

ผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุ ภายในอาคารต่อการดูดซับก๊าซอินทรีย์

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

ทับทิม ชาทิสวณ (Thabtim Chatsuvan)* ดร.มนิรัตน์ องค์กรณดี (Dr.Maneerat Ongwandee)^{1**}
ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ (Dr.Songchai Wiriyaumpaiwong)^{***}

บทคัดย่อ

กลไกการดูดซับและการคายก๊าซมลพิษอินทรีย์ที่วัสดุอาคารมีผลต่อรูปแบบการได้รับสัมผัสมลพิษของผู้อาศัยในอาคาร ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์และความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุอาคารต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ได้แก่ Toluene Tetrachloroethylene Decane Nicotine และ Phenol วัสดุในอาคารที่ทดสอบ คือ แผ่นพอลิโพรพิลีน ทำการทดลองการดูดซับในห้องขนาด 25 ลิตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% และ 90% อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสค่าพารามิเตอร์การดูดซับทางจลน์ทำนายจากแบบจำลองสมดุลมวลที่รวมกลไกการดูดซับที่ผิวหน้าและในเนื้อวัสดุด้วยวิธีเงินเนติกอัลกอริทึม ผลการศึกษพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุที่อยู่ในอากาศ มีค่าอยู่ในช่วง 10^0 – 10^4 เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 50% และ 90% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของ Toluene และ Decane ลดลง ในขณะที่ค่าของนิโคตินเพิ่มขึ้นที่ความชื้น 90% นอกจากนี้แผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานที่ปิดทึบมาก่อนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโทลูอีนลดลง 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

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

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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

Keywords : Partition coefficient, Indoor air quality, Polymer

บทนำ

สารมลพิษที่มักถูกพบภายในอาคาร เช่น Formaldehyde ใช้เป็นส่วนประกอบของกาวที่ใช้ในไม้อัด วอลส์เพเพอร์ Toluene เป็นตัวทำละลายสี ทาตกแต่ง Decane และ Limonene นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำหอมส่วนบุคคล น้ำหอมปรับอากาศ เป็นต้น [1] โดยส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดในอาคาร เช่น วัสดุตกแต่งภายใน อุปกรณ์สำนักงาน สารเคมีทำความสะอาด ของใช้ส่วนบุคคล เป็นต้น สารมลพิษที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศภายในอาคาร จะสูญหายออกนอกอาคารด้วยการระบายอากาศ หรือเข้าสู่ร่างกายของผู้ที่อาศัยภายในอาคารด้วยการหายใจหรือสัมผัสทางผิวหนัง นอกจากนี้สารมลพิษในอากาศอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันหรือมีการเคลื่อนที่ไปติดที่วัสดุอาคารและอาจมีปฏิกิริยาพื้นผิวร่วมกับ (Surface chemistry) [2] เมื่อสารมลพิษดูดซับที่วัสดุอาคารแล้ว (Sorption) ในขณะเดียวกันจะมีการคายโมเลกุลกลับสู่บรรยากาศภายในอาคาร (Desorption) ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปแบบการได้รับสัมผัสสารมลพิษอากาศ (Exposure) ของผู้อาศัยภายในอาคารได้ เช่น อาจมีผลให้ผู้อาศัยในอาคารได้รับความเข้มข้นมลพิษในระดับต่ำแต่เวลาในการสัมผัสสูงขึ้น อิทธิพลที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษประกอบด้วยปัจจัยหลายอย่าง ทั้งลักษณะกายภาพ/เคมีของสารมลพิษ คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ ระดับความชื้นในอากาศ ผิวหน้าวัสดุดูดซับที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และการมีอยู่ของก๊าซอื่นในบรรยากาศ งานวิจัยของ Paramapon [3]

ได้ศึกษาความจุของการดูดซับนิโคตินบนแผ่นวัสดุภายในอาคาร ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม พรม และผ้า ม่าน ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% และ 90 % และมีการผสมก๊าซแอมโมเนียร่วมด้วย พบว่า ความจุของการดูดซับนิโคตินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ การเพิ่มความชื้นในอากาศจาก 0% เป็น 90% ทำให้ค่าความจุการดูดซับของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 122% ของผ้าม่านเพิ่มขึ้น 46% และของพรมเพิ่มขึ้น 53% และเมื่อมีการใช้ก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 20 และ 40 พีพีเอ็มร่วมด้วย พบว่า ความจุการดูดซับนิโคตินของพรมลดลง 15-35% ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแย่งพื้นที่ดูดติดผิวระหว่างโมเลกุลนิโคตินและแอมโมเนีย นอกจากความชื้นและอิทธิพลของก๊าซอื่นในอากาศแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับ คือสิ่งสกปรกที่ติดบนผิวหน้าวัสดุ ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเปลี่ยนลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีไปจากเดิม และมีผลต่อเนื่องถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับสารอินทรีย์ตามไปด้วย

