยากาศ หรือ λ_g มีค่าลดลงกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับค่าของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์สะอาด

5.2 การทำให้พื้นผิววัสดุสกปรกจากการสัมผัสอากาศในห้องลักษณะแตกต่างกัน

จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 ซึ่งให้เห็นว่าการสะสมสิ่งสกปรกในอากาศน่าจะมีผลต่อพื้นผิววัสดุในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยทดสอบให้แผ่นพอลิเมอร์สัมผัสกับอากาศในห้องลักษณะอื่นๆ ได้แก่ ห้องครัว และร้านเสริมสวย จากนั้นจึงนำมาทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ซึ่งในการทดลองนี้ทดสอบเฉพาะ Toluene รูปที่ 33 และ 34 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า K_{part} ของ Toluene ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศมาก่อน ได้แก่ ห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย เทียบกับแผ่นวัสดุสะอาด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของการทดสอบ คือ 50% โดยในกราฟทั้งสองได้แสดงอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องประกอบการวิเคราะห์ด้วย



รูปที่ 33 การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของ Toluene ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุโพลิโพรพิลีนที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย (• คืออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้อง)



รูปที่ 34 การเปลี่ยนแปลง K_{part} ของ Toluene ที่ดูดซับที่แผ่นวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย (• คืออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้อง)

สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับของ Toluene ได้ค่อนข้างชัดเจนโดยเฉพาะแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานซึ่งค่า K_{part} ของแผ่นพอลิโพรพิลีนลดลง 64% และ K_{part} ของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์เพิ่มขึ้น $6 \times 10^3\%$ เมื่อเทียบกับค่าของแผ่นพอลิเมอร์ที่สะอาด ความสกปรกบนผิวหน้าวัสดุอาจมาจากสิ่งเจือปนในอากาศภายในห้องสำนักงานมาจากทั้ง เฟอร์นิเจอร์ น้ำหอม/ก้อนหอมปรับอากาศ เครื่องสำอางส่วนบุคคล สารเคลือบเงา กาว เครื่องถ่ายเอกสาร พรมปูพื้น ผ้า màn หมึกพิมพ์ สีทาอาคาร เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์กึ่งระเหย เช่น Ethyl pyridine, Trimethylamine, Dibutyl, Nicotine, Pyrene เป็นต้น (Godish, 1989) เมื่อผิวหน้าแผ่นพอลิเมอร์มีสิ่งสกปรกเกาะติดอยู่ จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับพอลิเมอร์ กลายเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับชั้นสิ่งสกปรกแทน นอกจากนี้สิ่งสกปรกที่ปกคลุมผิวหน้าของแผ่นพอลิโพรพิลีนอาจขวางกั้นโมเลกุลของ Toluene ไม่ให้เคลื่อนที่แทรกซึมเข้าเนื้อพอลิเมอร์ได้สะดวก

และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของ K_{part} ของทั้ง 3 ห้อง พบว่าแผ่นที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัวและร้านเสริมสวยมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าของห้องทำงาน เมื่อวัดอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศทั้ง 3 ห้องพบว่า ห้องทำงานเป็นห้องลักษณะปิดมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศค่อนข้างต่ำ 0.7 ต่อ ชม. เมื่อเทียบกับห้องครัวที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 8 ต่อ ชม. และร้านเสริมสวย 12 ต่อ ชม. อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่ำมีผลทำให้เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ในอากาศภายในห้องได้มาก จึงมีโอกาสสูดดมที่ผิวหน้าของแผ่นวัสดุได้มากกว่าในกรณีของห้องครัวและร้านเสริมสวย

6. ผลของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องพักต่อการดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องมาก่อน

ตาราง 14 แสดงค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์ คือ PERC และ Nicotine ของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่สัมผัสกับอากาศในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ คือ 0.7, 2 และ 10 ต่อ ชม. การทดลองการดูดซับควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 50% ส่วนตาราง 15 แสดงชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยและอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนในห้องพัก โดยค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์แสดงในรูปเทียบเท่าความเข้มข้นของ Hexadecane

ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน

	ชุดการทดลอง	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	λ_g (ต่อ ชม.)	λ_d (ต่อ ชม.)	k_1 (ต่อ ชม.)	k_2 (ต่อ ชม.)	GF	K_{part}	$K_{part,surface}$
PP-PERC	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 0.7 ต่อ ชม. (ห้องพัก RH 45.4%, Temp 31.1°C)	25.2±0.2	7.57	0.08	0.47	17×10^{-3}	0.22	2793	98
	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 2 ต่อ ชม. (ห้องพัก RH 64.0%, Temp 29.7°C)	25.2±0.2	1.35	0.51	0.22	6×10^{-3}	0.11	98	2.6
	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 10 ต่อ ชม. (ห้องพัก RH 45.5%, Temp 32.0°C)	25.3±0.2	4.73	6.07	1.08	787×10^{-3}	0.24	1.8	0.8
	แผ่นสะอาด		1.10	0.26	0.23	6×10^{-3}	0.17	167	4.3
PP-Nicotine	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 0.7 ต่อ ชม. (ห้องพัก RH 44.0%, Temp 31.8°C)	25.2±0.4	17.9	0.21	1.28	69×10^{-3}	0.17	1698	82
	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 2 ต่อ ชม. (ห้องพัก RH 64.4%, Temp 29.0°C)	25.1±0.3	17.3	0.22	0.68	52×10^{-3}	0.16	1107	79
	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 10 ต่อ ชม. (ห้องพัก RH 46.0%, Temp 31.8°C)	25.2±0.1	22.9	0.10	1.15	80×10^{-3}	0.10	3508	227
	แผ่นสะอาด		16.4	0.15	1.13	7.9×10^{-3}	0.35	16245	113

ตาราง 15 สารอินทรีย์ระเหยและอนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน

ชุดการทดลอง	มลพิษอากาศ		
	VOC	ความเข้มข้น* (มก.ก./ลบ.ม.)	PM _{2.5} (มก.ก./ลบ.ม.)
อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 0.7 ต่อ ชม.	Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one, 1,7,7-trimethyl-, (1S)-	3.74	28.5
	Toluene	3.44	
	Cyclopentasiloxane, decamethyl-	1.72	
	Benzene	0.96	
	Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethyl)-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-(./-./-)-	0.92	
	Hexane	0.80	
	Tricosane	0.75	
	Docosane	0.75	
	Benzene, 1,3-dimethyl-	0.65	
	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	0.61	
	TVOC	40.54	
อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 2 ต่อ ชม.	Hexane	22.91	23.6
	Toluene	5.84	
	Cyclopentasiloxane, decamethyl-	3.91	
	Benzene, 1,3-dichloro-	3.46	
	Heptacosane	3.12	
	Hexacosane	3.04	
	Octacosane	2.76	
	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester	2.73	
	n-Hexadecanoic acid	2.32	
	Pentacosane	2.23	
	TVOC	185.79	
อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 10 ต่อ ชม.	Toluene	3.44	43.6
	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	3.36	
	Cyclopentasiloxane, decamethyl-	2.02	
	Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one, 1,7,7-trimethyl-, (1S)-	1.61	
	Benzene	0.94	
	Hexadecanoic acid	0.92	

Hexane	0.84
2-Ethylhexyl trans-4-methoxycinnamate	0.60
Benzene, 1,3-dimethyl-	0.55
Eucalyptol	0.52
TVOC	42.14

* แสดงในรูปเทียบเท่าความเข้มข้นของ Hexadecane

จากตาราง 14 การดูดซับ PERC ของแผ่นโพลิโพรพิลีนที่สัมผัสอากาศในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่ำสุด 0.7 ต่อ ชม. มีค่า K_{part} เปลี่ยนแปลงมากที่สุดโดยเพิ่มขึ้นกว่า 10 เท่าของแผ่นสะอาด และ ค่า $K_{part,surface}$ เพิ่มขึ้นประมาณ 20 เท่า ในขณะที่แผ่นที่สัมผัสอากาศในห้องพักที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 2 ต่อ ชม. มีค่า K_{part} ของการดูดซับ PERC ใกล้เคียงของแผ่นสะอาด และเมื่อเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเป็น 10 ต่อ ชม. ค่า K_{part} ลดลงกว่า 10 เท่าของแผ่นสะอาด แต่ค่า $K_{part,surface}$ ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่การระบายอากาศของห้องพักที่สูงขึ้นส่งผลให้ระดับความสกปรกที่พื้นผิววัสดุลดลง จึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารอินทรีย์ ($K_{part,surface}$) ใกล้เคียงกับแผ่นสะอาด แต่สำหรับการดูดซับ Nicotine แผ่นโพลิโพรพิลีนที่สัมผัสอากาศในห้องพักมาก่อนไม่ว่าที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเท่าใดก็ตาม มีผลให้ความสามารถในการดูดซับของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปจากแผ่นสะอาด เมื่อพิจารณาการทดลองที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างๆ พบว่า $K_{part,surface}$ มีค่าในช่วงใกล้เคียงกัน นั่นคือการดูดซับของ Nicotine ที่ผิวหน้าไม่แตกต่างกันมาก แต่การแทรกซึมเข้าเนื้อวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งแทนได้ด้วยพารามิเตอร์ คือ $K_{part,embedded} = \frac{K_{part}}{K_{part,surface}}$ มีค่าแตกต่างกัน โดยแผ่นที่สัมผัสอากาศมาก่อนมีค่า $K_{part,embedded}$ น้อยกว่าของแผ่นสะอาดประมาณ 7 – 9 เท่า ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่า ความสกปรกที่พื้นผิววัสดุจากการสัมผัสกับอากาศในห้องมาก่อนเป็นชั้นขวางกั้นการแทรกซึมของโมเลกุล Nicotine เข้าสู่เนื้อพอลิเมอร์ และมีผลให้ความสามารถในการดูดซับโดยรวมของแผ่นวัสดุลดลง เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดมลพิษอากาศที่ปรากฏในห้องพักที่ระดับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างๆ กัน พบว่า ความเข้มข้นของ TVOC มีค่าสูงสุดที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 2 ต่อ ชม. (ตาราง 15) ทั้งนี้เพราะเป็นการทดลองชุดแรกประกอบกับการติดตั้งวัสดุในห้องพักเพื่อใช้ในการทดลอง เช่น พัดลมดูดอากาศ แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด เป็นต้น จึงอาจทำให้มีการปลดปล่อยสารอินทรีย์บางชนิดออกจากวัสดุติดตั้งเช่นกัน ในขณะที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 0.7 และ 10 ต่อ ชม. มีค่า TVOC ใกล้เคียงกัน ส่วนความเข้มข้นอนุภาคนาขนาดเล็กมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันประมาณ 20 – 40 มค.ก./ลบ.ม. โดยที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศสูงสุดพบระดับอนุภาคนาขนาดเล็กในห้องพักสูงสุดซึ่งพัดลมดูดอากาศอาจพาเอาอนุภาคนาขนาดเล็กจากด้านนอกเข้าสู่ภายในห้อง

7. ผลของการมีอยู่ของสารอินทรีย์อื่นในอากาศต่อความสามารถของวัสดุในการดูดซับ

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยผสมสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด คือ Toluene, PERC, Decane, Nicotine และ Phenol ในรูปของเหลวเพื่อใช้สร้างไอระเหยที่มีองค์ประกอบของสารดูดซับทั้ง 5 ชนิดดังกล่าว อย่างไรก็ตามพบว่า Nicotine ไม่สามารถละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารไฮโดรคาร์บอนอื่น และ Phenol ไม่สามารถนำมาผสมกับสารอื่นได้เนื่องจากมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกทดสอบเฉพาะสารอินทรีย์ผสม 3 ชนิด คือ Toluene, PERC และ Decane ซึ่งสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยใช้ของเหลวผสมปริมาณ 0.08 มล. ฉีดเข้าระบบทดลองการดูดซับเพื่อสร้างไอระเหยให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในห้องทดสอบเท่ากับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองการดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่ใช้ดังกล่าวมีค่ามากเกินไปกว่าหลอดดูดซับที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซจะรับได้ จึงเกิดการทะลุผ่าน (Breakthrough) ซึ่งปริมาณสารเคมีในรูปของเหลว 0.08 มล. เป็นปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง (Accuracy) ด้วย Microsyringe ขนาด 0.5 มล. ที่มีใช้อยู่ในขณะนี้ ดังนั้นด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือและการเก็บการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงขอปรับแผนการศึกษาสำหรับหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาผลของความสกปรกของพื้นผิววัสดุต่อสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ซึ่งแสดงในหัวข้อ 5 ดังที่กล่าวไป ตามคำแนะนำจาก Prof. Glenn Morrison – Missouri University of Science and Technology, USA เพราะวัสดุอาคารในสภาพความเป็นจริงจะถูกทำให้สกปรก (Surface soiling) เนื่องจากผิวหน้าของวัสดุมักดูดซับสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น สารอินทรีย์กึ่งระเหย หรืออนุภาคนาโนขนาดเล็กต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศภายในอาคาร ทำให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของพื้นผิววัสดุเปลี่ยนไปจากสมบัติเดิมของเนื้อวัสดุ และอาจมีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยที่ทดสอบ (หมายเหตุ ผู้วิจัยได้แจ้งเปลี่ยนแผนงานที่วางไว้ต่อผู้ให้ทุนวิจัยดังแสดงไว้ในรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 4 ช่วง 16 กรกฎาคม 2557 ถึง วันที่ 15 มกราคม 2558)

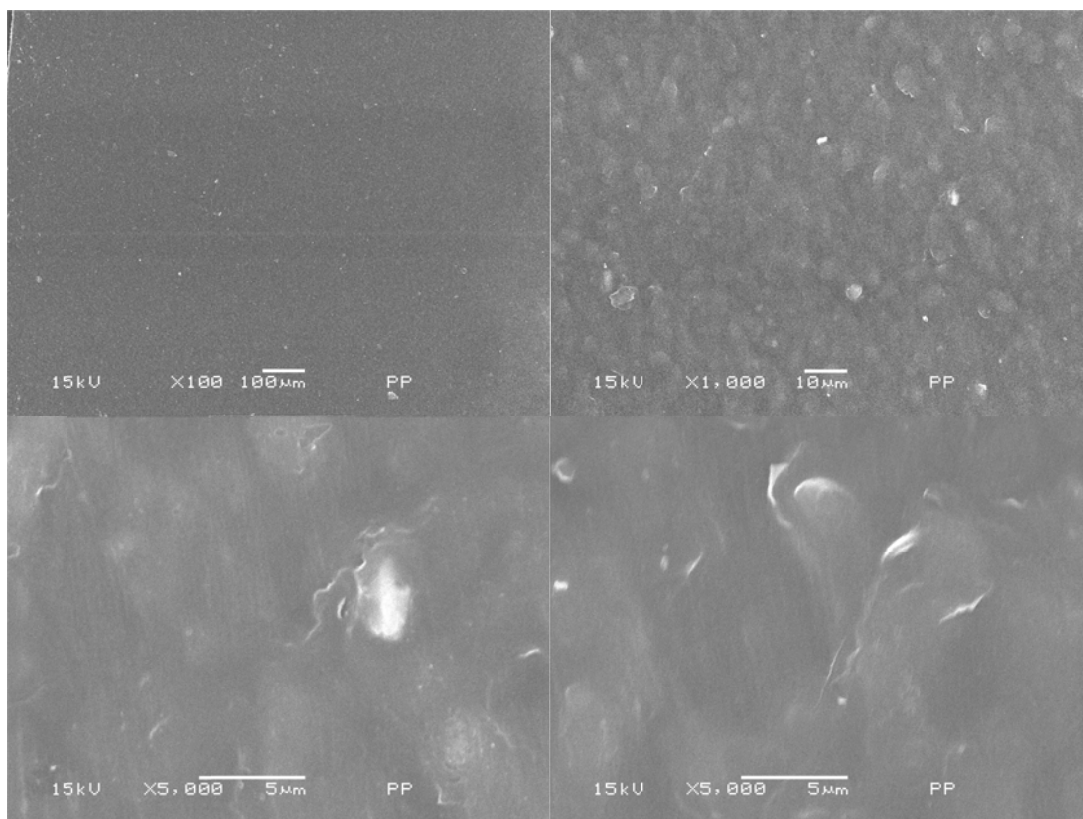
8. ผลการศึกษาพื้นผิววัสดุทดสอบ

มุมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้กับหยดของเหลว คือ น้ำกลั่น แสดงในตาราง 16 พบว่า มุมสัมผัสของหยดน้ำกับแผ่นพอลิโพรพิลีนสะอาดมีค่ามากกว่าของแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์เล็กน้อย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแผ่นพอลิโพรพิลีนมีพลังงานแบบไม่มีขั้ว (Apolar energy) สูงกว่าแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ อย่างไรก็ตามแผ่นพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความตึงผิวระหว่างชั้นสัมผัสของเหลว-ของแข็งเป็นแบบปกติ (Normal solid-liquid interface) (Weber, Jr. and Digiano, 1996)

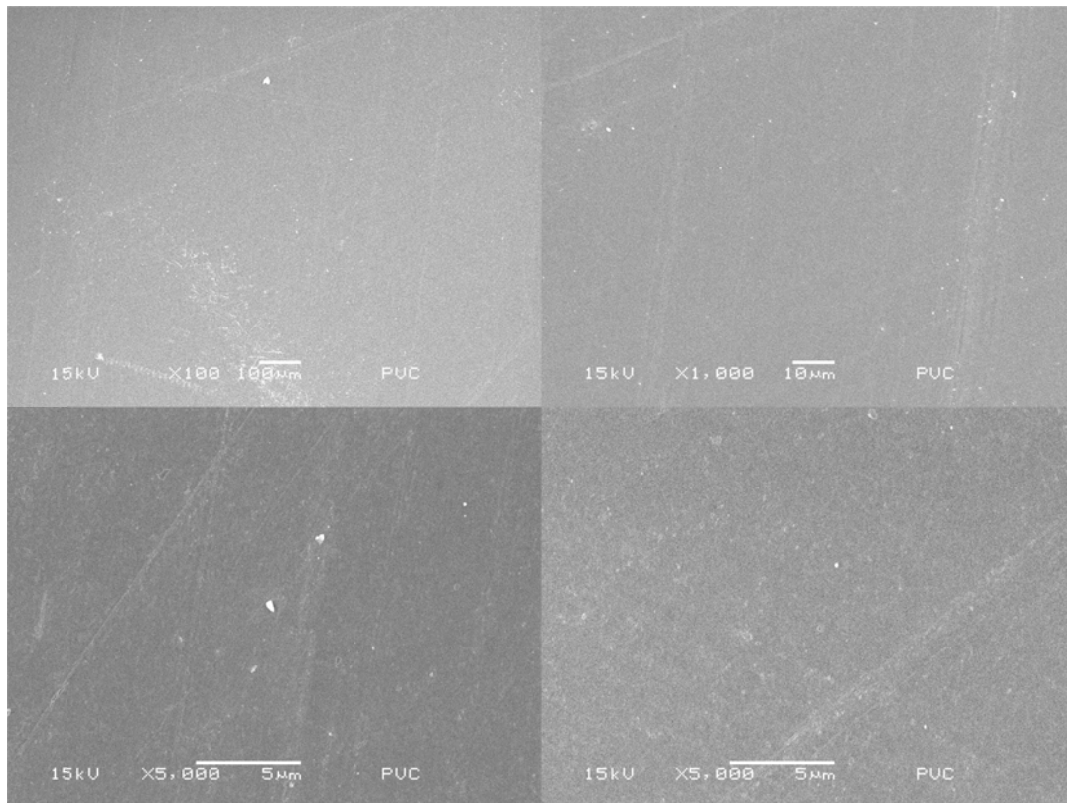
ตาราง 16 มุมสัมผัสระหว่างผิววัสดุพอลิเมอร์กับหยดน้ำ