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

กล่องเครื่องสำอาง ปกแฟ้มเอกสาร ของขนม เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

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

วิธีการวิจัย

สารเคมี วัสดุทดสอบ และวิธีการเตรียม

สารดูดซับอินทรีย์ (Organic sorbates) ที่ใช้เป็นตัวแทนสารดูดซับ ได้แก่ กลุ่ม Aromatic : Toluene (C_7H_8) Decane ($C_{10}H_{22}$) และ Phenol (C_6H_6O) กลุ่ม Amine : Nicotine ($C_{10}H_{14}N_2$) และกลุ่ม Chlorinated คือ Tetrachloroethylene หรือ PERC (C_2Cl_4) วัสดุดูดซับ (Sorbent) ที่ใช้ทดสอบ คือแผ่นพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) หนา 1.8 มิลลิเมตรโดยล้างทำความสะอาดแผ่นวัสดุ PP ด้วยสารละลายผสม Methanol 1% และ Ethyl acetate 1% ในน้ำกลั่น แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง จากนั้นนำแผ่นวัสดุ PP มาเป่าในห้องสะอาด (Clean room) ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สำหรับการเตรียมแผ่น PP สกปรกคือนำแผ่น PP สะอาดไปตั้งทิ้งไว้ในห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวยให้สัมผัสกับอากาศภายในห้องเป็นเวลา 3 วัน หมายเหตุห้องทำงาน ห้องครัว และร้านเสริมสวย เป็นห้องทดสอบจริง เพื่อให้ผิวหน้าแผ่น PP เกิดความสกปรกจากสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง

ระบบทดลองและขั้นตอนการทดลอง

ภาพที่ 1 ระบบทดลองช่วงการดูดซับและการคายสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุ ทำการทดลองในห้องทดสอบขนาดความจุ 25 ลิตร ผึ่งภายในห้องทดสอบทั้งหมดถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นวัสดุ PP เริ่มการทดสอบโดยดูดสารอินทรีย์บริสุทธิ์ที่ต้องการทดสอบ

ด้วยเข็มฉีดยา (Micro-syringe) ปริมาตร 0.08 ไมโครลิตร ฉีดเข้าไปที่อุปกรณ์สร้างไอระเหยพร้อมทั้งปล่อยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิตร/นาที เข้าในห้องทดสอบ เป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที พร้อมปิดวาล์วที่ 2 เพื่อให้เกิดการดูดซับของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุ จากนั้นจึงผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% และ 90% เข้าห้องทดสอบด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตร/นาที เปิดวาล์ว 2 เริ่มเก็บตัวอย่างอากาศภายในห้องทดสอบ โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดแบบพกพาต่อกับหลอดดูดซับสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศ ด้วยอัตราการดูด 0.23 ลิตร/นาที เก็บตัวอย่างอากาศต่อเนื่องเป็นเวลา 18 ชม. จำนวนตัวอย่างที่เก็บ 12 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 หลอด (ยกเว้น Toluene เก็บ 16 ชม. จำนวน 9 ตัวอย่าง) ระบบการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

วิธีการเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์และการวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่าง Toluene, PERC และ Decane ใช้หลอดดูดซับคาร์บอน และทำการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) นำสารละลายที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแก๊สแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) โดยใช้โหมด SIM [5] สำหรับการเก็บตัวอย่าง Nicotine ใช้หลอดดูดซับเรซิน XAD-4 และทำการสกัดด้วยสารละลาย Ethyl acetate ผสม Triethylamine 0.01% [6] ส่วนการเก็บตัวอย่าง Phenol ใช้หลอดดูดซับเรซิน XAD-7 และทำการสกัดด้วย Methanol [7] การเปรียบเทียบปริมาณสารอินทรีย์ทำโดยใช้สารละลายมาตรฐาน Toluene PERC Decane Nicotine และ Phenol ที่ความเข้มข้น 5 ค่า ส่วนสารดูดซับที่บรรจุส่วนหลังของหลอดดูดซับได้นำมาสกัดและไม่พบสารอินทรีย์ปนเปื้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับทำโดยใช้สมการสมดุลมวลของสารอินทรีย์ที่รวมกลไกการดูดซับบนผิวหน้าวัสดุและเนื้อในวัสดุ ดังแสดงภาพที่ 2 ซึ่งเรียกว่าแบบจำลอง Surface and embedded sinks [8] ในที่นี้สารอินทรีย์เคลื่อนย้ายออกจากอากาศโดยกลไกการระเหยอากาศและการดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุและในขณะเดียวกันจะคายกลับสู่บรรยากาศอีกครั้งดังสมการ (1) โมเลกุลที่ติดที่ผิวหน้าจะแทรกเข้าไปสู่อากาศด้วยกลไกการแพร่ (Diffusion) หรือการละลาย (Solution) และในขณะเดียวกันสามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่ผิวหน้าได้ดังสมการ (2) และ (3)

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

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

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

โดยที่ C คือความเข้มข้นสารมลพิษในอากาศภายในห้อง (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) M คือมวลสารมลพิษที่ดูดซับบนผิววัสดุ (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) E คือมวลสารมลพิษที่ดูดซับในเนื้อวัสดุ (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) λ_a คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดติดที่แผ่นวัสดุ (ต่อชม.) λ_d คือสัมประสิทธิ์การคายที่แผ่นวัสดุ (ต่อชม.) k_1 คือสัมประสิทธิ์การดูดซับในเนื้อวัสดุ (ต่อชม.) k_2 คือสัมประสิทธิ์การคายจากเนื้อในวัสดุสู่ผิววัสดุ (ต่อชม.) และ λ คืออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบ (ต่อชม.)

ค่าพารามิเตอร์การดูดซับและการคายเชิงจลน์ λ_a , λ_d , k_1 และ k_2 ทำนายด้วยสมการ (1) (2) และ (3) โดยใช้ชุดข้อมูลค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศที่วัดได้ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) โดยใช้โปรแกรม MATLAB® โดยมีเงื่อนไขการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ

ค่าความแนบสนิทระหว่างข้อมูลจากการทดลองและการทำนาย (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

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

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

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. ลดลงไปประมาณ 30–97 % ซึ่งเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดติดที่ผิววัสดุหรือ λ_a มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์อื่นดังแสดงในตารางที่ 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) มีค่าความดันไอต่ำเท่ากับ 1.15 Pa [9] จึงมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปโมเลกุลที่ดูดติดผิวมากกว่าในรูปที่เป็นก๊าซ ในขณะที่ Toluene มีค่าความดันไอสูงกว่า Nicotine เกือบ 4 เท่า จึงพบความเข้มข้นในอากาศสูงกว่า เส้นกราฟความเข้มข้นของ Toluene ในช่วงแรกจึงมีความชันน้อยกว่าของ Nicotine และเมื่อพิจารณาในช่วง 6 ชม. หลังของการทดลองพบว่า PERC และ Phenol มีค่าความเข้มข้นในอากาศค่อนข้างสูงกว่า Toluene นั้นอาจเป็นเพราะ Toluene สามารถแทรกตัวเข้าไปในเนื้อ PP ได้ดี

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์การดูดซับเชิงจลน์ของสารอินทรีย์ λ_a , λ_d , k_1 , k_2 และค่าพารามิเตอร์สมมูล K_{part} ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% และ 90% ของสารอินทรีย์ทั้ง 5 สาร ซึ่งได้จากการทำนายด้วยสมการ (1) (2) และ (3) ที่ทำให้ได้ค่า GF ที่ต่ำที่สุด พบว่า ค่า GF อยู่ในช่วง 0.1-0.3 อย่างไรก็ตามผลการทดลองของ Toluene และ Nicotine มีค่า GF สูงกว่าสารอื่น เนื่องจากการทดลองของ Toluene มีจำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่าง (N) น้อยกว่า ส่วนการทดลอง Nicotine พบว่าเส้นกราฟความเข้มข้นในช่วง 4-10 ชม. มีลักษณะเป็นช่วงหักมุม ไม่แนบสนิทติดกับเส้นกราฟความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ λ_a , λ_d และ k_1 ของทั้ง 5 สาร พบว่าอยู่ในช่วงของเลขยกกำลัง (Order of magnitude) เดียวกัน ยกเว้นค่า λ_a ของ Nicotine ที่มีค่ามากกว่าสารชนิดอื่นประมาณ 10 เท่า สำหรับค่า k_2 ของสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าพารามิเตอร์ทั้งสาม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $10^{-4} - 10^{-1}$ ต่อชม. เมื่อพิจารณาค่า λ_a เทียบกับค่า λ_d ของทั้ง 5 สาร พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารอินทรีย์จากอากาศมาติดบนแผ่นวัสดุ มีค่ามากกว่าที่คายตัวกลับสู่อากาศอีกครั้ง เมื่อพิจารณาค่า k_1 เทียบกับค่า k_2 พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ติดที่ผิวหน้าวัสดุเข้าสู่เนื้อในวัสดุ มีค่ามากกว่าความเร็วในการเคลื่อนย้ายมวลสาร