ครั้งที่วัด	พอลิโพรพิลีน	พอลิไวนิลคลอไรด์
#1	77.8	72.4
#2	77.1	72.5
#3	73.6	72.2
#4	73.6	72.2
เฉลี่ย	75.5 ± 2.2	72.3 ± 0.15

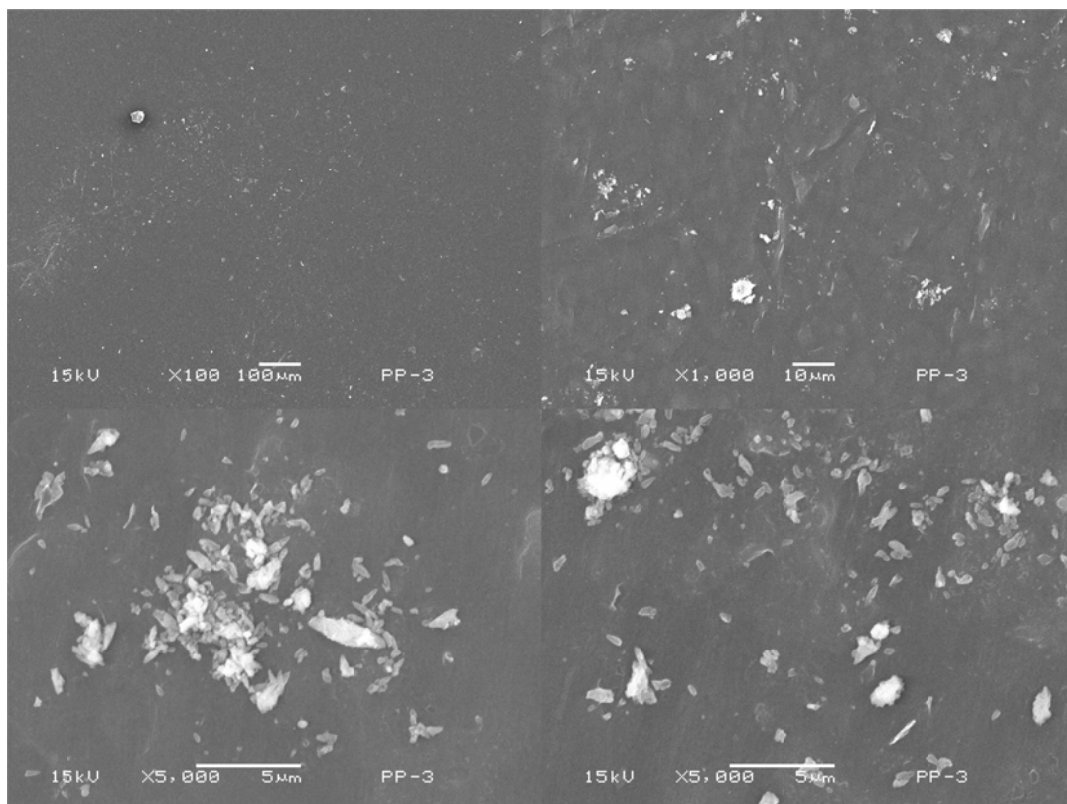
การศึกษาพื้นฐานของพื้นผิววัสดุทดสอบในสภาพต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 100 – 5000 เท่า แบ่งเป็น (1) แผ่นพอลิเมอร์สะอาด (2) แผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัว และ (3) แผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องพัก แสดงดังรูปที่ 35 – 39



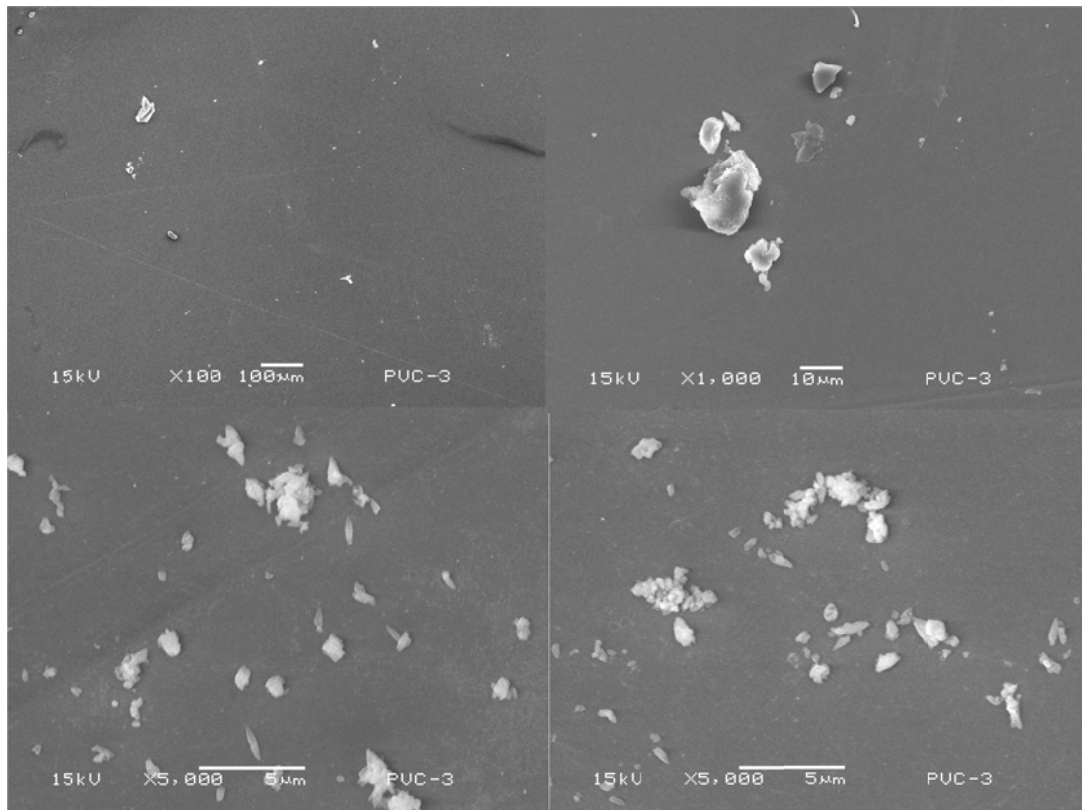
รูปที่ 35 ภาพถ่ายแผ่นพอลิโพรพิลีนสะอาดด้วยเครื่อง SEM



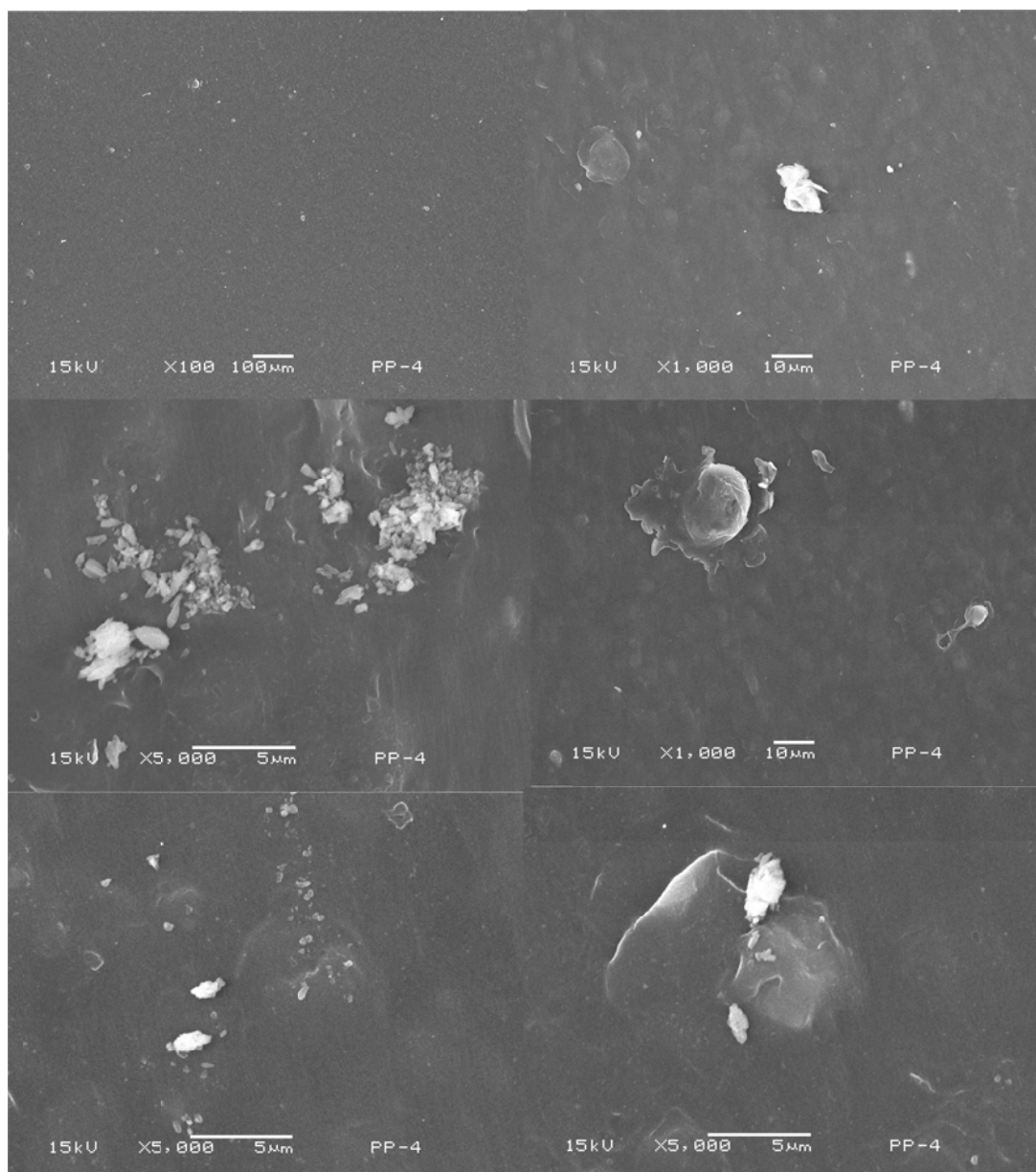
รูปที่ 36 ภาพถ่ายแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์สะอาดด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 37 ภาพถ่ายแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัว



รูปที่ 38 ภาพถ่ายแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัว ด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 39 ภาพถ่ายแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องพัก ด้วยเครื่อง SEM

รูปที่ 35 และ 36 แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของแผ่นพอลิโพรพิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ปรากฏสิ่งปนเปื้อนติดที่ผิวหน้าวัสดุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการสังเกตภาพถ่ายพบสิ่งปนเปื้อนติดที่ผิวหน้าแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์น้อยกว่าแผ่นพอลิโพรพิลีน ในขณะที่รูปที่ 37-39 แสดงถึงแผ่นพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดหลังจากสัมผัสกับอากาศในห้องครัวของบ้านครอบครัวเดียว และสัมผัสอากาศในห้องพักของพ่อพักแห่งหนึ่ง สิ่งปนเปื้อนที่พบที่ผิวหน้าแผ่นพอลิเมอร์ที่สัมผัสอากาศในห้องครัวมีลักษณะเป็นอนุภาครูปรางเหลื่อม มีทั้งกระจายกัน และเกาะกันเป็นกลุ่ม ขนาดไม่แน่นอน แตกต่างกันไป แต่โดยส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 1-2 ไมครอน โดยพบอนุภาคจำนวนมากว่าที่แผ่นพอลิโพรพิลีน สำหรับอนุภาคที่พบบนแผ่นพอลิโพรพิลีนที่สัมผัสอากาศในห้องพักมีลักษณะบางส่วน

คล้ายคลึงกับที่พบในห้องครัว และยังพบอนุภาคลักษณะทรงกลมขนาด 10 ไมครอนที่ผิววัสดุที่ถูกทำลายด้วยเช่นกัน

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซสารอินทรีย์ของวัสดุอาคารประเภทพอลิเมอร์ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความสกปรกที่พื้นผิววัสดุจากการสัมผัสอากาศ สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบ ประกอบด้วย Toluene, PERC, Decane, Nicotine และ Phenol ซึ่งมักตรวจพบภายในอาคาร วัสดุดูดซับที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบ คือ แผ่นพอลิโพรพิลีน และแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำการทดสอบด้วยห้องทดสอบขนาดเล็ก ที่ระดับความชื้น 0%, 50% และ 90% พารามิเตอร์การดูดซับทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ชุดข้อมูลความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ตรวจวัดได้จริงในอากาศเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยวิธี GA โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำนาย ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซสารอินทรีย์ทั้ง 5 สารในห้องทดสอบการดูดซับมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นเนื่องจากโมเลกุลสารอินทรีย์ในอากาศเคลื่อนที่ไปดูดซับที่แผ่นวัสดุมากกว่าอัตราการคายกลับ บางส่วนถูกพาออกนอกห้องทดสอบจากการแลกเปลี่ยนอากาศ หลังจาก 2 ชม. ผ่านไป ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ เพราะอัตราการดูดซับที่แผ่นวัสดุลดลงพร้อมกับอัตราการคายกลับจากที่แผ่นวัสดุสู่บรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เริ่มค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่ช่วงท้ายของการทดลอง งานวิจัยด้านการดูดซับมลพิษของวัสดุอาคารนิยมใช้คุณสมบัติความดันไอของสารอินทรีย์ในการทำนายพฤติกรรมดูดซับ แต่งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสารอินทรีย์บางชนิด เช่น Phenol ซึ่งมีความดันไอค่อนข้างต่ำ ไม่ได้มีพฤติกรรมดูดซับคล้ายคลึงกับ Nicotine ซึ่งสารกึ่งระเหย มีความดันไอต่ำเช่นกัน ดังนั้นคุณสมบัติอื่นของสารอินทรีย์อาจมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมดูดซับมากกว่า เช่น แรงกระทำระหว่างโมเลกุลประเภทแรงกรด-เบส ซึ่งมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อพื้นผิววัสดุและโมเลกุลสารอินทรีย์สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวนี้ได้นอกเหนือจากแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงแบบไม่เจาะจง

2. พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ สมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์จากอากาศสู่พื้นผิววัสดุ สมประสิทธิ์การคายกลับสู่อากาศ และสมประสิทธิ์การเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อในวัสดุ มีค่าจากการทำนายด้วยแบบจำลองอยู่ในช่วงเลขยกกำลังเดียวกัน ยกเว้นของ Nicotine ซึ่งมีค่าสมประสิทธิ์การเคลื่อนที่จากอากาศสู่ผิวหน้าวัสดุสูงกว่าของสารอินทรีย์อื่นประมาณ 10 เท่า ส่วนสมประสิทธิ์การเคลื่อนที่กลับจากเนื้อวัสดุสู่ผิวหน้าวัสดุมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าพารามิเตอร์ทั้งสาม โดยอยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-1} ต่อ ชม. สะท้อนให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ในเนื้อพอลิเมอร์กลับสู่พื้นผิวหน้าเป็นไปได้ค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในส่วนอื่นของระบบ พอลิเมอร์ เช่น พอลิโพรพิลีน อาจจัดเป็นแหล่งรองรับโมเลกุลสารอินทรีย์แบบย้อนกลับไม่ได้เช่นกรณีของการดูดซับ Toluene

3. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีผลต่อพฤติกรรมดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นพอลิเมอร์ ทั้งในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิวเดิมเพราะพื้นผิววัสดุเดิมถูกดูดติดด้วยโมเลกุลของน้ำแทนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดังกล่าว เช่น การทำให้พื้นผิวเดิมที่มีเฉพาะแรงกระทำแวนเดอร์วาลส์มีแรงกระทำกรด-เบสปรากฏขึ้นเนื่องจากฟิล์มของน้ำ หรือ การเปลี่ยนพื้นผิวใหม่ให้มีแรงกระทำแวนเดอร์วาลส์ลดลงจากพื้นผิวเดิม เป็นต้น และโมเลกุลของน้ำหรือชั้นฟิล์มของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุอาจกลายเป็นสิ่ง

กีดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลสารอินทรีย์บางประเภทที่แทรกเข้าเนื้อพอลิเมอร์ได้ดี เช่น Toluene เข้าสู่เนื้อพอลิโพรพิลีน และ PERC เข้าสู่เนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับของวัสดุลดลงอย่างมาก

4. ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นพอลิโพรพิลีน และแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลแบบไม่เจาะจง (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% เป็นเครื่องยืนยันถึงความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของวัสดุประเภทไม่มีขั้วขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวแบบไม่เจาะจงเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูง 90% ซึ่งเป็นไปได้ว่าโมเลกุลน้ำดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นการยึดเหนี่ยวของการดูดซับจึงเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับโมเลกุลของน้ำหรือชั้นฟิล์มของน้ำที่ปกคลุมพื้นผิว ซึ่งยังแสดงให้เห็นว่าการดูดซับขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวแบบไม่เจาะจงเป็นสำคัญเช่นกัน แต่ความสัมพันธ์เชิงเส้นกลับน้อยลงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% โมเลกุลของน้ำดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุอาจมีลักษณะเป็นจุดๆ ไม่ต่อเนื่องกันทั่วทั้งพื้นผิว จึงทำให้พลังงานการดูดซับไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้า

5. คล้ายคลึงกับอิทธิพลความชื้นสัมพัทธ์ ความสกปรกของพื้นผิววัสดุจากการสัมผัสกับอากาศในห้องลักษณะต่างๆ สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมดูดซับสารอินทรีย์ของวัสดุได้ ทั้งการสร้างหรือลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของผิวหน้าวัสดุ และสิ่งสกปรกที่ผิวหน้าอาจขัดขวางการแทรกซึมของสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อในวัสดุได้เช่นกัน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อระดับหรือลักษณะความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุส่วนหนึ่งนั้นขึ้นกับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องที่แผ่นวัสดุสัมผัสกับอากาศ แต่ทั้งนี้ผลของความสกปรกต่อพฤติกรรมดูดซับสารอินทรีย์แต่ละชนิดไม่เหมือนกัน การศึกษาพื้นฐานของพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM แสดงให้เห็นถึงสิ่งปนเปื้อนคล้ายอนุภาคขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอนติดที่พื้นผิวแผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านการสัมผัสอากาศในห้องครัวหรือห้องพักมาก่อน เทียบกับแผ่นพอลิเมอร์สะอาดที่ปรากฏสิ่งปนเปื้อนที่ผิวหน้าเพียงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตมีดังนี้

1. ควรขยายขอบเขตการศึกษาโดยเพิ่มชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวแทนสารมลพิษในการทดลองการดูดซับ เพื่อให้ครอบคลุมประเภทของสารอินทรีย์และสมบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลให้กว้างขึ้น ยกตัวอย่างเช่น สารในกลุ่ม Aldehydes ที่มีค่าประสิทธิภาพพันธะไฮโดรเจนความเป็นเบสสูง แต่มีแรงกระทำแวนเดอร์วาลส์ต่ำกว่าสารในกลุ่ม Amines และเป็นสารมลพิษที่มักตรวจพบในอาคารบ่อยครั้ง เช่น Formaldehyde และ Acetaldehyde หรือสารในกลุ่ม Alcohols ที่มีค่าประสิทธิภาพพันธะไฮโดรเจนความเป็นกรดและเบสสูงใกล้เคียงกัน หรือสารในกลุ่มที่มีแรงกระทำแวนเดอร์วาลส์สูง เช่น Naphthalene เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับสมบัติของสารอินทรีย์ดูดซับให้มีระดับความคลาดเคลื่อนที่ลดลงด้วยมีจำนวนสารที่ทดสอบมากขึ้น มีสมบัติของแรงกระทำกว้างมากขึ้น