กลับจากเนื้อในวัสดุสู่ผิวหน้า โดยเฉพาะ k_2 ของ Toluene มีค่าต่ำมาก นั้นหมายความว่าโมเลกุล Toluene ที่เคลื่อนที่แทรกเข้าไปสู่อากาศ หรือ ละลายเข้าไปในเนื้อในวัสดุ ต้องใช้เวลานานมากในการคายตัวกลับสู่บรรยากาศอีกครั้ง ซึ่งอาจถือได้ว่า PP เป็นวัสดุดูดซับที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Irreversible sink) แม้ระดับสารอินทรีย์ที่คายกลับมาอาจจะมีค่าความเข้มข้นค่อนข้างต่ำก็ตาม แต่ความเป็นอันตรายต่อผู้ที่ได้รับสัมผัสยังคงมีอยู่เนื่องจากระยะเวลาในการอาศัยในอาคารที่ยาวนาน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้ทำการศึกษาถึงการเสื่อมสภาพของแผ่น PP เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในการทดสอบต่ำกว่า 10-4% ซึ่งเป็นความเข้มข้นมลพิษอากาศในอาคารที่ตรวจพบโดยทั่วไป ดังนั้นผู้วิจัยคาดว่าสารอินทรีย์ที่ละลายเข้าไปในเนื้อวัสดุไม่มีหรือมีผลกระทบน้อยมากต่อโครงสร้างของแผ่น PP

2. ผลของความชื้นสัมพัทธ์ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ระเหยที่แผ่นวัสดุ PP

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{part} ของสารอินทรีย์ที่แผ่น PP ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0%, 50% และ 90% พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% Nicotine มีค่า K_{part} สูงกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น Nicotine เป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหยมีความดันไอต่ำกว่าสารอินทรีย์อื่น 1-3 เท่า จึงมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปของโมเลกุลดูดติดผิวมากกว่าที่จะอยู่ในรูปของก๊าซ [3] เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็น 50% มีผลทำให้ค่า K_{part} ของ Toluene, Decane และ Phenol เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกรณีไม่มีโมเลกุลของน้ำในอากาศ โดย Toluene ที่มีค่า K_{part} ลดลง 14 เท่า Decane 40 เท่า และ Phenol 4 เท่า อาจเป็นเพราะโมเลกุลของน้ำที่ติดที่ผิวหน้าวัสดุอาจกลายเป็นชั้นขวางกั้นสารอินทรีย์โดยเฉพาะ Toluene และ Decane ไม่ให้แทรกตัว (Partitioning) เข้าสู่

เนื้อใน PP ได้สะดวก [10] 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 สามารถสร้างพันธะการดูดซับกับสารอื่นได้ผ่านทางแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงพันธะไฮโดรเจนดังตารางที่ 2 อย่างไรก็ตาม Phenol ซึ่งสามารถดูดซับกับสารอื่นผ่านแรงทั้ง 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 (6)

$$K_{part,surface} = \frac{\lambda_a}{\lambda_d} \quad (6)$$

การเกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำกับแผ่นวัสดุ 2 แรง คือแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงที่เกิดจากแรงกรด-เบส โดยแรงการดูดซับแบบไม่เจาะจงในที่นี้ คือแรง

แวนเดอร์วาลส์ สำหรับตัวเลขเชิงปริมาณของแรงยึดเหนี่ยวชนิดนี้ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของสารอินทรีย์ระหว่างของเหลว Hexadecane และ อากาศ ($K_{hexadecane/air}$) ดังตารางที่ 2 ในงานวิจัยนี้ไม่เลือกใช้ค่าความดันไอ (Vapor pressure) ของสารอินทรีย์เป็นตัวแทนของแรงแวนเดอร์วาลส์เช่นงานวิจัยอื่น เนื่องจากความดันไอของสารอินทรีย์ประเภทมีขั้ว (Polar compounds) ได้รวมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนไว้ด้วย แผ่น PP จัดเป็นวัสดุที่มีเฉพาะแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับผ่านทางแรงแบบไม่เจาะจงเท่านั้น มีค่าแรงแวนเดอร์วาลส์ 25.7 มิลลิจูล/ตร.ม. [11] ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ทดสอบกับ ค่า $K_{part,surface}$ ได้ดังกราฟความสัมพันธ์ภาพที่ 5 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% และ 90%

ผลการวิเคราะห์พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่า $\log K_{hexadecane/air}$ และ $\log K_{part,surface}$ ของสารอินทรีย์ที่ทดสอบ 5 สาร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 90% ได้ค่า R^2 มากกว่า 0.9 แต่ความสัมพันธ์เชิงเส้นกลับน้อยลงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 90% พื้นผิววัสดุมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทั้งเนื่องจากความเป็นเนื้อเดิมของ PP และการมีโมเลกุลของน้ำปกคลุมทั่วผิวหน้าที่ความชื้นอากาศสูง ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดติดผิวของสารอินทรีย์ที่ผิวชั้นบนจึงเป็นไปตามทฤษฎีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ผ่านทางแรงแบบไม่เจาะจงแสดงได้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยค่าความสามารถของ PP ในการดูดซับสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามแรงแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีค่ามากขึ้น สำหรับกรณีที่ความชื้น 50% ซึ่งไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง อาจเป็นไปได้ว่าพื้นผิววัสดุดูดซับถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ ส่วนที่ปกคลุมด้วย

โมเลกุลน้ำกับส่วนที่ไม่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลน้ำ ดังนั้นพลังงานการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวจึงไม่มีความสม่ำเสมอ

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 มีพฤติกรรมดูดซับ Toluene ที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะแผ่นวัสดุที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศในห้องทำงานมีค่า K_{part} ลดลงกว่า 64% เมื่อเทียบกับค่าของแผ่นสะอาด สิ่งปนเปื้อนในอากาศในอาคารมีทั้งอนุภาคขนาดเล็กและก๊าซอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสามารถตกทับถมหรือดูดติดที่ผิวหน้าวัสดุ PP ได้ จึงทำให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของแผ่นวัสดุเปลี่ยนแปลงไปจากการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับแผ่นวัสดุ PP โดยตรง กลายเป็นการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารอินทรีย์กับชั้นสิ่งสกปรกแทน นอกจากนี้ชั้นสิ่งสกปรกที่ปกคลุมผิวหน้าของแผ่น PP อาจขวางกั้นโมเลกุลของ Toluene ไม่ให้เคลื่อนที่แทรกซึมเข้าเนื้อ PP ได้สะดวก และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของ K_{part} ของทั้ง 3 ห้อง พบว่าแผ่นวัสดุ PP ที่สัมผัสกับอากาศในห้องทำงานมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าห้องครัวและร้านเสริมสวย เนื่องจากห้องทำงานเป็นห้องปิดทึบมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศค่อนข้างต่ำเพียง 0.7 รอบต่อชม. เมื่อเทียบกับห้องครัวที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 8 รอบต่อชม. และร้านเสริมสวย 12 รอบต่อชม. อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่ำมีผลทำให้เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ในอากาศภายในห้องได้มาก จึงมีโอกาที่จะสะสมที่ผิวหน้าของแผ่นวัสดุได้มากกว่าห้องที่มีการระบายอากาศสูง

สรุปผลการวิจัย

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีผลต่อพฤติกรรมดูดซับของก๊าซมลพิษอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุ PP โดยสารอินทรีย์ที่มีความสามารถแทรกตัวเข้าสู่เนื้อในพอลิเมอร์ได้ดี เช่น Toluene และ Decane จะดูดซับได้น้อยลง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดติดที่ผิวหน้าอาจเป็นอุปสรรคต่อการแทรกตัวของสารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดติดผิวของ PP สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับแรงกระทำแบบไม่เจาะจงของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 90% ส่วนความสกปรกที่ผิวหน้าวัสดุอันเกิดมาจากการสัมผัสอากาศภายในอาคารลักษณะต่างๆ สามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดูดซับของแผ่นวัสดุให้ต่างไปจากเดิม โดยพบว่าห้องที่มีการระบายอากาศต่ำมากจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของแผ่นวัสดุเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ดังนั้นการทำความเข้าใจความสามารถในการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์ของวัสดุอาคารควรคำนึงถึงผลของปัจจัยทั้งสองด้วย ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องถึงรูปแบบการได้รับมลพิษของผู้ที่อาศัยในอาคารนั้น งานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาเชิงสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ผ่านการดูดซับก๊าซมลพิษอินทรีย์แล้ว รวมทั้งแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของวัสดุและสารอินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