2. ควรขยายขอบเขตการศึกษาโดยเพิ่มชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวแทนวัสดุดูดซับในอาคาร ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์ในการทดลองเนื่องจากมีความซับซ้อนเชิงกายภาพและเคมีน้อยกว่าวัสดุอาคารอื่น สำหรับงานวิจัยต่อไปควรศึกษาวัสดุที่มีสัดส่วนการใช้ภายในอาคารมาก เช่น คอนกรีต สี

ทาอาคาร ไม่สำเร็จรูป ผ่า เป็นต้น นอกจากนี้ควรขยายการศึกษาถึงลักษณะความสกปรกที่พื้นผิววัสดุให้หลากหลายขึ้น ทั้งโดยความสกปรกของพื้นผิวที่ได้รับจากการสัมผัสกับอากาศที่ปนเปื้อนมลพิษต่างๆ เช่น สิ่งแวดล้อมควันบุหรี่ มลพิษจากการจราจรในเมือง รวมทั้งวัสดุอาคารที่พื้นผิวมีการตกแต่งดัดแปลงเพื่อจุดประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกันในแต่ละสถานที่

3. ควรมีการศึกษาลักษณะพื้นผิววัสดุทั้งเชิงกายภาพและเคมีเพิ่มขึ้น รวมถึงการศึกษาลักษณะการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และวัสดุ เช่น การวิเคราะห์ด้วยวิธี Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) หรือการวัดมุมสัมผัสของพื้นผิววัสดุกับหยดของเหลว นอกเหนือจากนี้สำหรับหาค่าแรงกระทำแวนเดอร์วาลส์และแรงกระทำกรด-เบสของวัสดุตามสภาพจริงซึ่งมักแตกต่างจากค่าทางทฤษฎี ทั้งนี้เพื่อช่วยจำแนกและหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์และลักษณะของวัสดุดูดซับหรือลักษณะความสกปรกที่พื้นผิว ซึ่งจะช่วยให้การทำนายปรากฏการณ์การดูดซับสารมลพิษอากาศในอาคารสะดวกขึ้น

4. เนื่องจากการเก็บตัวอย่างก๊าซและการวิเคราะห์สารอินทรีย์ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ระยะเวลาในการชักตัวอย่างที่ต้องนานพอที่จะเก็บสารในปริมาณที่มากกว่าปริมาณขั้นต่ำที่เครื่อง GC/MS จะประมวลผลได้ จึงต้องลดจำนวนการชักตัวอย่างลงเพื่อให้เหมาะสมกับเวลาในการทดลองแต่ละชุดทดลอง ดังนั้นงานวิจัยต่อไปควรศึกษาการเก็บตัวอย่างที่ใช้เวลาไม่นานและได้ปริมาณสารขั้นต่ำเพียงพอกับการวิเคราะห์เพื่อลดเวลาในการทดลองลง เช่น วิธี Solid-phase microextraction (SPME) เป็นต้น

5. การนำงานวิจัยพื้นฐานนี้ไปประยุกต์เพื่อสร้างนวัตกรรมด้านการควบคุมมลพิษอากาศในอาคารนั้น ควรมีการศึกษา เช่น วัสดุอาคารหรือวัสดุเคลือบพื้นผิวที่มีความสามารถในการดูดซับมลพิษอากาศได้สูงแต่มีการคายกลับต่ำซึ่งมีลักษณะเป็นแหล่งรองรับมลพิษแบบย้อนกลับไม่ได้ ซึ่งในปัจจุบันมีเพียงการใช้สารเคลือบ เช่น Titanium dioxide บนพื้นผิวในการเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photo catalysis) เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลก๊าซมลพิษอินทรีย์ให้กลายเป็นสารที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีความเป็นพิษเลย

เอกสารอ้างอิง

- ชลธิชา นุ่มหอม. (2538). โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. พรศิริการพิมพ์: กรุงเทพฯ.
- มณีรัตน์ องค์วรรณดี. (2551). การขับสารมลพิษควันทับที่บนวัสดุภายในอาคาร. *วารสารสิ่งแวดล้อม* ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 (มกราคม – มีนาคม), 55 – 60.
- Abraham, M.H., Andonian-Haftvan, J., Whiting, G.S., Leo, A., Taft, R.S. (1994). 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. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transaction*, 2, 1777-1790.
- Berglund, B., Berglund, U., Lindvall, T. (1986). Assessment of discomfort and irritation from the indoor air. *Proc IAQ-86*, Atlanta, ASHRAE, 138-149.
- Bloch, D.R. (1999). Physical constants of the most common solvents for polymers. In: *Polymer Handbook*, 4th ed. Brandrup, J., Immergut, E.H., Grulke, E.A. Eds. John Wiley and Sons: New York.
- ECA. (1991). Guideline for the characterization of volatile organic compounds emitted from indoor materials and products using small test chamber. Indoor air quality & Its impact on man, Report 8. European Concerted Action.
- Evans, G., Jacobs, S.V. (1981). Air pollution and human behavior. *Journal of Social Issues*, 57, 95-125.
- Finlayson-Pitts, B.J., Wingen, L.M., Sumner, A.L., Syomin, D., Ramazan, K.A. (2003). The heterogeneous hydrolysis of NO₂ in laboratory systems and in outdoor and indoor atmospheres: An integrated mechanism. *Physical chemistry chemical physics*, 5, 223-242.
- Godish, T. (1989). Indoor air pollution control. Lewis: Michigan.
- Goss, K.-U. (1997a). Conceptual model for the adsorption of organic compounds from the gas phase to liquid and solid surfaces. *Environmental Science and Technology*, 31, 3600-3605.
- Goss, K.-U. (1997b). Considerations about the adsorption of organic molecules from the gas phase to surfaces: Implications for inverse gas chromatography and the prediction of adsorption coefficients. *Journal of Colloid and Interface Science*, 190, 241-249.
- Goss, K.-U., Schwarzenbach, R. P. (2001). Linear Free Energy Relationships Used to Evaluate Equilibrium Partitioning of Organic Compounds. *Environmental Science and Technology*, 35, 1-9.

- Hedge, A. (1989). Work-related illness in offices: A proposed model of the "Sick Building Syndrome". *Environmental International*, 15, 143-158.
- Jenkins, P.L., Phillips, T.J., Mulberg, E.J., Hui, S.P. (1992). Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. *Atmospheric Environment*, 26A, 2141-2148.
- Layton, D.W. (1993). Metabolically consistent breathing rates for use in dose assessments. *Health Physics*, 64, 23-36.
- NIOSH. (1994). NIOSH Manual of Analytical Methods 2546 (Phenol). The National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- NIOSH. (1998). NIOSH Manual of Analytical Methods 2551 (Nicotine). The National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- NIOSH. (2003). NIOSH Manual of Analytical Methods 1501 (Aromatic Hydrocarbons). The National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- Ongwandee, M., Bettinger, S.S., Morrison, G.C. (2005). The influence of ammonia and carbon dioxide on the adsorption of basic organic pollutants. *Indoor Air*, 15, 408-419.
- Ongwandee, M., Morrison, G.C. (2008). The influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to latex-painted gypsum board and carpet. *Environmental Science and Technology*, 42, 5415-5420.
- Ongwandee, M., Sawanyapanich, P. (2012). Influence of relative humidity and gaseous ammonia on the nicotine sorption to indoor materials. *Indoor Air*, 22, 54-63.
- Pennell, K.D., Rhue, R.D., Rao, P.S.C., Johnston, C.T. (1992). Vapor-phase sorption of p-xylene and water on soils and clay minerals. *Environmental Science and Technology*, 26, 756-763.
- Roth, C. M., Goss, K.-U., Schwarzenbach, R.P. (2002). Adsorption of a diverse set of organic vapors on the bulk water surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 252, 21-30.
- Singer B.C., Hodgson A.T., Destailats H., Hotchi T., Revzan K.I., Sextro R.G., 2005. Indoor sorption of surrogates for sarin and related nerve agents. *Environmental Science and Technology*, 39, 3203-3214.
- Ten Brinke, J., Selvin, S., Hodgson, A.T., Fisk, W.J., Mendell, M.J., Koshland, C.P., Daisey, J.M. (1998). Development of new volatile organic compound (VOC) exposure metrics and their relationship to "Sick Building Syndrome" Symptoms. *Indoor Air*, 8, 140-152.
- US EPA. (1997). *Risk assessment and risk management in regulatory decision-making*. Final report. U.S. Environmental Protection Agency.

- US EPA. (2004). Revised Assessment of Detection and Quantitation Approaches. U.S. Environmental Protection Agency, Engineering and Analysis Division Office of Science and Technology Office of Water (4303T), Washington DC. EPA-821-B-04-005.
- Wallace, L.A., Pellizzari, E.D., Hartwell, T.D., Sparacino, C., Whitmore, R., Sheldon, L., Zelon, H., Perritt, R. (1987). The TEAM study: personal exposure to toxic substances in air, drinking water, and breath of 400 residents of New Jersey, North Carolina, and North Dakota. *Environmental Research*, 43, 290-307.
- Weber, W.J., Jr., DiGiano, F.A. (1996). Process Dynamics in Environmental Systems. John Wiley & Sons: New York.
- Yu, C. and Crump, D. (1998) A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in Buildings. *Building and Environment*, 33, 357–74.

ผลที่ได้จากโครงการวิจัย

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ ประกอบด้วย
 - ทับทิม ชาดิสุวรรณ, มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี, ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์. (2558). ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุภายในอาคารต่อการดูดซับก๊าซอินทรีย์. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา), ปีที่ 15 ฉบับที่ 4 (ตุลาคม-ธันวาคม 2558). (ตอบรับตีพิมพ์)
 - ทับทิม ชาดิสุวรรณ, มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี. (2558). ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อความจุการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 3-6 กุมภาพันธ์ 2558, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน.
 - Chatsuvan, T., Ongwandee, M. (2014). Effects of relative humidity and surface soiling on the sorption of organic pollutants to polymeric material. *Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2014*, July 7-12, 2014, Hong Kong, China.
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ ประกอบด้วยประโยชน์เชิงวิชาการ

การผลิตนิตยสารระดับปริญญาโทฉบับที่ 1 สาขาวิศวกรรมโยธา (เอกวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม คือ นางสาวทับทิม ชาดิสุวรรณ สำเร็จการศึกษาประจำปีการศึกษา 2557 ด้วยหัวข้อวิทยานิพนธ์ “การประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของวัสดุพอลิเมอร์” ในระดับผลการสอบ ดีเยี่ยม (Excellent)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

โค้ดสำหรับพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB

โปรแกรม #1

```
%% Pap Model
```

```
% clear screen, close all pics, and clear all data
```

```
clc,close all,clear all;
```

```
% pap's data RH 0 date 19 July 2013
```

```
% use new data for polypropylene
```

```
% surface_sink with varying 'n' 3 ODE equation
```

```
% each step of lambdaa, lambdad, k1 and k2 is increased
```

```
% so that the speed of calculation should be faster than
```

```
% previous one.
```

```
data=[0.00      3199.6;
```

```
0.25      167.96;
```

```
0.42      83.03;
```

```
0.58      67.26;
```

```
0.83      53.11;
```

```
1.17      35.89;
```

```
1.67      30.58;
```

```
2.50      26.19;
```

```
3.67      17.28;
```

```
5.33      13.43;
```

```
7.83      8.20;
```

```
11.33     4.98;
```

```
15.83     4.54];
```

```
% use Runge-Kutta 4th order to fit the model
```

```
h=0.01; tspan=[0 16]; c0=[3199.6 0 0]; old=inf; w=cputime;
```

```
rec=[]; temp=[]; lec=[]; i=1; %n=1;
```

```
for lambdaa=0.4:0.05:0.9
```

```
    for lambdad=0.2:0.05:0.45
```

```
        for k1=0.1:0.01:0.25
```

```
            for k2=0.1:0.01:0.2
```

```

        %if k1>k2
            [t c]=rk4sys(@f01_2012,tspan,c0,h,lambdaa,lambdad,k1,k2);
            [er,cal,Bias,Var,RMSPE]=ess_RH_0rev01(data,c);
            rec(i,1)=lambdaa;rec(i,2)=lambdad;rec(i,3)=k1;
            rec(i,4)=k2;rec(i,5)=er;rec(i,6)=Bias;rec(i,7)=Var;
            rec(i,8)=RMSPE;lec(i,:)=cal;
            i=i+1;
        %end
    end
end
end
end

dif=cputime-w;
% This line will plot "the observed data" against "calculated data"
% from best fit value
plot(data(:,1),data(:,2),'r');hold on;
[mm nn]=min(rec);
lambdaa=rec(nn(5),1);lambdad=rec(nn(5),2);k1=rec(nn(5),3);k2=rec(nn(5),4);min_err=rec(nn(5),5)
;
[t c]=rk4sys(@f01_2012,tspan,c0,h,lambdaa,lambdad,k1,k2);

dif=cputime-w;

plot(t,c(:,1),'b');axis([ 0 16 0 3400]);
csvwrite('RH-0rev01.dat',rec);
csvwrite('vRH-0rev01.dat',lec);

```


โปรแกรม #2

```
%%  
clear all,close all,clc;  
ObjectiveFunction = @RH0_fitness;  
nvars = 4;    % Number of variables  
LB = [0.1 0.01 0.01 0.001]; % Lower bound LB=[lambdaa lambdad k1 k2]  
UB = [10 10 5 0.1]; % Upper bound UB=[lambdaa lambdad k1 k2]  
  
%LB = [0 0 0 0]; % Lower bound LB=[lambdaa lambdad k1 k2]  
%UB = [inf inf inf inf]; % Upper bound UB=[lambdaa lambdad k1 k2]  
  
options = gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf,@gaplotmaxconstr},'Display','iter');  
options = gaoptimset('PopulationSize',100);  
[x,fval] = ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],[],LB,UB,[],options)
```

โปรแกรม #3

%% Pap Model

% clear screen, close all pics, and clear all data

clc,close all,clear all;

% pap's data Office date 19 July 2013

% use new data for polypropylene

% surface_sink with varying 'n' 3 ODE equation

% each step of lambdaa, lambda_d, k1 and k2 is increased

% so that the speed of calculation should be faster than

% previous one.

%RH-0

data=[0.00 3199.6;

0.25 167.96;

0.42 83.03;

0.58 67.26;

0.83 53.11;

1.17 35.89;

1.67 30.58;

2.50 26.19;

3.67 17.28;

5.33 13.43;

7.83 8.20;

11.33 4.98;

15.83 4.54];

result=[11.8317 0.2893 0.3585 0.0313];

[n m]=size(result);

fprintf('GF\t\t\t\t Bias\t\t Var\t\t RMSPE \n');

for i=1:n

h=0.01; tspan=[0 16]; c0=[3199.6 0 0]; rec=[];

```

    lambdaa=result(i,1);lambdad=result(i,2);
    k1=result(i,3);k2=result(i,4);
    [t c]=rk4sys(@f01_2012,tspan,c0,h,lambdaa,lambdad,k1,k2);
    [er,cal,Bias,Var,RMSPE]=ess_RH_0rev01(data,c);
    fprintf('%2.10f\t, %4.4f\t, %4.4f\t, %4.4f\n',er,Bias,Var,RMSPE);
end
dec(i,:)=cal;
fprintf('Calculated C Value\n');
for i=1:n
    fprintf('%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f,%4.2f\n'...

,dec(i,1),dec(i,2),dec(i,3),dec(i,4),dec(i,5),dec(i,6),dec(i,7),dec(i,8),dec(i,9),dec(i,10),dec(i,11),dec(i
,12),dec(i,13));
end

```

ภาคผนวก ข.
บทความวิจัย

ทับทิม ชาติสุวรรณ, มณีรัตน์ องค์กรวรรณี, ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์. (2558). ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุภายในอาคารต่อการดูดซับก๊าซอินทรีย์. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา), ปีที่ 15 ฉบับที่ 4 (ตุลาคม-ธันวาคม 2558). (ตอบรับตีพิมพ์)

	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002
ที่ ศธ 0514.10/๑3๐๘	
14 กรกฎาคม 2558	
เรื่อง ตอบรับการส่งบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ใน วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) เรียน นางสาวทับทิม ชาติสุวรรณ ตามที่ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง “ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุภายในอาคารต่อการดูดซับก๊าซอินทรีย์ (Effects of Relative Humidity and Indoor Surface Soiling on Sorption of Gaseous Organic Compounds)” เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) นั้น บัณฑิตวิทยาลัยได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการโดยกองบรรณาธิการและผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว และกองบรรณาธิการยินดีที่จะตีพิมพ์บทความของท่านลงในวารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) ปีที่ 15 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2558 จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ ขอแสดงความนับถือ  (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ตัดตะวะศาสตร์) บรรณาธิการ วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)	
โทร. 0-4320-2420 ต่อ 42421 โทรสาร 0-4320-2421 เจ้าของเรื่อง/พยานิกัด พระชัย http://journal.gs.kku.ac.th/	

ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุภายในอาคารต่อการดูดซับก๊าซอินทรีย์

Effects of Relative Humidity and Indoor Surface Soiling on Sorption of Gaseous Organic Compounds

ทับทิม ชาตสุวรรณ (Thabtim Chatsuvan)* มณีรัตน์ องค์กรวรรณี (Maneerat Ongwandee)^{1**}

ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ (Songchai Wiriyaumpaiwong) ^{***}

บทคัดย่อ

กลไกการดูดซับและการคายก๊าซมลพิษอินทรีย์ที่วัสดุอาคารมีผลต่อรูปแบบการได้รับสัมผัสมลพิษของผู้อาศัยในอาคาร ในงานวิจัยนี้ ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์และความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุอาคารต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ได้แก่ Toluene, Tetrachloroethylene, Decane, Nicotine และ Phenol วัสดุในอาคารที่ทดสอบ คือ แผ่นพอลิโพรพิลีน ทำการทดลองการดูดซับในห้อง ขนาด 25 ลิตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับทำนายจากแบบจำลอง สมดุลมวลที่รวมกลไกการดูดซับที่ผิวหน้าและในเนื้อวัสดุด้วยวิธีเงินเนติกอัลกอริทึม ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของ สารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุที่อยู่ในอากาศ มีค่าอยู่ในช่วง 10^0 - 10^4 เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 50% และ 90% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของ Toluene และ Decane ลดลง ในขณะที่ค่าของนิโคตินเพิ่มขึ้นที่ความชื้น 90% นอกจากนี้แผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานที่ปิด ทึบมาก่อนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโทลูอินลดลง 64% เมื่อเทียบกับการดูดซับของแผ่นวัสดุสะอาด

ABSTRACT

Sorption and desorption of gaseous organic pollutants onto indoor surfaces affect a pattern of occupant exposure to pollutants. This study aimed to measure the effects of relative humidity and surface soiling on sorptive capacity of indoor material. Target organic sorbates were toluene, tetrachloroethylene, decane, nicotine and phenol, while a studied indoor material was polypropylene. Sorption experiments were conducted using a 25-liter chamber at 0%, 50% and 90% relative humidity at 25°C. Kinetic sorption parameters were determined using a mass balance integrating sorption at surface and embedded sinks with a genetic algorithm. Results show that equilibrium partition coefficients between surface and gas phase for the tested organic compounds ranged from 10^0 to 10^4 . Increasing the humidity to 50% and 90% decreased the sorption of toluene and decane, while the sorption of nicotine at 90% relative humidity increased. Regarding surface soiling, polypropylene surface exposed to the air of an air-tight room exhibited a decrease of a partition coefficient for toluene by 64%, comparing to the cleaned surface.