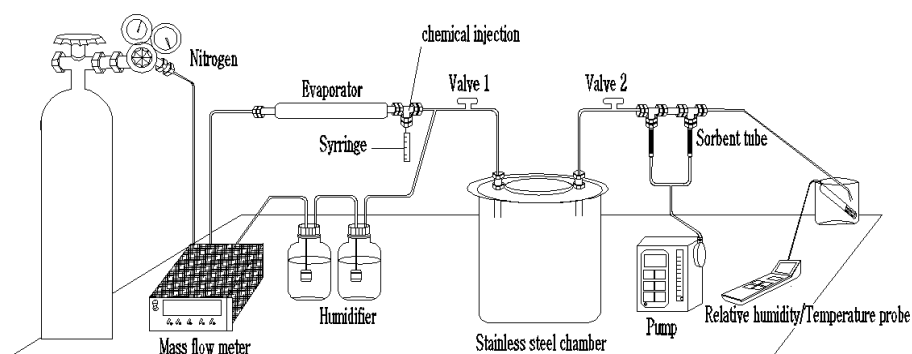
1. Godish T. Indoor air pollution control. Michigan: Lewis; 1989.
2. Ongwandee M, Glenn C. Morrison. Influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to capet and latex-painted gypsum board. *Environmental Science and Technology*. 2008; 42(15): 5415-5420.
3. Paramapon S, Maneerat O, Pech P. The efface of relative humidity and gaseous ammonia on the sorption of nicotine onto indoor material. *KKU Res J*. 2011; 16(1): 52-62. Thai.
4. Abraham MH, Andonian-Haftvan J, Whiting GS, Leo A, Taft RS. The factors that influence the solubility of gases and vapors in water at 298 K and a new method for its determination. *Journal of The Chemical Society, Perkin Transaction*. 1994; 2: 1777-1790.
5. NIOSH Manual of Analytical Methods 1501 (Aromatic Hydrocarbons), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Control and Prevention, USA. 2003.
6. NIOSH Manual of Analytical Methods 2551 (Nicotine), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA. 1998.
7. NIOSH Manual of Analytical Methods 2546 (Cresol and Phenol), National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, USA. 1994.
8. 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.
9. Robert C Weast. Handbook of chemistry and physics : a ready reference book of chemical and physical data. Florida: Chemical Rubber; 1970.
10. 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.
11. Van CJ Oss. Interfacial forces in a aqueous media. New York: Marcel Dekker; 1994.

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ทางจลน์ของการดูดซับของสารอินทรีย์ที่แผ่นวัสดุ PP

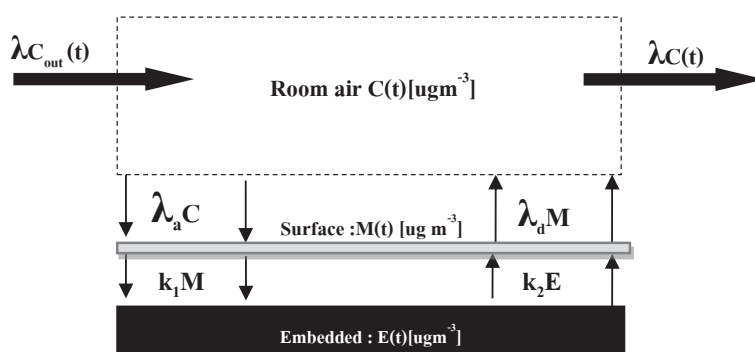
Sorbate	RH	λ_a (1/h)	λ_d (1/h)	k_1 (1/h)	k_2 (1/h)	GF
Toluene	0%	1.95	0.68	0.39	0.3×10^{-3}	0.30
	50%	1.72	0.40	0.32	1.8×10^{-3}	0.22
	90%	1.76	0.96	0.46	0.7×10^{-3}	0.26
PERC	0%	1.20	0.23	0.15	5.0×10^{-3}	0.14
	50%	1.10	0.26	0.23	6.0×10^{-3}	0.17
	90%	1.16	0.42	0.16	14.7×10^{-3}	0.13
Decane	0%	8.01	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

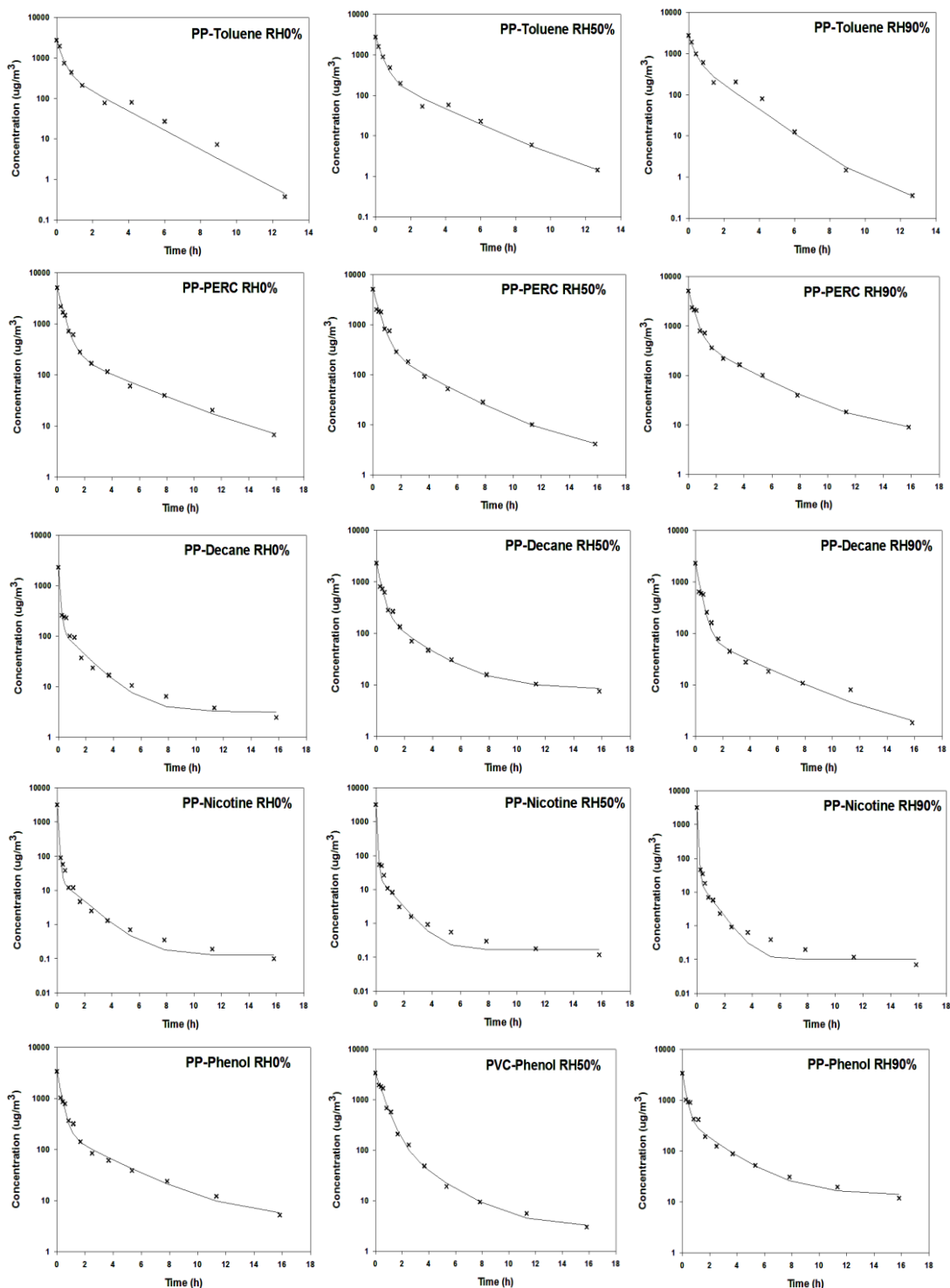
สารอินทรีย์	$\text{Log } K_{\text{hexadecane/air}}$	ความดันไอ (Pa)	แรงพันธะไฮโดรเจน (mJ/m^2)	
			ความเป็นกรด	ความเป็นเบส
Toluene	3.33	3.55	0.00	0.14
PERC	3.58	3.38	0.00	0.00
n-decane	4.69	2.37	0.00	0.00
Nicotine	5.87	1.15	0.00	0.52
Phenol	3.77	1.92	0.60	0.31