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน, คุณภาพอากาศในอาคาร, พอลิเมอร์

Key Words: Partition coefficient, Indoor air quality, Polymer

¹Corresponding author: maneerat.o@msu.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรมหาบัณฑิตวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

บทนำ

สารมลพิษที่มักถูกพบภายในอาคาร เช่น Formaldehyde, Toluene, Limonene, Decane เป็นต้น [1] โดยส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดในอาคาร เช่น วัสดุตกแต่งภายใน อุปกรณ์สำนักงาน สารเคมีทำความสะอาด ของใช้ส่วนบุคคล เป็นต้น สารมลพิษที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศภายในอาคารจะสูญหายออกนอกอาคารด้วยการระบายอากาศ หรือเข้าสู่ร่างกายของผู้ที่อาศัยภายในอาคารด้วยการหายใจหรือสัมผัสผิวหนัง นอกจากนี้สารมลพิษในอากาศอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันหรือมีการเคลื่อนที่ไปติดที่วัสดุอาคารและอาจมีปฏิกิริยาพื้นผิวร่วมด้วย (Surface chemistry) [2] เมื่อสารมลพิษดูดซับที่วัสดุอาคารแล้ว (Sorption) ในขณะเดียวกันจะมีการคายโมเลกุลกลับสู่บรรยากาศภายในอาคาร (Desorption) ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปแบบการได้รับสัมผัสสารมลพิษอากาศ (Exposure) ของผู้อาศัยภายในอาคารได้ เช่น อาจมีผลให้ผู้อาศัยในอาคารได้รับความเข้มข้นมลพิษในระดับต่ำแต่เวลาในการสัมผัสยาวนานขึ้น อิทธิพลที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษประกอบด้วยปัจจัยหลายอย่าง ทั้งลักษณะกายภาพ/เคมีของสารมลพิษ คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ ระดับความชื้นในอากาศ ผิวหน้าวัสดุดูดซับที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และการมีอยู่ของก๊าซอื่นในบรรยากาศ งานวิจัยของปรมาภรณ์ [3] ได้ศึกษาความจุของการดูดซับนิโคตินบนแผ่นวัสดุภายในอาคาร ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม พรม และผ้าปูที่นอน ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90 % และมีการผสมก๊าซแอมโมเนียร่วมด้วย พบว่า ความจุของการดูดซับนิโคตินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ การเพิ่มความชื้นในอากาศจาก 0% เป็น 90% ทำให้ค่าความจุการดูดซับของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 122%, ของผ้าปูที่นอนเพิ่มขึ้น 46% และของพรมเพิ่มขึ้น 53% และเมื่อมีการใช้ก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 20 และ 40 พีพีเอ็มร่วมด้วย พบว่าความจุการดูดซับนิโคตินของพรมลดลง 15-35% ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแย่งพื้นที่ดูดติดผิวระหว่างโมเลกุลนิโคตินและแอมโมเนีย นอกจากความชื้นและอิทธิพลของก๊าซอื่นในอากาศแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมดูดซับ คือสิ่งสกปรกที่ติดบนผิวหน้าวัสดุ ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเปลี่ยนลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีไปจากเดิม และมีผลต่อเนื่องถึงกาเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดูดซับสารอินทรีย์ตามไปด้วย

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์ของวัสดุอาคาร โดยเลือกศึกษาวัสดุพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นตัวแทนวัสดุอาคาร เนื่องจาก PP มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนประกอบด้วยโมโนเมอร์โพรพิลีน เมื่อเกิดการดูดติดผิวกับโมเลกุลอื่นจึงผ่านทางแรงกระทำแวนเดอร์วาล (van der Waals interactions) เท่านั้น [4] นอกจากนี้ PP ยังนิยมใช้ทำวัสดุหลากหลายประเภทในอาคาร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่ติดอยู่ที่แผ่นวัสดุต่อสารอินทรีย์ที่อยู่ในอากาศ ณ สภาวะสมดุล (Equilibrium partitioning coefficient, K_{part})

วิธีการวิจัย

สารเคมี วัสดุทดสอบ และวิธีการเตรียม

สารดูดซับอินทรีย์ (Organic sorbates) สารที่ใช้เป็นตัวแทนสารดูดซับ (Sigma Aldrich, Singapore) ได้แก่ กลุ่ม Aromatic : Toluene (C_7H_8), Decane ($C_{10}H_{22}$) และ Phenol (C_6H_5O) กลุ่ม Amine : Nicotine ($C_{10}H_{14}N_2$) และกลุ่ม Chlorinated คือ Tetrachloroethylene หรือ PERC (C_2Cl_4) ซึ่งสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร มักถูกพบภายในอาคาร [1] วัสดุดูดซับ (Sorbent) ที่ใช้ทดสอบ คือแผ่นพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) 1.8 mil (Cole-Palmer, USA) โดยล้างทำความสะอาดแผ่นวัสดุ PP ด้วยสารละลายผสม Methanol 1% และ Ethyl acetate 1% ในน้ำกลั่น แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง จากนั้นนำแผ่นวัสดุ PP มาเป่าในห้องสะอาด (Clean room) ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สำหรับการเตรียมแผ่น PP สกปรกคือ นำแผ่น PP สะอาดไปตั้งทิ้งไว้ในห้องให้สัมผัสกับอากาศภายในห้องเป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ผิวหน้าแผ่น PP เกิดความสกปรก

ระบบทดลองและขั้นตอนการทดลอง

ภาพที่ (1) ระบบทดลองช่วงการดูดซับและการคายสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุ ทำการทดลองในห้องทดสอบขนาดความจุ 25 ลิตร ผ่นภายในห้องทดสอบทั้งหมดถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นวัสดุ PP เริ่มการทดสอบโดยดูดสารอินทรีย์บริสุทธิ์ที่ต้องการทดสอบด้วยเข็มฉีดยา (Micro-

syringe) (SGE, Australia) ปริมาตร 0.08 มล. ฉีดเข้าไปที่อุปกรณ์สร้างไอระเหยพร้อมทั้งปล่อยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ด้วยอัตราการไหล 50 มล./นาที่ เข้าในห้องทดสอบ เป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที พร้อมปิดวาล์วที่ 2 เพื่อให้เกิดการดูดซับของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุ จากนั้นจึงผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ตามกำหนดเข้าห้องทดสอบด้วยอัตราการไหล 500 มล./นาที่ ปิดวาล์วที่ 2 เริ่มเก็บตัวอย่างอากาศภายในห้องทดสอบ โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดแบบพกพาต่อกับหลอดดูดซับสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศ ดูดด้วยอัตรา 0.23 ลิตร/นาที่ เก็บตัวอย่างอากาศต่อเนื่องเป็นเวลา 18 ชม. จำนวนตัวอย่างที่เก็บ 12 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 หลอด (เก็บซ้ำ) ระบบการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

วิธีการเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์และการวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่าง Toluene, PERC และ Decane ใช้หลอดดูดซับคาร์บอน (SKC, USA) และทำการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) นำสารละลายที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) (Shimadzu, Japan) โดยใช้โหมด SIM [6] สำหรับการเก็บตัวอย่าง Nicotine ใช้หลอดดูดซับเรซิน XAD-4 และทำการสกัดด้วยสารละลาย Ethyl acetate ผสม Triethylamine 0.01% [7] ส่วนการเก็บตัวอย่าง Phenol ใช้หลอดดูดซับเรซิน XAD-7 และทำการสกัดด้วย Methanol [8] การเปรียบเทียบปริมาณสารอินทรีย์ทำได้โดยใช้สารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 5 ค่า ส่วนสารดูดซับที่บรรจุส่วนหลังของหลอดดูดซับได้นำมาสกัดและไม่พบสารอินทรีย์ที่หลุดออกแต่อย่างใด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การคำนวณหาความสัมพันธ์การดูดซับทำโดยใช้สมการสมดุลมวลของสารอินทรีย์ที่รวมกลไกการดูดซับบนผิวหน้าวัสดุและเนื้อในวัสดุ ดังแสดงภาพที่ (2) ซึ่งเรียกว่าแบบจำลอง Surface and embedded sinks [9] ในที่นี้สารอินทรีย์เคลื่อนย้ายออกจากอากาศโดยกลไกการระบายอากาศและการดูดซับที่ผิวหน้าวัสดุและในขณะเดียวกันจะคายกลับสู่บรรยากาศอีกครั้ง (สมการ 1) โมเลกุลที่ติดที่ผิวหน้าจะแทรกเข้าไปสู่อะไรในวัสดุด้วยกลไกการแพร่ (Diffusion) หรือการละลาย (Solution) และในขณะเดียวกันสามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่ผิวหน้าได้ (สมการ 2 และ 3)

$$\frac{dC}{dt} = -(\lambda + \lambda_a)C + \lambda_d \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = \lambda_a C - (\lambda_d + k_1)M + k_2 \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = -k_2 E + k_1 M \quad (3)$$

โดยที่ C คือความเข้มข้นสารมลพิษในอากาศภายในห้อง (มก.ก./ลบ.ม.), M คือมวลสารมลพิษที่ดูดซับบนผิววัสดุ (มก.ก./ลบ.ม.), E คือมวลสารมลพิษที่ดูดซับในเนื้อวัสดุ (มก.ก./ลบ.ม.), λ_a คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่แผ่นวัสดุ (ต่อชม.), λ_d คือสัมประสิทธิ์การคายที่แผ่นวัสดุ (ต่อชม.), k_1 คือสัมประสิทธิ์การดูดซับในเนื้อวัสดุ (ต่อชม.), k_2 คือสัมประสิทธิ์การคายจากเนื้อในวัสดุสู่ผิววัสดุ (ต่อชม.) และ λ คืออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบ (ต่อชม.)

ค่าพารามิเตอร์จลศาสตร์การดูดซับและการคาย λ_a , λ_d , k_1 และ k_2 ทำนายด้วยสมการ (1-3) โดยใช้ชุดข้อมูลค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศที่วัดได้ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) โดยใช้โปรแกรม MATLAB[®] โดยมีเงื่อนไขการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือค่าความเหมาะสมที่ระหว่างข้อมูลจากการทดลองและจากการทำนาย (Goodness-of-fit, GF) ต้องมีค่าต่ำที่สุด ดังสมการ 4

$$GF = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_i^*)/y_i^2}{N}} \quad (4)$$

โดยที่ y_i คือค่าที่ได้จากการทดลอง, y_i^* คือค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง, N คือจำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุต่อสารอินทรีย์ในอากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการ 5 ซึ่งค่า K_{part} แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุเมื่อเทียบกับในอากาศ

$$K_{part} = \frac{M+E}{C} = \left(\frac{k_2+k_1}{k_2} \right) \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_d} \right) \quad (5)$$

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

1. ลักษณะแนวโน้มพฤติกรรมในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยที่แผ่นวัสดุ PP

ภาพที่ (3) แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบทั้ง 5 สาร ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% พบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน โดยในช่วง 2 ชม. แรกค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ลดลงอย่างรวดเร็วจากความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 2000-5000 มก.ก./ลบ.ม. ลดลงประมาณ 30-97 % ซึ่งเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่ผิววัสดุหรือ λ_u มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์อื่นดังแสดงใน (ตารางที่ 1) หลังจาก 2 ชม. ไปแล้วความเข้มข้นกลับลดลงอย่างช้าๆ จนความเข้มข้นสุดท้ายเมื่อครบเวลาการทดลอง 16-18 ชม. มีค่าประมาณ 0.1-7 มก.ก./ลบ.ม. เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0% พบว่า ในช่วง 2 ชม. แรก ค่าความเข้มข้น Nicotine ลดลงได้เร็วกว่าสารอื่นอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจาก Nicotine เป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหย (Semi volatile) มีค่าความดันไอต่ำกว่ากับ 1.15 Pa [10] (ตารางที่ 2) จึงมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปโมเลกุลที่ดูดซับผิวมากกว่าในรูปที่เป็นก๊าซ ในขณะที่ Toluene มีค่าความดันไอสูงกว่า Nicotine เกือบ 4 เท่า จึงพบความเข้มข้นในอากาศสูงกว่าเส้นกราฟความเข้มข้นของ Toluene ในช่วงแรกจึงมีความเข้มข้นน้อยกว่าของ Nicotine

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของการดูดซับของสารอินทรีย์ λ_u , λ_d , k_1 , k_2 และค่าพารามิเตอร์ สมดุล K_{part} ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% ของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ซึ่งได้จากการทำนายด้วยสมการ (1-3) ที่ทำให้ได้ค่า GF ที่ต่ำที่สุดพบว่า ค่า GF อยู่ในช่วง 0.1-0.3 อย่างไรก็ตามการทดลองของ Toluene และ Nicotine มีค่า GF สูงกว่าสารอื่น เนื่องจากการทดลองของ Toluene มีจำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่าง (N) น้อยกว่า ส่วนการทดลอง Nicotine พบว่าเส้นกราฟความเข้มข้นในช่วง 4-10 ชม. มีลักษณะเป็นช่วงหักมุม ไม่แนบสนิทติดกับเส้นกราฟความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ λ_u , λ_d และ k_1 ของทั้ง 5 สารพบว่าอยู่ในช่วงของเลขยกกำลัง (Order of magnitude) เดียวกัน ยกเว้นค่า λ_u ของ Nicotine ที่มีค่ามากกว่าสารชนิดอื่นประมาณ 10 เท่าสำหรับค่า k_2 ของสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าพารามิเตอร์ทั้งสาม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-1} ต่อชม. เมื่อพิจารณาค่า λ_u เทียบกับค่า λ_d ของทั้ง 5 สาร พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารอินทรีย์จากอากาศมาติดบนแผ่นวัสดุ มีค่ามากกว่าที่คายตัวกลับสู่อากาศอีกครั้ง เมื่อพิจารณาค่า k_1 เทียบกับค่า k_2 พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ติดที่ผิวหน้าวัสดุเข้าสู่เนื้อในวัสดุมีค่ามากกว่าความเร็วในการเคลื่อนย้ายมวลสารกลับจากเนื้อในวัสดุสู่ผิวหน้า โดยเฉพาะ k_2 ของ Toluene มีค่าต่ำมาก นั้นหมายความว่าโมเลกุล Toluene ที่เคลื่อนที่แทรกเข้าไปสู่ในเนื้อวัสดุ หรือละลายเข้าไปในเนื้อในวัสดุ ต้องใช้เวลานานมากในการคายตัวกลับสู่บรรยากาศอีกครั้ง ซึ่งอาจถือได้ว่า PP เป็นวัสดุดูดซับที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Irreversible sink) สำหรับ Toluene อย่างไรก็ตาม แม้ระดับสารอินทรีย์ที่คายกลับมาอาจมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำก็ตาม แต่ความเป็นอันตรายต่อผู้ที่ได้รับสัมผัสยังคงมีอยู่ เนื่องจากระยะเวลาในการอาศัยในอาคารที่ยาวนานนั่นเอง งานวิจัยของ Singer [9] วัดค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์การดูดซับของสารอินทรีย์หลายประเภทในห้องทดสอบขนาดใหญ่ที่ภายในตกแต่งด้วยเฟอร์นิเจอร์ด้วยแบบจำลองเดียวกับงานวิจัยนี้ พบว่าวัสดุเฟอร์นิเจอร์ภายในห้องทดสอบสามารถดูดซับสาร DMMP, DEEP และ TEP มีค่าในช่วง 10-15 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ได้จากงานวิจัย Singer กับค่าความสามารถการดูดซับของแผ่น PP ที่ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่า แผ่น PP สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากกว่า ประมาณ 10-1000 เท่า จากการศึกษานี้ทั้ง 2 งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

2. ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ระเหยที่แผ่นวัสดุ PP

ภาพที่ (4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{part} ของสารอินทรีย์ที่แผ่น PP ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% Nicotine มีค่า K_{part} สูงกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น Nicotine เป็นสารอินทรีย์ที่ระเหยมีความดันไอต่ำกว่าสารอินทรีย์อื่น 1-3 เท่า จึงมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปของโมเลกุลดูดติดผิวมากกว่าที่จะอยู่ในรูปของก๊าซ [3] เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็น 50% มีผลทำให้ค่า K_{part} ของ Toluene, Decane และ Phenol เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีโมเลกุลของน้ำในอากาศ โดย Toluene ที่มีค่า K_{part} ลดลง 14 เท่า Decane 40 เท่า และ Phenol 4 เท่า อาจเป็นเพราะโมเลกุลของน้ำที่ติดที่ผิวหน้าวัสดุอาจกลายเป็นชั้นขวางกั้นสารอินทรีย์โดยเฉพาะ Toluene และ Decane ไม่ให้แทรกตัว (partitioning) เข้าสู่เนื้อใน PP ได้สะดวก [11] สำหรับ PERC และ Nicotine ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 50% แต่เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 90% ค่า K_{part} ของ PERC ลดลงค่อนข้างมาก ส่วน Nicotine มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้า PP กับโมเลกุลสารอินทรีย์ มีเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) เท่านั้น ดังนั้นเมื่อมีโมเลกุลของน้ำปกคลุมที่ผิวหน้า อาจมีผลทำให้เกิดแรงกระทำพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำที่ชั้นผิวหน้าวัสดุกับโมเลกุลสารอินทรีย์ได้ ซึ่ง Nicotine สามารถสร้างพันธะการดูดซับกับสารอินทรีย์ได้ผ่านทางแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงพันธะไฮโดรเจน (ตารางที่ 2) อย่างไรก็ตาม Phenol ซึ่งสามารถดูดซับกับสารอินทรีย์ผ่านแรงทั้ง 2 ชนิดเช่นเดียวกับ Nicotine แต่เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์กลับทำให้ค่า K_{part} ลดลง ซึ่งผลที่แตกต่างนี้อาจเกี่ยวข้องกับกลไกอื่นร่วมด้วยที่พื้นผิว เช่น การแพร่ การละลาย หรือการแทรกตัวของโมเลกุลสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อวัสดุ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่ผิวหน้าวัสดุและแรงการดูดติดผิวแบบไม่เจาะจง พิจารณาเฉพาะขอบเขตของระบบที่ชั้นผิววัสดุที่สัมผัสอากาศเท่านั้น ซึ่งจะมีเพียงกลไกการดูดติดผิว (Adsorption) ของโมเลกุลก๊าซสารอินทรีย์ที่ผิวหน้าแผ่นวัสดุ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (K_{part}) ของสารอินทรีย์ที่ทดสอบจึงคิดเฉพาะระหว่างที่ผิวหน้าบนวัสดุและเฟสก๊าซเท่านั้น ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า $K_{part,surface}$ สามารถหาได้จากสมการ 5

$$K_{part,surface} = \frac{\lambda_a}{\lambda_d} \quad (5)$$

การเกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำกับแผ่นวัสดุ 2 แรง คือแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงที่เกิดจากแรงกรด-เบส โดยแรงการดูดซับแบบไม่เจาะจงในที่นี้ คือแรงแวนเดอร์วาลส์ สำหรับตัวเลขเชิงปริมาณของแรงยึดเหนี่ยวชนิดนี้ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ระหว่างของเหลว Hexadecane และ อากาศ ($K_{hexadecane/air}$) (ตารางที่ 2) ในงานวิจัยนี้ไม่เลือกใช้ค่าความดันไอ (Vapor pressure) ของสารอินทรีย์เป็นตัวแทนของแรงแวนเดอร์วาลส์เช่นงานวิจัยอื่น เนื่องจากความดันไอของสารอินทรีย์ประเภทมีขั้ว (Polar compounds) ได้รวมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนไว้ด้วย แผ่น PP จัดเป็นวัสดุที่มีเฉพาะแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับผ่านทางแรงแบบไม่เจาะจงเท่านั้น มีค่าแรงแวนเดอร์วาลส์ 25.7 มิลลิจูล/ตร.ม [12] ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวแรงแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ทดสอบกับ ค่า $K_{part,surface}$ ได้ตั้งกราฟความสัมพันธ์ภาพที่ (5) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้ง 3 ระดับ

ผลการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่า $\log K_{hexadecane/air}$ และ $\log K_{part,surface}$ ของสารอินทรีย์ที่ทดสอบ 5 สาร ที่ความชื้น 0% และ 90% ได้ค่า R^2 มากกว่า 0.9 แต่ความสัมพันธ์เชิงเส้นกลับน้อยลงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความชื้น 0% และ 90 % พื้นผิววัสดุมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทั้งเนื่องจากความเป็นเนื้อเดิมของ PP และการมีโมเลกุลของน้ำปกคลุมทั่วผิวหน้า ที่ความชื้นอากาศสูง ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดติดผิวของสารอินทรีย์ที่ผิวชั้นบนจึงเป็นไปตามทฤษฎีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ผ่านทางแรงแบบไม่เจาะจงแสดงได้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยค่าความสามารถของ PP ในการดูดซับสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามแรงแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีค่ามากขึ้น สำหรับกรณีที่ความชื้น 50% ซึ่งไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง อาจเป็นไปได้ว่าโมเลกุลของน้ำที่ติดบนผิวหน้าวัสดุมีลักษณะเป็นจุด ไม่ต่อเนื่องกันเป็นชั้นฟิล์มของน้ำทั่วทั้งพื้นผิว ดังนั้นพลังงานการดูดซับจึงไม่มีความสม่ำเสมอ

3. ผลความสกปรกผิวหน้าวัสดุต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของ Toluene

ภาพที่ (6) แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่า K_{part} ที่เปลี่ยนไปของการดูดซับสาร Toluene ที่แผ่น PP ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศภายในห้องที่แตกต่างกัน 3 ห้อง ได้แก่ ห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย เทียบกับแผ่น PP สะอาด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% พบว่า สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ มีผลทำให้แผ่น PP มีพฤติกรรมในการดูดซับ Toluene ที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานมีค่า K_{part} ลดลงกว่า 64% เมื่อเทียบกับค่าของแผ่นสะอาด สิ่งปนเปื้อนในอากาศในอาคารมีทั้งอนุภาคนาโนเล็กและก๊าซอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสามารถตกทับถมหรือดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุ PP ได้ จึงทำให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของแผ่นวัสดุเปลี่ยนแปลงไปจากการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับแผ่นวัสดุ PP โดยตรง กลายเป็นการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับชั้นสิ่งสกปรกแทน นอกจากนี้ชั้นสิ่งสกปรกที่ปกคลุมผิวหน้าของแผ่น PP อาจขวางกั้นโมเลกุลของ Toluene ไม่ให้เคลื่อนที่แทรกซึมเข้าเนื้อ PP ได้สะดวก และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของ K_{part} ของทั้ง 3 ห้อง พบว่าแผ่นวัสดุ PP ที่สัมผัสกับอากาศในห้องทำงานมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าห้องครัวและร้านเสริมสวย เนื่องจากห้องทำงานเป็นห้องปิดที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศค่อนข้างต่ำเพียง 0.7 รอบต่อชม. เมื่อเทียบกับห้องครัวที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 8 รอบต่อชม. และร้านเสริมสวย 12 รอบต่อชม. อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่ำมีผลทำให้เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ในอากาศภายในห้องได้มาก จึงมีโอกาสที่จะสะสมที่ผิวหน้าของแผ่นวัสดุได้มากกว่าห้องที่มีการระบายอากาศสูง

สรุปผลการวิจัย

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีผลต่อพฤติกรรมในการดูดซับของก๊าซมลพิษอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุ PP โดยสารอินทรีย์ที่มีความสามารถแทรกตัวเข้าสู่เนื้อในพอลิเมอร์ได้ดี เช่น Toluene และ Decane จะดูดซับได้น้อยลงเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดติดที่ผิวหน้าอาจเป็นอุปสรรคต่อกลไกการแทรกตัวของสารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดติดผิวของ PP สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับแรงกระทำแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 90% ส่วนความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุอันเกิดมาจากการสัมผัสกับอากาศภายในอาคารลักษณะต่างๆ สามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการดูดซับของแผ่นวัสดุให้ต่างไปจากเดิม โดยพบว่าห้องที่มีการระบายอากาศต่ำมักจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ดังนั้นการทำความเข้าใจความสามารถในการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์ของวัสดุอาคารควรคำนึงถึงผลของปัจจัยทั้งสองด้วย ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องถึงรูปแบบการได้รับมลพิษของผู้ที่อาศัยในอาคารนั้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับ “ทุนพัฒนานักวิจัย” โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปี พ.ศ. 2555 และทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ระดับปริญญาโท) ประจำปี พ.ศ. 2557 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และทุนภูมิพล ระดับบัณฑิตศึกษา (ระดับปริญญาโท) ประจำปี พ.ศ. 2557 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

1. Godish T. Indoor air pollution control. Michigan : Lewis. 1989.
2. Ongwadee M, Glenn C Morrison. Influence of Ammonia and Carbon Dioxide on the Sorption of a Basic Organic Pollutant to Captet and Latex-Painted Gypsum Board. Environmental Science and Technology. 2008; 42(15): 5415-5420.
3. Paramapon S, Maneerat O, Pech . The Effect of Relative humidity and Gaseous Ammonia on the Sorption of Nicotine onto Indoor Material. KKU Res J. 2011; 16(1): 52-62.
4. Abraham M.H, Andonian-Haftvan J, Whiting G.S, Leo A, Taft R.S. 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. Journal of the Chemical Society, Perkin Transaction. 1994; 2: 1777-1790.
6. NIOSH Manual of Analytical Methods 1501 (Aromatic Hydrocarbons), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA. 2003.
7. NIOSH Manual of Analytical Methods 2551 (Nicotine), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control

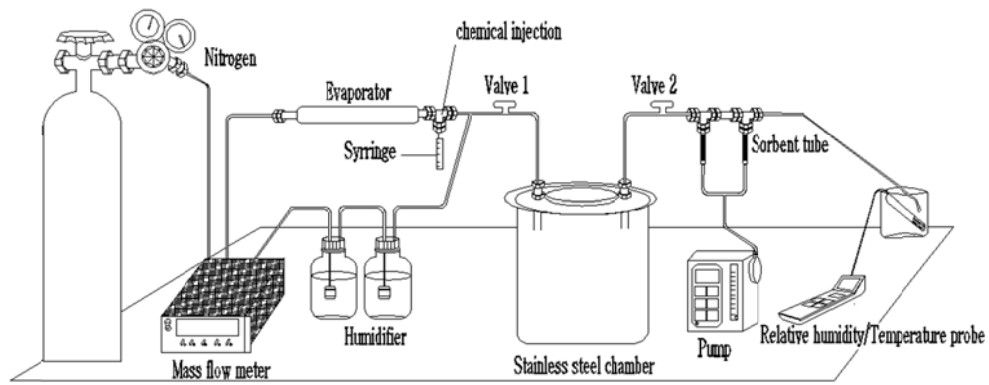
- and Prevention, USA. 1998.
8. NIOSH Manual of Analytical Methods 2546 (Cresol and Phenol), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA. 1994.
 9. Singer BC, Hodgson AT, Destailats H, Hotchi T, Revzan KL, Sextro RG. Indoor sorption of surrogates for sarin and related nerve agents. Environmental Science and Technology. 2005; 39: 3203-3214.
 10. Robert C Weast. Handbook of chemistry and physics : a ready reference book of Chemical and physical data. Chemical Rubber. 1970.
 11. Roth CM, Goss K-U, Schwarzenbach R. Adsorption of diverse set of organic vapors on the bulk water surface. Journal of Colloid and Interface Science. 2002; 252: 21-30.
 12. Van Oss, C.J. Interfacial Forces in A queous Media. Marcel Dekker, New York.1994.

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ทางจลน์ของการดูดซับของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุ PP

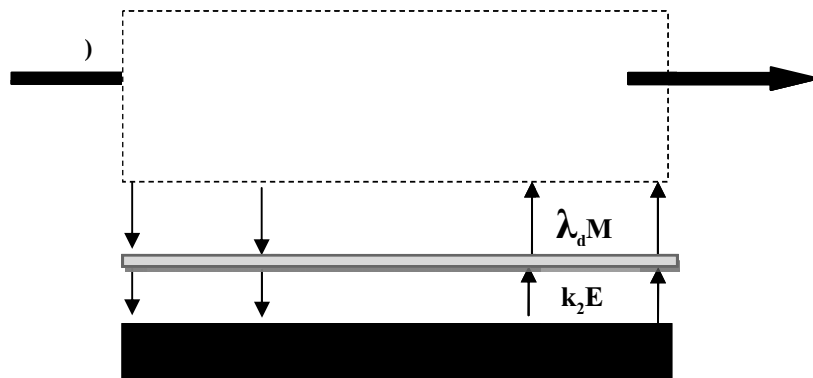
Sorbate	RH	λ_a (1/h)	λ_d (1/h)	k_1 (1/h)	k_2 (1/h)	GF
Toluene	0%	1.95	0.68	0.39	0.3×10^{-3}	0.30
	50%	1.72	0.40	0.32	1.8×10^{-3}	0.22
	90%	1.76	0.96	0.46	0.7×10^{-3}	0.26
PERC	0%	1.20	0.23	0.15	5.0×10^{-3}	0.14
	50%	1.10	0.26	0.23	6.0×10^{-3}	0.17
	90%	1.16	0.42	0.16	14.7×10^{-3}	0.13
Decane	0%	8.01	0.61	0.60	18×10^{-3}	0.29
	50%	1.79	0.42	0.32	38.8×10^{-3}	0.16
	90%	1.93	0.20	0.29	12.1×10^{-3}	0.28
Nicotine	0%	13.28	0.10	0.77	5.0×10^{-3}	0.34
	50%	16.39	0.15	1.12	7.9×10^{-3}	0.35
	90%	17.44	0.13	1.29	6.1×10^{-3}	0.36
Phenol	0%	2.15	0.29	0.23	12.8×10^{-3}	0.20
	50%	2.40	0.52	0.25	3.76×10^{-3}	0.18
	90%	2.50	0.62	0.29	36.2×10^{-3}	0.19

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบ

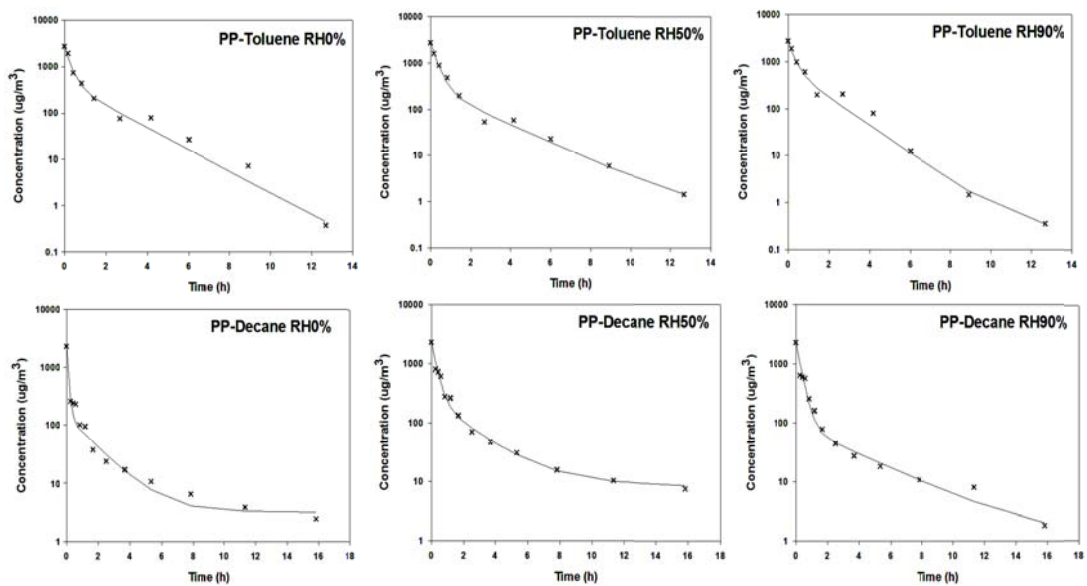
สารอินทรีย์	Log $K_{\text{hexadecane/air}}$	ความดันไอ	แรงพันธะไฮโดรเจน (mJ/m ²)	
		(Pa)	ความเป็นกรด	ความเป็นเบส
Toluene	3.33	3.55	0.00	0.14
PERC	3.58	3.38	0.00	0.00
n-decane	4.69	2.37	0.00	0.00
Nicotine	5.87	1.15	0.00	0.52
Phenol	3.77	1.92	0.60	0.31

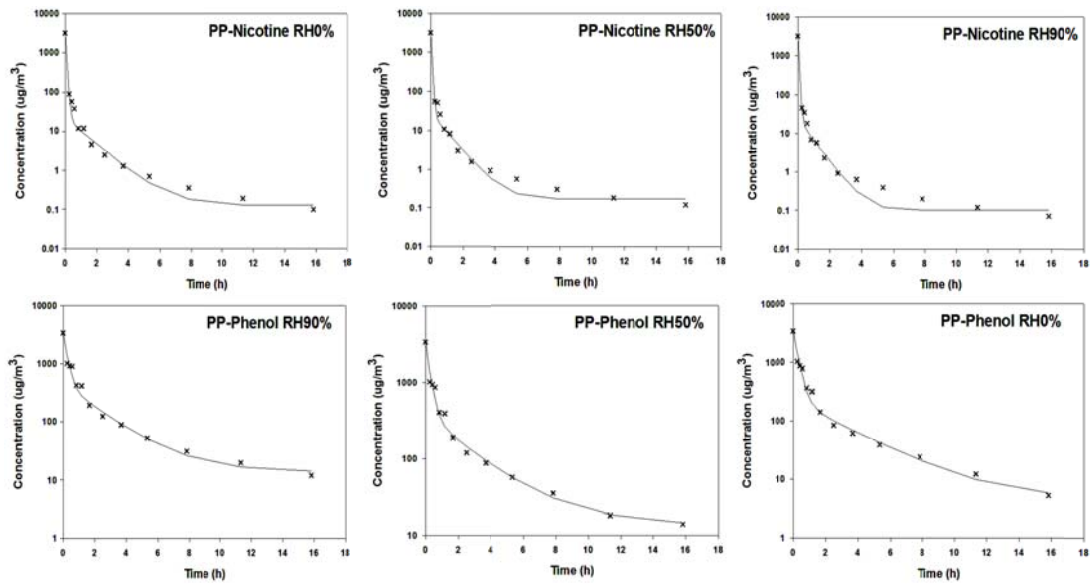


ภาพที่ 1 ระบบทดลองช่วงการดูดซับและการคายสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุ

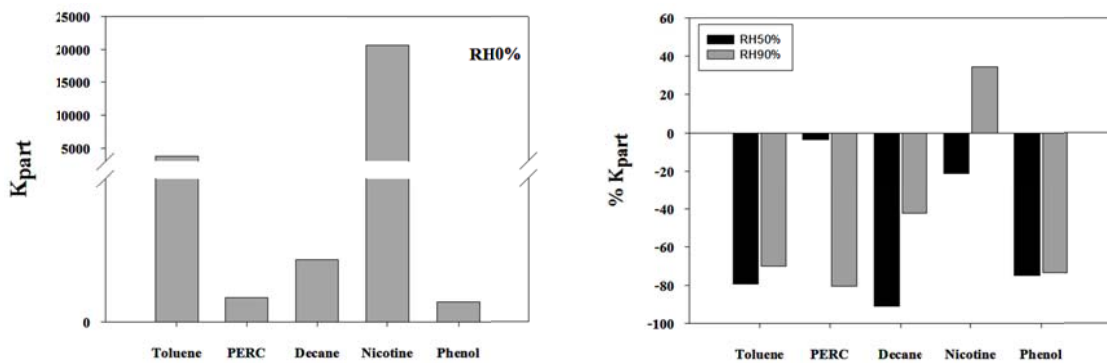


ภาพที่ 2 แบบจำลองคุณภาพอากาศที่รวมการดูดซับที่พื้นผิวและในเนื้อวัสดุ

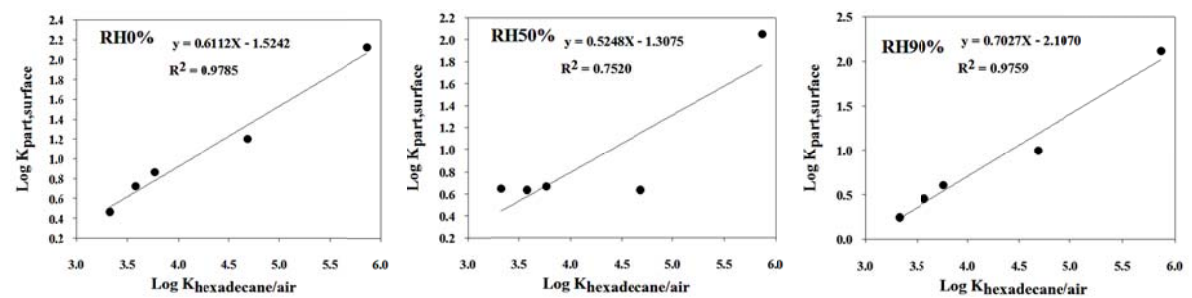




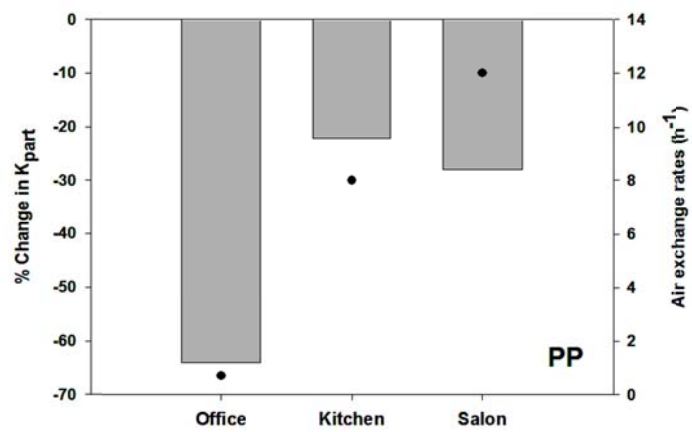
ภาพที่ 3 ลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุ PP (สัญลักษณ์ x คือความเข้มข้นที่ได้จากการทดลอง, — คือค่าความเข้มข้นที่ได้จากโมเดล)



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{part} สารอินทรีย์ของแผ่น PP ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90%



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{part,surface}$ และแรงการดูดซับแบบไม่เจาะจงของสารอินทรีย์ระหว่างที่ผิวหน้าวัสดุและเฟสก๊าซ



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความจุในการดูดซับสาร Toluene บนแผ่น PP ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศทั้ง 3 ห้อง เทียบกับแผ่นวัสดุ PP ที่สะอาดที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50% (● อัตราการระบายอากาศภายในห้อง)

ทับทิม ชชาติสุวรรณ, มณีรัตน์ องค์กรวรรณี. (2558). ผลของความสัมพันธ์ต่อความจุการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 3-6 กุมภาพันธ์ 2558, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน.



ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อความสามารถดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน
Effect of Relative Humidity on The Sorptive Capacity of Organic Pollutants to Polypropylene
Sheet

ทัพนิม ช่อสุวรรณ¹ และ มณีรัตน์ วงศ์วรรณดี²
Thabtim Chatsuvan¹ and Maneratt Ongwandee²

บทคัดย่อ

การดูดซับสารอินทรีย์บนวัสดุอาคารจัดว่าเป็นกลไกที่มีผลต่อการได้รับสัมผัสสารมลพิษจริงอยู่ด้วย ซึ่งการดูดซับขึ้นกับปัจจัยหลายประการ งานวิจัยนี้ทำการวัดผลของความชื้นจากาสผลความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ ได้แก่ โทลูอีน เตตระคลอโรเอทิลีน เดกเคน นิโคติน และฟีนอล ให้แผ่นพอลิโพรพิลีน เป็นวัสดุทดสอบ ทำการทดสอบในห้องทดสอบขนาดเล็ก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50, และ 90% ความอุณหภูมิ 25°C. ทำนายค่าพารามิเตอร์การดูดซับโดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศในห้องทดสอบที่วัดได้ตามเวลาที่ผ่านไปและแบบจำลองการดูดซับที่ยาวหน้าและเนื้อในวัสดุ โดยใช้โปรแกรม MATLAB เจเนติกอัลกอริทึม จากผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุต่อสารอินทรีย์ในอากาศ มีค่าในช่วง 10^3 ถึง 10^4 โดยนิโคตินมีค่าสูงสุด เมื่อเพิ่ม ความชื้นสัมพัทธ์จาก 0 เป็น 50% มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับลดลง โดยเฉพาะโทลูอีนและเดกเคน

ABSTRACT

Sorption of organic compounds to indoor materials is considered to be an important mechanism on occupant exposure to pollutants and the sorption depends on many factors. This study aims to measure the effect of relative humidity on the sorptive capacity of five organic compounds, i.e., toluene, tetrachloroethylene, decane, nicotine and phenol. Tested material was polypropylene sheet (PP). Sorption experiments were conducted in a small-scale chamber at 0, 50 and 90%RH. Temperature was controlled at 25°C. Sorptive parameters were determined by fitting measured time-dependent concentrations to the surface and embedded sink models using a MATLAB[®] genetic algorithm toolbox. Results show that equilibrium partitioning coefficients for the tested organic compounds between the PP and air ranged from 10^3 to 10^4 . Nicotine has the highest value. Increasing RH from 0 to 50% resulted in a decrease of the coefficient, particularly for toluene and decane.

Key Words: Partitioning, Polymer, Volatile organic compounds

¹Corresponding author; e-mail address: maneratt@msu.ac.th

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม 44150

²Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham 44150

คำนำ

วัสดุตกแต่งภายในอาคาร เช่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องสำอางส่วนตัว สีทาตกแต่งบ้าน รมควันพื้น เป็นต้น สามารถปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศภายในอาคารได้ สารมลพิษที่ถูกปล่อยออกมาเหล่านี้ บางส่วนถูกหายใจจากภายในอาคารด้วยการระบายอากาศ แต่ในกรณีที่มีการระบายอากาศต่ำ มลพิษส่วนใหญ่จะสะสมภายในอาคารจากการเคลื่อนที่ไปสู่อุณหภูมิที่วัสดุภายในอาคารและอาจมีปฏิกิริยาพื้นผิวชั้นผิว (Surface chemistry) (มณีนันท์, 2551) โมเลกุลของสารมลพิษที่ดูดซับที่วัสดุจะค่อยๆ คายกลับสู่อากาศในห้องอีกครั้ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการได้รับสัมผัสมลพิษจากอากาศ (Exposure) ของผู้อาศัยในอาคารได้ จิตใจผลที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษประกอบด้วยปัจจัยหลายอย่าง ทั้ง ลักษณะกายภาพและเคมีของสารมลพิษและผิววัสดุ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ สิ่งกีดขวางผิววัสดุ และการมีอยู่ของก๊าซอื่นในบรรยากาศ งานวิจัยประเภทนี้ สาขาพลาสมา (2551) ได้ศึกษาความจุของการดูดซับโมเลกุลบนแผ่นวัสดุภายในอาคาร ได้แก่ พอลิเอทิลีน ไนลอน พลาสติก และยางพารา ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90 % และเมื่อมีการแลกเปลี่ยนด้วยพบว่า ความจุของการดูดซับโมเลกุลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 0 เป็น 90% ทำให้ค่าความจุการดูดซับของพอลิเอทิลีน ไนลอนเพิ่มขึ้น 122%, ของยางพาราเพิ่มขึ้น 46% และของพลาสติกเพิ่มขึ้น 53% เมื่อมีการให้ก๊าซแลกเปลี่ยนความเข้มข้น 20 และ 40 ลิตรร่วมกับพบว่าความจุการดูดซับโมเลกุลของพลาสติก 15-35% ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแย่งพื้นที่ดูดซับ

ในงานวิจัยนี้คือการศึกษากลไกการดูดซับของวัสดุพอลิเอทิลีนซึ่งนิยมใช้ภายในอาคาร พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) จัดเป็นพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งที่ส่วนใหญ่ถูกนำมาทำเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในอาคาร เช่น กล่องเครื่องสำอาง กล่องเครื่องมือ ปากไม้แว่นตา เป็นต้น (วรวิทย์, 2554) เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างที่ไม่รับรังสีประจุด้วยโมโนเมอร์โพรพิลีน เมื่อเกิดการดูดซับก๊าซกับโมเลกุลอื่นจึงย้ายพันธะแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) เท่านั้น (Abraham et al., 1994) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกให้เป็นวัสดุทดสอบเพื่อทำการศึกษายลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อความจุในการดูดซับสารอินทรีย์ โดยวัดเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างสารอินทรีย์ที่ละลายในวัสดุต่อสารอินทรีย์ที่อยู่ในอากาศ ณ สภาวะสมดุล (Equilibrium partitioning coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนที่สูงแสดงว่าปริมาณสารอินทรีย์ชนิดนั้นจะอยู่ที่แผ่นวัสดุนั้นตามไปด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมี วัสดุทดสอบและวิธีการเตรียม

สารดูดซับอินทรีย์ (Organic sorbates) สารที่ใช้เป็นตัวแทนสารดูดซับบนวัสดุทดสอบ ได้แก่ สารในกลุ่ม Aromatic คือ Toluene (C_7H_8), Phenol (C_6H_5O) และ Decane ($C_{10}H_{22}$) สารในกลุ่มอะมีน คือ Nicotine ($C_{10}H_{14}N_2$) และสารในกลุ่มสารประกอบคลอรีน คือ Tetrachloroethylene หรือ PERC (C_2Cl_4) ซึ่งสารอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดถูกบรรจุภายในอาคาร (Godish, 1989) วัสดุดูดซับ (Sorbent) ที่ใช้ในการทดสอบ คือแผ่นพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) 1.8 mil (Cole-Palmer Co., USA) ทำความสะอาดแผ่น PP โดยนำมาล้างด้วยสารละลาย Methanol 1% และ Ethyl acetate 1% ในน้ำกลั่น แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำแผ่น PP มาทิ้งในห้องสะอาด (Clean room) พร้อมกับปล่อยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปในห้อง ปิดฝาให้เรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ 30 นาที

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นแรกภายในห้องทดสอบทั้งหมดถูกห่อหุ้มด้วยแผ่น PP เริ่มขั้นตอนการดูดซับโดยดูดสารอินทรีย์บริสุทธิ์ที่ต้องการทดสอบด้วยเข็มฉีดยาปริมาณ 0.08 มล. ใส่เข้าไปที่ จุกปิดรูรับไอระเหย พร้อมกับปล่อยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ด้วยอัตราการไหล 50 มล./นาที เข้าไปในห้องทดสอบ เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้เกิดการดูดซับของสารอินทรีย์ที่แผ่นพอลิโพรพิลีน ในระหว่างนี้วาล์วระบายจากห้องทดสอบจะถูกปิด จากนั้นจึงยกก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ตามที่กำหนดเข้าห้องทดสอบด้วยอัตราการไหล 500 มล./นาที เปิดวาล์วระบายและเริ่มเก็บตัวอย่างอากาศในห้องทดสอบโดยให้ปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดแบบพกพาต่อกับหลอดดูดซับสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศ ดูดด้วยอัตรา 0.23 ลิตร/นาที ทำการเก็บตัวอย่างอากาศต่อเนื่อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จำนวนตัวอย่างที่เก็บ 12 ตัวอย่าง ตัวอย่าง 2 หลอด (เก็บซ้ำ) ระบบการทดลองถูกติดตั้งในตู้ดูดควัน โดยควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส ทุกการทดลอง ค่าความแม่นยำของห้องทดสอบมีค่า λ เท่ากับ 0.007 h³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.012 h³ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ECA, 1991 ได้แนะนำค่า λ ควรต่ำกว่า 1% ของค่า λ ที่กำหนดใช้ในการทดลอง) แสดงภาพประกอบ 1

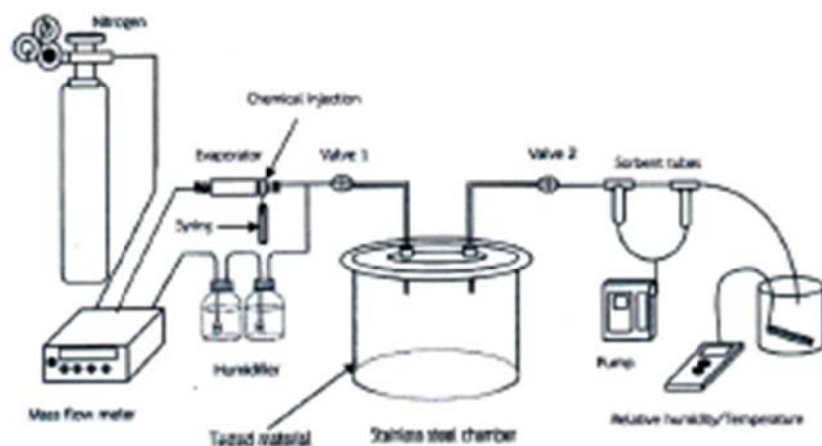


Figure 1 Experimental system

การวิเคราะห์ทางเคมี

การวิเคราะห์สาร Tetrachloroethylene, Toluene และ Decane (NIOSH, 2003) ทำโดยสกัดสารคาร์บอนที่ดูดซับอยู่ในหลอดเก็บตัวอย่าง ด้วยคาร์บอนไดร็อกไซด์ (CS₂) 1 มล. เหย้าด้วยเครื่องเหย้าเป็นเวลาต่อเนื่อง 30 นาที จากนั้นแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายที่ได้จากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วย เครื่องโครมาโทกราฟีแบบสเปกโตรเมตรี (GC-MS) (Shimadzu, Japan) โดยให้โหมด SIM สำหรับการวิเคราะห์สาร Nicotine (NIOSH, 1998) ทำการสกัดสารดูดซับหรือด้วย สารละลาย Ethyl acetate ผสม 0.01% Triethylamine ส่วน Phenol (NIOSH, 1994) ให้สารละลาย Methanol

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor air quality models)

ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ที่ติดบนผิววัสดุต่อสารอินทรีย์ที่อยู่ในอากาศ (K_{ads}) ผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลองที่รวมการดูดซับบนพื้นผิววัสดุ และเนื้อในวัสดุ (Singer et al., 2005) ใน

ที่นี้คือ ชั้นของบรรยากาศที่สัมผัสกับอากาศโดยตรง และชั้นที่มีการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์แทรกเข้าไปสู่เนื้อในวัสดุ ด้วยกลไกการแพร่ (Diffusion) หรือการละลาย (Solution) และคงค่าประมาณ 2 ซึ่งสามารถอธิบายด้วย สมการสมดุลมวลของสารมลพิษในอากาศและบนผิววัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังสมการ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

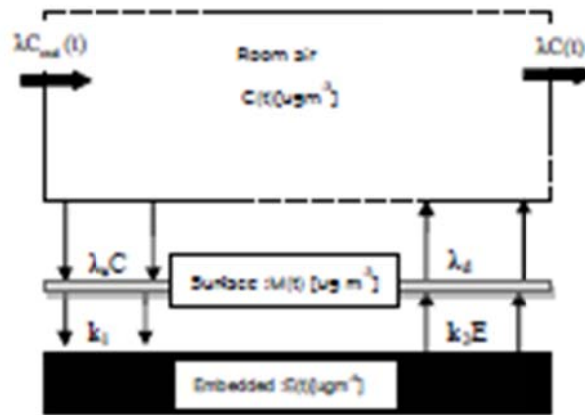


Figure 2 Schematic of sorption model with surface and embedded sinks (Singer et al., 2005)

$$\frac{dC}{dt} = -(\lambda + \lambda_a)C + \lambda_d M \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = \lambda_a C - (\lambda_d + k_1)M + k_2 E \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = -k_2 E + k_1 M \quad (3)$$

โดยที่

- λ = อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ต่อชม.)
- λ_a = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศที่ถูกดูดซับบนแผ่นวัสดุ (มด.ก./ชม.)
- λ_d = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศที่ถูกคายออกจากแผ่นวัสดุ (มด.ก./ชม.)
- C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศที่ไหลออกทั้งหมด (มด.ก./ลบ.ม.)
- C_{in} = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศที่ไหลเข้าทั้งหมด (มด.ก./ลบ.ม.)
- M = มวลสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนผิววัสดุทั้งหมด (มด.ก./ลบ.ม.)
- E = มวลสารอินทรีย์ที่ดูดกลืนเข้าไปในเนื้อวัสดุทั้งหมด (มด.ก./ลบ.ม.)
- k_1 = สัมประสิทธิ์การดูดซับในเนื้อวัสดุ (ม./ชม.)
- k_2 = สัมประสิทธิ์การคายจากเนื้อวัสดุ (ต่อชม.)

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับและการคาย λ_a , λ_d , k_1 และ k_2 สามารถหาได้จากสมการ 1, 2 และ 3 โดยใช้ชุดข้อมูลความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำนายค่าพารามิเตอร์ ด้วยวิธี Genetic Algorithm โดยให้โปรแกรม MATLAB โดยมีเงื่อนไข คือ ค่าความเหมาะสม (Goodness-of-fit, GF) จะต้องเป็นค่าที่ดีที่สุด สมการที่ใช้ในการหาค่า GF ดังสมการ 4

$$GF = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 / y_i^2}{N}} \quad (4)$$

โดยที่

y_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

$\bar{y}$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง

N คือ จำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่าง

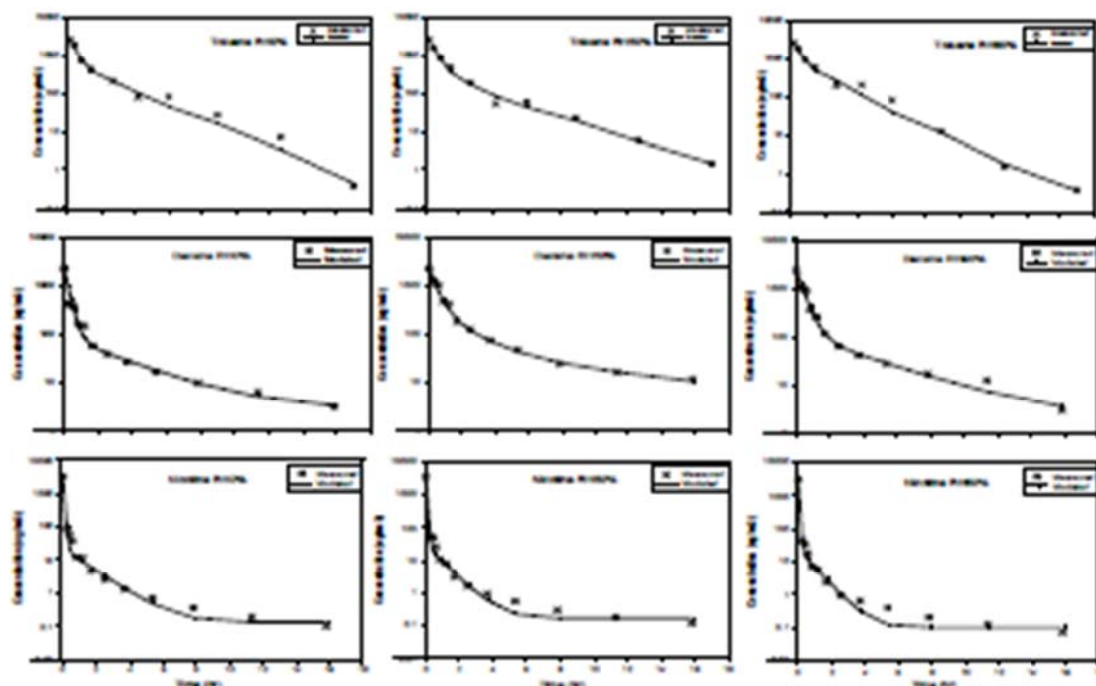
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ λ_d , λ_g , k_1 และ k_2 ที่ดีที่สุดแล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 4 พารามิเตอร์ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุของสารอินทรีย์ในอากาศ แสดงดังสมการ 5

$$K_{part} = \frac{M+E}{C} = \left(\frac{k_2 + k_1}{k_2} \right) \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_g} \right) \quad (5)$$

ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในห้องทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

Figure 3 แสดงลักษณะแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลง ของค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุของสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90% พบว่า เส้นกราฟมีลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายๆ กัน คือ ในช่วง 2 ชั่วโมงแรก ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในห้องทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว ลักษณะการลดลงของเส้นกราฟเป็นเส้นตรง หลังจากนั้น 2 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก สารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบโดยส่วนใหญ่เจือจางที่ไปติดที่ยึดของวัสดุทดสอบ และถูกดูดซับไว้บนยารวัสดุทดสอบ ซึ่งชี้ให้เห็นได้ชัดเจนจาก ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (λ_d) แสดงดัง Table 1 และในขณะเดียวกันสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับบนยารวัสดุจะค่อยๆ คายตัวกลับสู่บรรยากาศภายในห้องทดสอบอย่างช้าๆ



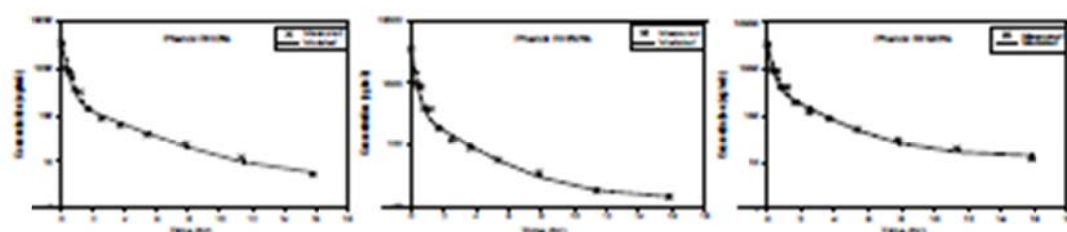


Figure 3 Measured and modeled concentration profiles of organic pollutants to PP

ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เทียบกับเวลาในช่วง 2 ชั่วโมงแรก ที่ค่าความชื้น 0% เปรียบเทียบกัน พบว่าค่าความเข้มข้นของ Nicotine ลดลงได้เร็วกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Nicotine มีความสามารถในการดูดซับบนแผ่นวัสดุได้ดีกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของ Nicotine ประกอบด้วยไนโตรเจน 2 อะตอม ซึ่งเพิ่มตำแหน่งในการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวได้มากกว่า นอกจากนี้ Nicotine จัดเป็นสารกึ่งระเหย ซึ่งมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปโมเลกุลที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะอยู่ในรูปที่เป็นก๊าซ (Ongwandee et al., 2008)

Table 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของการดูดซับของสารอินทรีย์ที่แผ่น PP ซึ่งทำนายได้จากสมการ (1-3) โดยค่าพารามิเตอร์ λ_a , λ_d และ k_1 ของสารอินทรีย์ที่ทดสอบอยู่ในช่วงของเลขยกกำลัง (Order of magnitude) เดียวกัน ยกเว้นค่า λ_a ของ Nicotine ที่มีค่ามากกว่าของสารอินทรีย์ชนิดอื่นประมาณ 10 เท่า ส่วน k_2 ของสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างต่างกัน พบว่า ค่า k_2 ของ Toluene ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% มีค่า 0.3×10^{-5} ต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของ Toluene เมื่อแทรกตัวเข้าในแผ่น PP ผ่านกลไกการแพร่ (Diffusion) หรือการละลาย (Solution) อาจไม่สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่ชั้นผิวหน้าของวัสดุได้

Table 1 Kinetic parameter estimates.