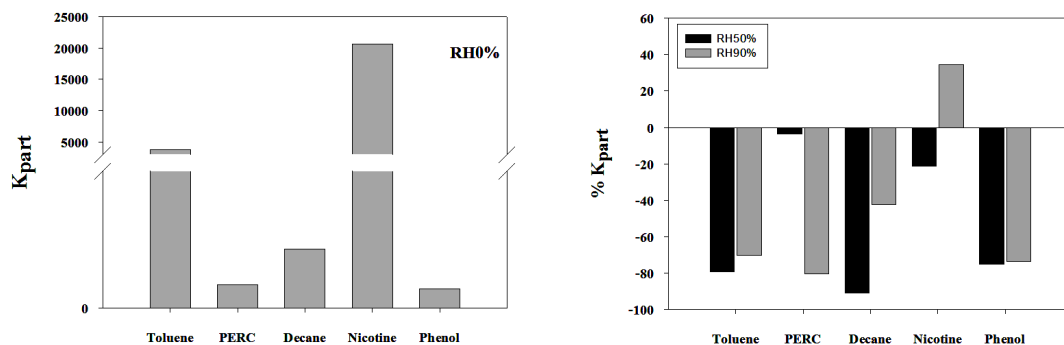
ภาพที่ 1 ระบบทดลองช่วงการดูดซับและการคายสารอินทรีย์บนแผ่นวัสดุ



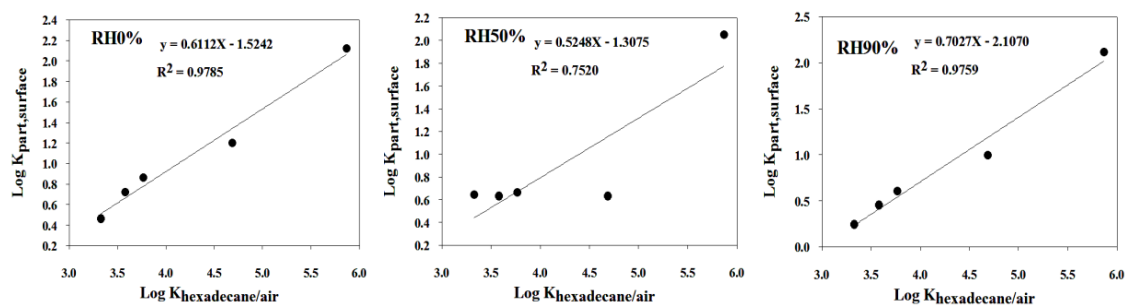
ภาพที่ 2 แบบจำลองคุณภาพอากาศที่รวมการดูดซับที่พื้นผิวและในเนื้อวัสดุ



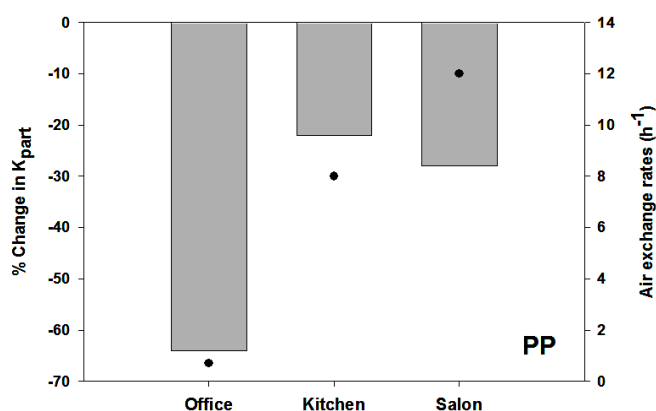
ภาพที่ 3 ลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในอากาศภายในห้องทดสอบที่ติดตั้งแผ่นวัสดุ PP (สัญลักษณ์ x คือความเข้มข้นที่ได้จากการทดลอง, - คือค่าความเข้มข้นที่ได้จากโมเดล)



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



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



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความจุในการดูดซับสาร Toluene บนแผ่น PP ที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศทั้ง 3 ห้องเทียบกับ แผ่นวัสดุ PP ที่สะอาดที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50% (• อัตราการระบายอากาศภายในห้อง)