Sorbate	RM	λ_a (1/h)	λ_d (1/h)	k_1 (1/h)	k_2 (1/h)	GF
Toluene	0%	1.55	0.65	0.35	0.3×10^{-5}	0.30
	30%	1.72	0.40	0.32	1.8×10^{-5}	0.22
	50%	1.76	0.56	0.46	0.7×10^{-5}	0.26
PERC	0%	1.20	0.23	0.13	3.0×10^{-5}	0.14
	30%	1.10	0.26	0.23	6.0×10^{-5}	0.17
	50%	1.16	0.42	0.16	14.7×10^{-5}	0.13
Decane	0%	4.25	0.35	0.36	16.3×10^{-5}	0.25
	30%	0.56	0.56	0.21	173×10^{-5}	0.11
	50%	1.04	0.20	0.16	10×10^{-5}	0.15
Nicotine	0%	13.25	0.10	0.77	3.0×10^{-5}	0.34
	30%	16.35	0.13	1.12	7.3×10^{-5}	0.33
	50%	17.44	0.13	1.25	6.1×10^{-5}	0.36
Phenol	0%	2.15	0.25	0.23	12.5×10^{-5}	0.20
	30%	2.40	0.32	0.23	3.76×10^{-5}	0.15
	50%	2.50	0.62	0.25	36.2×10^{-5}	0.19

2. ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนสารอินทรีย์ที่วัดต่อที่อยู่ในอากาศ

Figure 4 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างค่า K_{part} ของสารอินทรีย์สำหรับแบบ PP ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90% พบว่า ค่าความจุของการดูดซับสารอินทรีย์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ คล้ายๆ กัน คือ ที่ค่าความชื้น 0% ค่า K_{part} มีค่ามากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เป็น 50% มีผลทำให้ค่าความสามารถของแบบ PP ในการดูดซับลดลง โดยเฉพาะ Toluene และ Decane จากนี้จึงมาจากพื้นผิว PP มีโมเลกุลของน้ำดูดซับอยู่ ทำให้พื้นที่ในการดูดซับสารอินทรีย์ลดลง และโมเลกุลของน้ำอาจเป็นชั้นกั้นไม่ให้สารอินทรีย์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อวัสดุได้สะดวก แต่เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 90% สารอินทรีย์โดยส่วนใหญ่มีค่า K_{part} เพิ่มขึ้นจากที่ความชื้น 50% เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ongwandee and Morrison (2008) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าความสามารถในการดูดซับ Trimethylamine พบว่าเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจาก 50% เป็น 90% ค่าความจุในการดูดซับของพรมเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 เท่า แต่ค่าความจุในการดูดซับของแผ่นย่นไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ จากแนวโน้มได้ว่าโมเลกุลของสารดูดซับมีการสร้างพันธะกับฟิล์มของน้ำหรือมีการละลายในชั้นฟิล์มของน้ำ

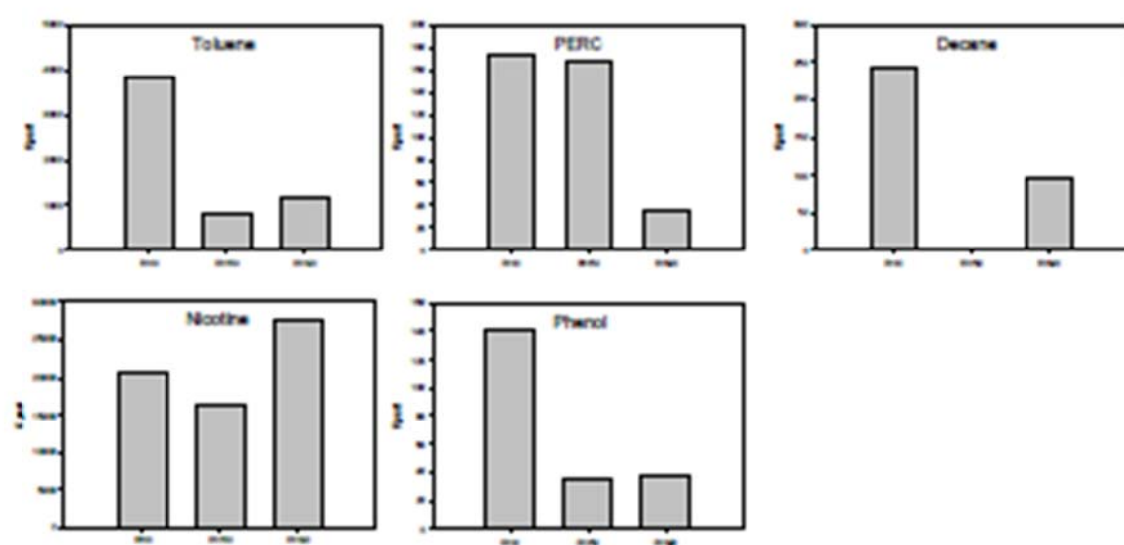


Figure 4 Effect of RH on K_{part}

สรุป

จากการศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าความจุในการดูดซับสารอินทรีย์บนแบบ PP สรุปได้ว่า คำนี ที่ความชื้น 0% พบว่า Nicotine มีความสามารถในการดูดซับบนแบบวัสดุได้ดีกว่า สารอื่น อาจเป็นเพราะ นิโคตินเป็นสารกึ่งระเหย ซึ่งมีแนวโน้มที่จะ อยู่ตัวอยู่มากกว่าที่จะอยู่ในรูปที่เป็นก๊าซในอากาศ Toluene เป็นอีก สารที่มีค่า K_{part} ค่อนข้างสูงเนื่องจากสามารถแทรกซึมสู่เนื้อ PP ได้ดี เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็น 50% พบว่าค่า ความสามารถของแบบ PP ในการดูดซับสารอินทรีย์ลดลง จากนี้จึงมาจากโมเลกุลของน้ำแย่งพื้นที่ผิวสำหรับการ ดูดซับและอาจรบกวนการแทรกซึมของสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อวัสดุ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับ "ทุนพัฒนานักวิจัย" โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปี พ.ศ. 2555 และทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิต ระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) ประจำปีงบประมาณ 2557 และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- ปรมาภรณ์ สรรพพานิช, มณีรัตน์ วงศ์วรรณดี, เพชร หังชัย. อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์และก๊าซแอมโมเนียต่ออัตราการดูดซับนิโคตินบนวัสดุภายในอาคาร. วารสารวิจัย มช.16(1) : มกราคม 2554, หน้า 52-62
- มณีรัตน์ วงศ์วรรณดี. การศึกษาผลพิษควันบุหรี่บนวัสดุภายในอาคาร. วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มีนาคม) 2551, หน้า 55 - 60
- Abraham, M.H., Andonian-Haftvan, J., Whiting, G.S., Leo, A., Taft, R.S. 1994. 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. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transaction*, 2: 1777-1790.
- NIOSH (1994) NIOSH Manual of Analytical Methods 2546 (Creosol and Phenol), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- NIOSH (1998) NIOSH Manual of Analytical Methods 2551 (Nicotine), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- NIOSH (2003) NIOSH Manual of Analytical Methods 1501 (Aromatic Hydrocarbons), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA
- Ongwandee, M., and Morrison, G. 2008. Influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to carpet and latex-planted gypsum board. *Environmental Science & Technology*. 42: 5415-5420.
- Roth CM, Goss K-U, Schwarzenbach R (2002) Adsorption of diverse set of organic vapors on the bulk water surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 252, 21-30.
- Singer BC, Hodgson AT, Destailate H et al (2005) Indoor sorption of surrogates for sarin and related nerve agents. *Environmental Science and Technology*, 39, 3203-3214.

Chatsuvan, T., Ongwandee, M. (2014). Effects of relative humidity and surface soiling on the sorption of organic pollutants to polymeric material. *Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2014*, July 7-12, 2014, Hong Kong, China.



Indoor Air 2014

THE 13TH INTERNATIONAL
CONFERENCE ON INDOOR AIR
QUALITY AND CLIMATE



July 7-12, 2014

The Grand Hall
The University of Hong Kong



Indoor Air 2014 is the official conference
of the International Society for Indoor Air
Quality and Climate, ISIAQ.

www.indoorair2014.org

EFFECTS OF RELATIVE HUMIDITY AND SURFACE SOILING ON THE SORPTION OF ORGANIC POLLUTANTS TO POLYMERIC MATERIAL

Thabtim CHATSUVAN and Maneerat ONGWANDEE*

Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand

*Corresponding email: maneerat.o@msu.ac.th

Keywords: Sorption, Polymer, Organic pollutants

SUMMARY

We measured the partitioning coefficient ($K_{part, substrate/air}$) for the sorption of gas-phase toluene, tetrachloroethylene and n-decane on both clean and soiled surfaces of polypropylene sheets under varying relative humidity (RH) using a small chamber. An individual 0.08- μ L pure liquid chemical was introduced into the chamber by flash evaporating. Kinetic sorption parameters were determined by fitting measured time-dependent concentrations to the surface and embedded sink models using a MATLAB® genetic algorithm toolbox. Results show that the K_{part} for toluene ranged from 10^2 to 10^3 , while for tetrachloroethylene and decane varied from 10^0 to 10^2 . When the RH increased, K_{part} decreased for all sorbates. The toluene uptake appeared to be most affected by surface soiling. K_{part} decreased by three times compared with K_{part} for the clean surface under the same 50% RH.

INTRODUCTION

Synthetic polymeric materials are widely used as plastic film or sheets in a variety of indoor applications. These applications include textiles (e.g. carpets and curtains), packaging and labeling, plastic containers, laboratory equipment, automotive trims etc. Additionally, synthetic polymers are used as a component of various indoor materials such as solvent borne paints, adhesives, coatings, etc. Unsurprisingly, indoor polymeric materials are thought of as emission sources of many organic pollutants (Yu and Crump, 1998). However, polymeric material can also act as temporary sinks for airborne organic pollutants, which can then be re-emitted. Among several controlling factors on surface sorption of organic compounds, adsorbed water can alter the indigenous surface properties. Interactions between gas-phase organic pollutants and bare surfaces will shift to those with adsorbed water on the surfaces. Dirt on indoor surfaces could also modify the surface properties. Indoor surface soiling can originate from airborne contaminants such as biological particles, particulate matters, semi-VOCs (SVOCs) etc. Weschler and Nazaroff (2008) estimated characteristic times for SVOCs partitioning between air and sorbing substrate, varying from 1 h to years. Unsurprisingly, a layer of some SVOCs can develop rapidly on indoor surfaces such as some low molecular weight plasticizers or personal care products. As a result, relative humidity, which varies widely in indoor environments, and surface soiling can affect the sorption behaviors of gas-phase organic pollutants to these modified indoor surfaces. Considering surface free energy, partitioning of uncharged organic molecules to the surface depends on the molecular interactions between the molecule i and the surface, i.e., van der Waals and Lewis acid-base interactions. The specific objective of this study is to quantify the effects of various degrees of

RH and dirt on the sorption of organic pollutants to a clean polypropylene sheet. The test organic pollutants include toluene, tetrachloroethylene and n-decane.

METHODOLOGIES

Material and Experimental Setup

The polymeric material used in this test was a 1.8-mil thick polypropylene (PP) sheet (Cole-Parmer, USA). The PP sheet was initially cleaned with 1% ethyl acetate and 1% methanol in DI water then rinsed twice with DI water and finally dried with high purity nitrogen gas in a clean stainless steel chamber for 0.5 h. The cleaned PP was immediately installed in a sorption test chamber. Specific surface-to-volume ratio was $19.2 \text{ m}^2/\text{m}^3$, covering the entire inner chamber surface. For testing the effect of surface soiling, the cleaned PP installed in the test chamber had been openly exposed to the faculty office air for three working days. Subsequently, the sorption test of target organic compounds for the soiled PP was immediately conducted at a 50% RH condition, which is close to the office RH of 61-65%. The faculty office contains particle/MDF board desks, synthetic leather chairs, melamine board wall partitions, sound absorption fabric walls, typical office equipment, a refrigerator etc. All chemicals used as organic sorbates were reagent grade and purchased from Sigma-Aldrich.

Figure 1 shows a schematic of the experimental system consisting of a 25 l stainless steel chamber with an inner diameter of 30 cm. The lid was attached to the chamber body with eight C-clamps. A Viton® o-ring was used as an air tight seal. A sorbate evaporator unit was composed of a 0.63 cm o.d., 13 cm long stainless steel tube inserted through a 7.5 cm long cylindrical heating block that contained a temperature controller. A relative humidity probe was inserted into a 250 ml flask to contact the exhaust gas. Mass flow meters (MKS Instruments, USA) were used to regulate the flows.

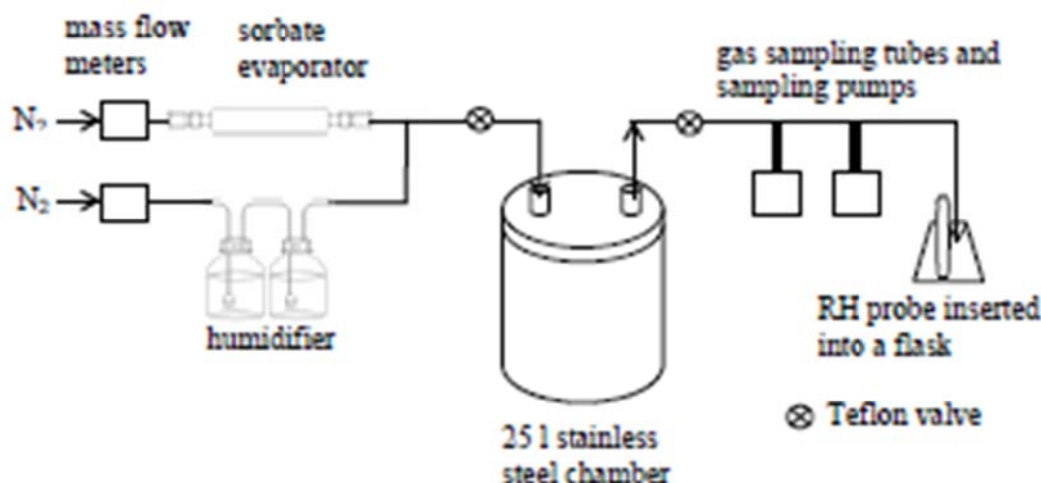


Figure 1. Experimental system

Before starting the sorption experiment, the designated RH inside the chamber with the test PP installed was achieved by bubbling either the full quantity or a portion of high purity N_2 through DI water. Subsequently, for each experiment, $0.08 \mu\text{l}$ of pure liquid chemical using a $0.5 \mu\text{l}$ syringe (SGE, Australia) was injected to the chamber via the heated evaporator at

250°C with 50 ml/min of dry N₂ for 20 min. The initial calculated concentrations were 2750 µg/m³ for toluene, 5130 µg/m³ for tetrachloroethylene, and 2310 µg/m³ for decane. During this evaporation stage, the Teflon valve at the outflow was closed. After that, either dry or humidified N₂ of 500 ml/min was introduced to the chamber for 16–18.3 h to obtain dynamic change in the outlet concentration for sorption parameter measurement. The experimental system was installed inside a laboratory hood and the experimental temperature was controlled at 25°C using a room thermostat. Uncontrolled air exchange due to leaks during experimentation was less than 0.001% of the controlled air exchange (1.2 h⁻¹).

Gas sampling and Analysis and QC/QA

Charcoal sorbent tubes (SKC, USA) were used to collect gas samples consecutively using a personal sampling pump (SKC, USA) at a flow rate of 0.23 l/min. Total volume collected was between 2.3 and 69 l. The test organic compounds adsorbed on charcoal were desorbed with carbon disulfide following NIOSH procedures (NIOSH(a) and (b), 2003) and then analyzed with a gas chromatography-mass spectrometer (Shimadzu, Japan) operated in a selected-ion monitoring (SIM) mode.

Duplicate samples for each sampling time were collected to assure the reliability of sampling and analytical methods. The method detection limits (MDLs) followed US EPA (2004) guideline procedures. The MDLs are 16 ng/m³ for toluene, 20 ng/m³ for tetrachloroethylene, and 16 ng/m³ for decane, based on air volume of 69 l. Sorbents in the back sections of sampling tubes were analyzed and no breakthroughs were observed. Sample recovery efficiencies for the extraction process by spiking with target standards were found to be 97.6±5.0% for toluene, 98.6±2.4% for tetrachloroethylene, and 96.1±0.7% for decane. The sorbate residues in the heating tube after 20-min flash evaporation were determined by rinsing the tube three times with 1-mL extraction solution. No toluene residue was detected, while 1.2% tetrachloroethylene and 0.4% decane were detected in the first rinse solution, and they were not detected in the final rinse solution.

Data Analysis

The model used in this study was adopted from the model developed by Singer et al. (2005). This model was further modified from the model proposed by Jorgensen et al. (2000), which parameterizes a rate of sorbate mass movement between the surface and the embedded sink by a one-dimensional diffusion coefficient (K_{ad}). Instead, the model by Singer et al. (2005) describes test material that comprises two-layer sinks, i.e. surface (Sink 1) and embedded (Sink 2) sinks, and the rates of mass transport between the two sinks are distinct. The mass balance equations for changes of the sorbate in the chamber air in contact with the surface (Equation 1), the sorbate accumulated on the surface (Equation 2), and the sorbate accumulated in the surface material (Equation 3) are:

$$\frac{dC}{dt} = -(\lambda + k_{a1})C + k_{d1}M_1 \quad (1)$$

$$\frac{dM_1}{dt} = k_{a1}C - (k_{d1} + k_{a2})M_1 + k_{d2}M_2 \quad (2)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = k_{a2}M_1 - k_{d2}M_2 \quad (3)$$

where C is the time-dependent concentration of sorbate in the chamber air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); M_1 and M_2 are the amounts of sorbate mass accumulated on the surface and embedded sinks, respectively ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); λ is the air exchange rate ($1/\text{h}$); k_{a1} and k_{d1} are the rates of mass transfer from the chamber air to the surface sink and vice versa ($1/\text{h}$); and k_{a2} and k_{d2} are the rates of mass transfer from the surface sink to embedded sink and vice versa ($1/\text{h}$).

A MATLAB® genetic algorithm toolbox was used to optimize the kinetic parameters according to Equations (1-3) based on the minimum of a goodness-of-fit (GF) value. GF was calculated as the square root of the variance of the measurement error divided by N measured points.

A partitioning coefficient (K_{part}), the ratio of sorbed mass to gas-phase mass of the test sorbate at equilibrium, is given by:

$$K_{\text{part}} = \frac{M_1 + M_2}{C} = \left(\frac{k_{a2} + k_{d2}}{k_{d2}} \right) \left(\frac{k_{a1}}{k_{d1}} \right) \quad (4)$$

RESULTS AND DISCUSSION

Concentration Profiles and Kinetic Parameter Estimates

Time-dependent concentration profiles obtained from sorption experiments and models for toluene, tetrachloroethylene and decane are shown in Figures 1-3. The experiments were conducted at 0%, 50% and 90% RH for the sorption of individual organic sorbates to clean PP and to soiled PP only at 50% RH. The profiles show a good fit between the measured and modeled concentrations with the GF values of 0.1-0.3. High GFs were obtained mostly from the toluene sorption experiments because of fewer sampling points (N). Changes of the concentrations with respect to elapsed time for all organic compounds are similar. The profile shapes can be divided into two intervals. During the first 2-hour period, the concentrations decreased more rapidly and the trend lines appear to be more sensitive to k_{a1} , which is parameterized by the rate of mass transfer from the chamber air to the surface sink. After two hours, the concentrations decreased slowly; the profiles exhibit smaller slopes and appear to be more sensitive to k_{d2} , which is governed by the rate of mass transfer from the surface sink to embedded sink.

Table 1 presents the values of k_{a1} , k_{d1} , k_{a2} , k_{d2} and GF obtained by fitting the measured concentrations to Equations (1-3). For each of k_{a1} , k_{d1} and k_{a2} , the values have the same order of magnitude, while k_{d2} values varied from 10^{-4} to 10^{-1} . The sorption of decane yielded higher k_{d2} than sorption of the other two compounds. The toluene sorption to clean PP at 0% RH had the lowest k_{d2} of 3×10^{-4} . The toluene adsorbed on the bare PP surface appears to favorably partition and reside in the material, possibly approaching a slow or irreversible sink.

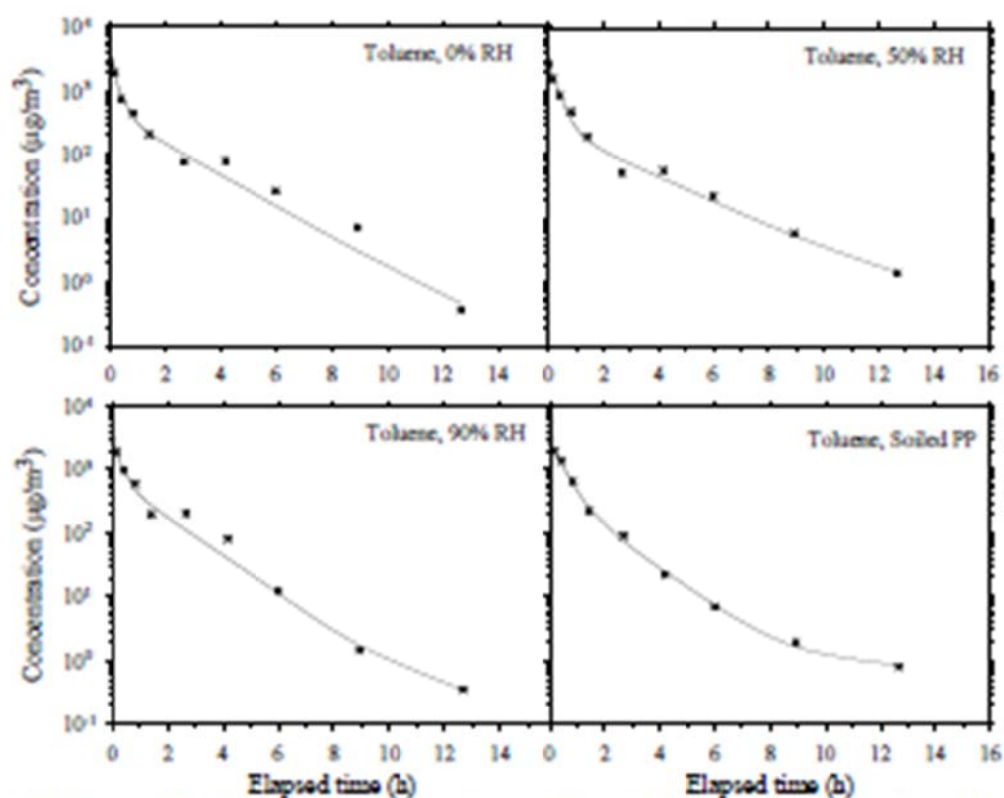


Figure 2. Measured and modeled concentration profiles of toluene sorption to clean PP at 0%, 50%, 90% RH and to soiled PP at 50% RH. (x Measured, – Modeled)

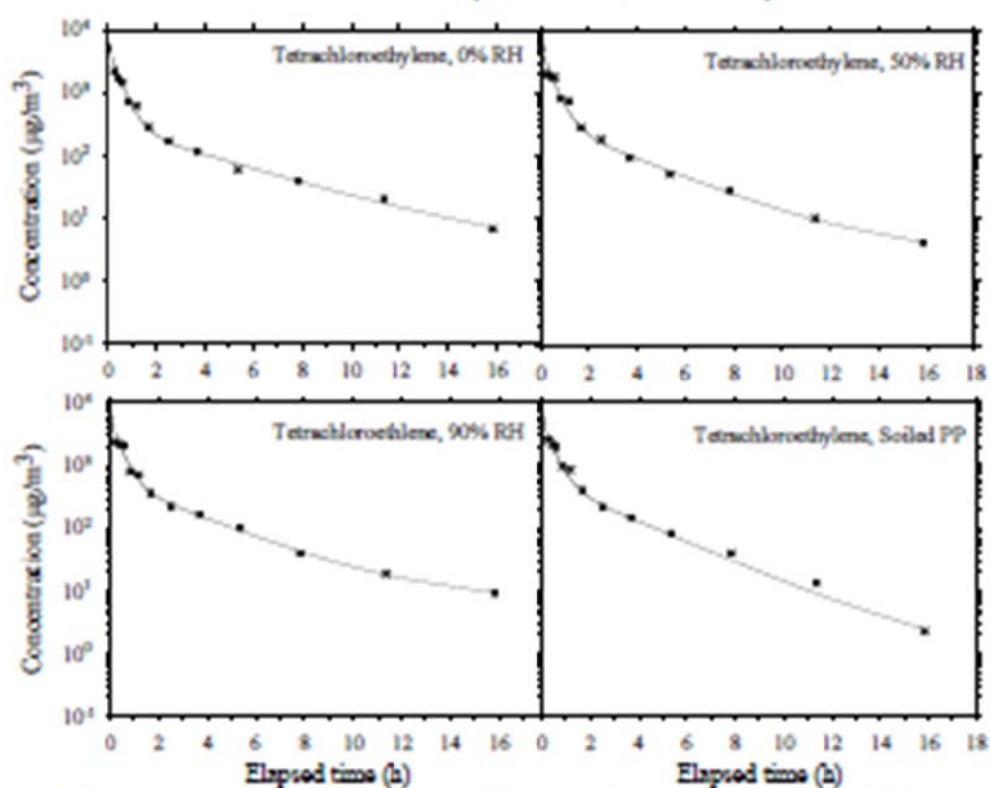


Figure 3. Measured and modeled concentration profiles of tetrachloroethylene sorption to clean PP at 0%, 50%, 90% RH and to soiled PP at 50% RH. (x Measured, – Modeled)

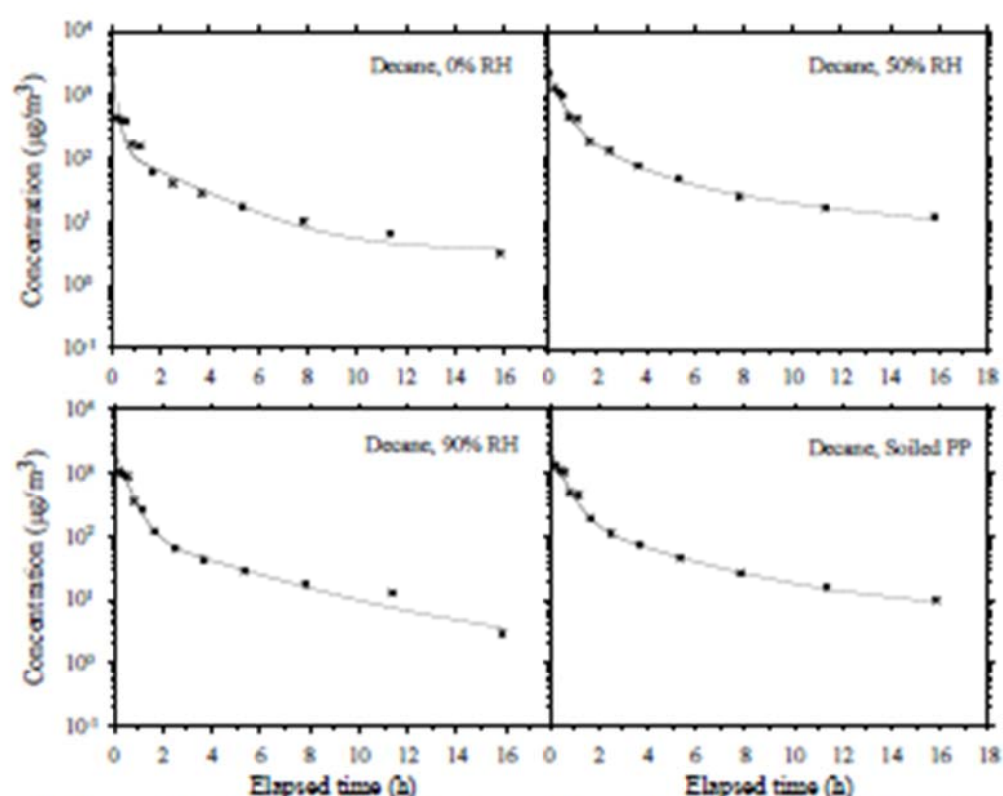


Figure 4. Measured and modeled concentration profiles of decane sorption to clean PP at 0%, 50%, 90% RH and to soiled PP at 50% RH. (x Measured, – Modeled)

Table 1. Kinetic parameter estimates*.

Sorbate	RH	k_{a1}	k_{d1}	k_{a2}	k_{d2}	GF
Toluene	0%	1.95	0.68	0.39	0.3×10^{-3}	0.30
	50%	1.73	0.40	0.33	1.8×10^{-3}	0.23
	90%	1.66	0.96	0.46	0.7×10^{-3}	0.27
	Soiled PP [†]	0.82	0.40	0.54	4.0×10^{-3}	0.10
Tetrachloroethylene	0%	1.20	0.23	0.16	5.0×10^{-3}	0.15
	50%	1.10	0.26	0.23	6.0×10^{-3}	0.17
	90%	1.16	0.42	0.16	14.7×10^{-3}	0.13
	Soiled PP [†]	1.11	0.41	0.20	1.8×10^{-3}	0.16
Decane	0%	4.28	0.39	0.36	16.3×10^{-3}	0.28
	50%	0.86	0.56	0.22	175×10^{-3}	0.11
	90%	1.04	0.20	0.17	10.0×10^{-3}	0.18
	Soiled PP [†]	0.72	0.33	0.10	80.0×10^{-3}	0.11

* Kinetic parameters are in unit of 1/h. [†] Sorption to soiled PP at 50% RH.

Effects of RH and Surface Soiling on K_{part}

Figure 4 shows the relationship between K_{part} and RH for the sorption of toluene, tetrachloroethylene and decane to clean PP and K_{part} for the sorption to soiled PP.

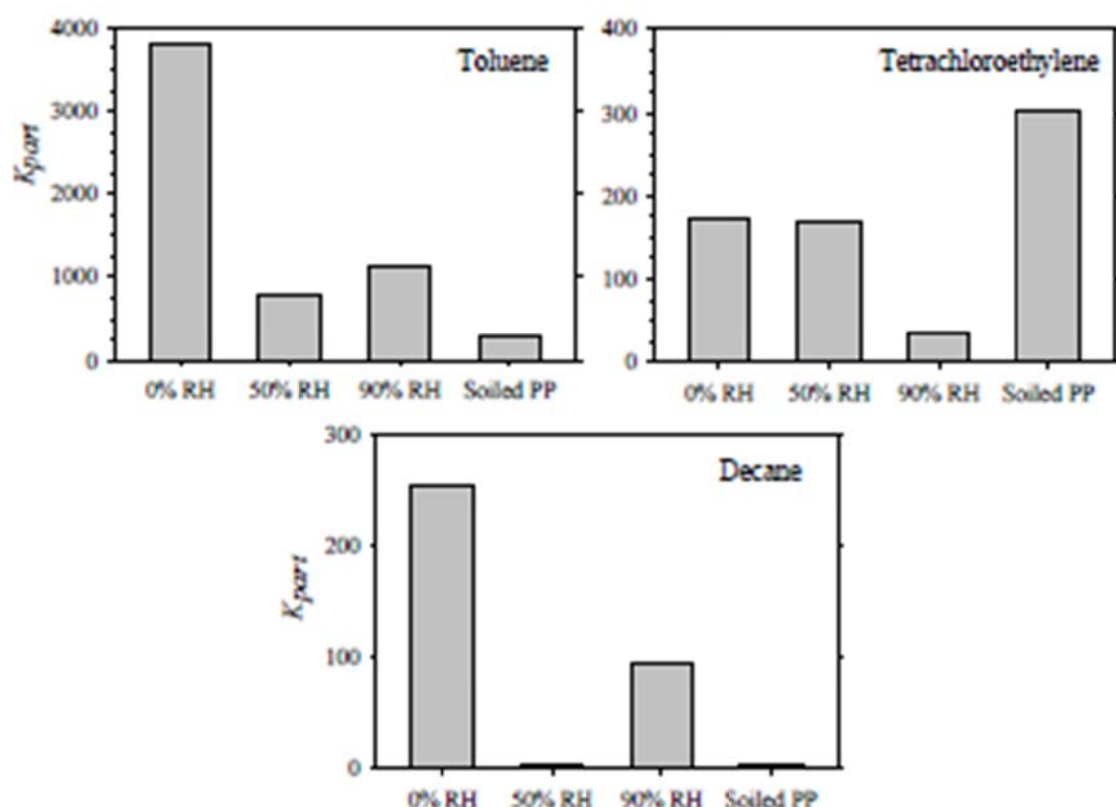


Figure 4. Effects of RH and surface soiling on the sorption capacity of organic compounds

The sorptive capacity of all organic sorbates was found to be highest at 0% RH, i.e. when the surface is dry and unsoiled. At 0% RH the K_{part} for toluene was found to be as high as 3.8×10^3 . The high sorptive uptake could be due to the significantly high permeability of toluene through PP (Bloch, 1999). Increasing the RH from 0% to 50% and to 90% decreased K_{part} by 80% and 70%, respectively. A similar trend occurred with the decane sorption as increasing the RH to 50% and to 90% decreased K_{part} by 98% and 63%, respectively. No effect of RH on the tetrachloroethylene sorption was observed when increasing the RH from 0% to 50%. However, further increase to the humid condition decreased K_{part} by 80%. Thus, the adsorbed water on PP apparently reduced the sorptive capacity of the organic sorbates. Comparing the sorptive uptakes at 90% RH shows that the K_{part} for toluene was found to be two orders of magnitude higher than the values of the two sorbates. At high humidity, toluene molecules may increasingly dissolve into the water film possibly developed on the PP surface since toluene has a higher Ostward solubility coefficient (Abraham et al., 1994). Furthermore, van der Waals and hydrogen bonding interactions of toluene at the water-gas interface were found to be stronger than those of tetrachloroethylene and decane (Roth et al., 2002).

The K_{part} values for the soiled PP and clean PP at 50% RH had the same order of magnitude for all three sorbates. The toluene sorption exhibited the highest change in K_{part} - almost three times. Toluene molecules tend to form the weak surface interactions with the soiled surface as reflecting by k_{at} . The value of k_{at} for the soiled PP, which should become the mass transfer rate from the bulk gas phase to a layer of the dirt, is less than half of that for the clean PP under the same moderate humidity. The adsorbed contaminate films could be thought as impedance for toluene partitioning into PP substrate.

CONCLUSIONS

This study assessed the effects of humidity and surface soiling on the sorptive capacity of the non- and chlorinated hydrocarbons to a simple polymeric surface. The modified surface with sorbed water or soiling exhibited smaller K_{part} with respect to a bare surface. The relative degree of these effects on the surface capacity depends on the intermolecular interactions between sorbates and surfaces and the permeability of sorbates through sorbent substrates. Among the tested sorbates, toluene was found to be most affected. Our next step is to evaluate the sorptive uptake of an organic sorbate that has a high hexadecane/air partition coefficient or a Lewis acid sorbate that has high water solubility.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is financially supported by the Mahasarakham University and Thailand Research Fund (TRF) under the contact no. RSA5580006. We thank the Centre of Laboratory Equipment and the Faculty of Engineering of the Mahasarakham University. We also thank Dr. Glenn Morrison of the Missouri University of Science & Technology, USA, for technical advice.

REFERENCES

- Abraham MH, Andonian-Haftvan J, Whiting GS et al (1994) 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. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transaction*, 2, 1777-1790.
- Bloch DR (1999) Polymer Handbook, Brandrup J, Immergut EH, Grulke EA eds, New York : Wiley-Interscience.
- Jorgensen RB, Dokka TH, Bjorseth O (2000) Introduction of a sink-diffusion model to describe the interaction between Volatile Organic Compounds (VOCs) and material surfaces. *Indoor Air*, 10, 27-38.
- NIOSH (2003a) NIOSH Manual of Analytical Methods 1501 (Aromatic Hydrocarbons), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- NIOSH (2003b) NIOSH Manual of Analytical Methods 1003 (Halogenated Hydrocarbons), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA.
- Roth CM, Goss K-U, Schwarzenbach R (2002) Adsorption of diverse set of organic vapors on the bulk water surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 252, 21-30.
- Singer BC, Hodgson AT, Destailats H et al (2005) Indoor sorption of surrogates for sarin and related nerve agents. *Environmental Science and Technology*, 39, 3203-3214.
- US EPA (2004) Revised Assessment of Detection and Quantitation Approaches, Washington, DC, U.S. Environmental Protection Agency (EPA-821-B-04-005).
- Weschler CJ, Nazaroff WW (2008) Semivolatile organic compounds in indoor environments. *Atmospheric Environment*, 42, 9018-9040.
- Yu C, Crump D (1998) A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings. *Building and Environment*, 33, 357-374.