

# อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์และก๊าซแอมโมเนียต่อการดูดซับ นิโคตินบนวัสดุภายในอาคาร

## The Effects of Relative Humidity and Gaseous Ammonia on the Sorption of Nicotine onto Indoor Materials

ปรมาภรณ์ สวรรยาพานิช (Paramaporn Sawanyapanich)<sup>1</sup>

มนีรัตน์ องค์กรณดี (Maneerat Ongwandeek)<sup>2\*</sup>

เพชร เพ็งชัย (Petch Pengchai)<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

กลไกการดูดซับและการคายของสารมลพิษควันบุหรี่บนวัสดุภายในอาคาร สามารถใช้ระยะเวลาการได้รับสารมลพิษของผู้อาศัยให้ยาวนานขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อหาความจุของการดูดซับนิโคตินบนวัสดุอาคาร 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม ผ้าม่าน และพรม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 0 50 และ 90% ทำการทดลองโดยใช้ห้องทดสอบขนาด 10 ลิตรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ก๊าซนิโคตินได้จากการระเหยนิโคตินของเหลวบริสุทธิ์ 50 มก.ล. และควบคุมอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบเท่ากับ 0.012 ต่อ ชม. พารามิเตอร์ทางจลน์ของการดูดซับและการคายหาได้จาก การเข้ากันระหว่างค่าความเข้มข้นของนิโคตินในอากาศที่วัดได้ และค่าที่ได้จากการพยากรณ์ตามสมการสมดุลมวลด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นตรง นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของก๊าซแอมโมเนียต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินบนพรม ผลการทดลองพบว่า ความจุการดูดซับนิโคตินของพรมและบนผ้าม่านมีค่าใกล้เคียงกัน และสูงกว่าความจุของเหล็กกล้าไร้สนิมประมาณ 10-100 เท่า การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 0 เป็น 90% ทำให้ค่าความจุการดูดซับของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 122%, ของผ้าม่านเพิ่มขึ้น 46% และของพรมเพิ่มขึ้น 53% เมื่อมีการใช้ก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 20 และ 40 พีพีเอ็มร่วมด้วย พบว่า ความจุการดูดซับนิโคตินของพรมลดลง 15-35%

### Abstract

Sorptive interactions of constituents of environmental tobacco smoke with indoor surfaces can extend the time that occupants are exposed to these organic pollutants. This research was to investigate the overall sorptive capacity of stainless steel, curtain, and carpet for nicotine at 0, 50, and 90% relative humidity (RH). Experiments were conducted using a 10-L stainless steel chamber. Nicotine was introduced into the chamber by flash evaporating of 50- $\mu$ L liquid nicotine. The air exchange rate of the test chamber was controlled at 0.012 per hour. Kinetic sorption

<sup>1</sup>มหาวิทยาลัยสุโขทัย (สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

\* corresponding author, e-mail: maneerat.o@msu.ac.th

parameters were determined by fitting a mass balance model to experimental results using non linear regression. The influence of gaseous ammonia on the sorption of nicotine on carpet was also studied. Results show that the nicotine capacities of carpet and curtain were of similar magnitude and were 2-3 orders of magnitude higher than stainless steel. Increasing the RH from 0 to 90% caused an increase in the surface capacity by 122% for stainless steel, 46% for curtain, and 53% for carpet. In the presence of 20- and 40-ppm ammonia, the nicotine capacity for carpet decreased by 15-35%.

**คำสำคัญ:** นิโคติน, การดูดซับ, วัสดุภายในอาคาร

**Keywords :** Nicotine, Sorption, Indoor materials

## บทนำ

ในปัจจุบันมีผู้เสียชีวิตจากบุหรี่เป็นจำนวนมาก ในจำนวนนี้ประกอบด้วยผู้สูบบุหรี่ และผู้ที่ได้รับควันบุหรี่โดยทางอ้อมหรือที่เรียกว่าควันบุหรี่มือสอง (Secondhand smoke) ซึ่งควันบุหรี่เหล่านี้ประกอบด้วยสารเคมีมากถึง 4,000 ชนิด ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ นิโคติน (Nicotine) นิโคตินเป็นสารประกอบจำพวกอะมีน (Amines) กึ่งระเหย (Semi volatile) และเป็นสารสำคัญที่ทำให้คนติด ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท ระบบหัวใจ เส้นเลือด และไต (กระทรวงสาธารณสุข, 2530) ถึงแม้ว่าในหลายประเทศจะมีกฎหมายห้ามสูบบุหรี่ในที่สาธารณะแล้วก็ตาม แต่ผลกระทบของสารพิษในควันบุหรี่ต่อผู้ไม่สูบบุหรี่ยังคงมีอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากสารพิษในควันบุหรี่หลายชนิดรวมทั้งนิโคติน มีความสามารถในการดูดซับ (Sorption) บนวัสดุก่อสร้างและตกแต่งภายในอาคารได้เป็นอย่างดี โดยสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) และกึ่งระเหยในควันบุหรี่เหล่านี้เมื่อถูกปล่อยออกสู่อากาศในระหว่างที่มีการสูบบุหรี่จะสามารถดูดซับเข้าไปบนวัสดุภายในอาคารได้ แต่สารพิษจากควันบุหรี่จะยังคงอยู่ภายในห้องต่อไปเป็นเวลานานถึงแม้ว่าการสูบบุหรี่จะยุติลงแล้วก็ตาม รวมทั้งภายในห้องมีการระบายอากาศตามปกติ ที่เป็นเช่นนี้เพราะโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ดูดซับอยู่บนหรือภายในวัสดุอาคารจะค่อยๆ คาย (Desorption) ตัวเองกลับสู่บรรยากาศภายในห้องอีกครั้ง เพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ (Steady state) ซึ่งระดับของนิโคตินที่มาจาก

การคายกลับในภายหลังนี้จะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นระหว่างการสูบกี่ตาม แต่ระดับความเป็นอันตรายที่ผู้อยู่อาศัยจะได้รับก็ยังคงสูงอยู่ เนื่องจากระยะเวลาของการอยู่อาศัยภายในอาคารที่ยาวนานนั่นเอง

การทำความสะอาดหรือกำจัดกลิ่นบุหรี่ที่ติดอยู่บนวัสดุภายในห้องที่เคยมีการสูบบุหรี่มาก่อนด้วยวิธีธรรมดา เช่น การเป่าห้องด้วยลม หรือการเปิดหน้าต่างให้มีการระบายอากาศเพิ่มขึ้น จะสามารถกำจัดสารมลพิษควันบุหรี่ที่ติดอยู่บนวัสดุอาคารได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะนิโคตินมีอัตราการคายตัวที่ต่ำมาก จากงานวิจัยของ Ongwandee et al (2005) และ Ongwandee and Morrison (2008) แสดงให้เห็นถึงกลไกที่ควบคุมปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยได้ใช้ Trimethylamine (TMA) แทนนิโคตินในการทดลองเนื่องจากสะดวกและใช้เวลาทดสอบแต่ละครั้งสั้นกว่า ผลการศึกษาพบว่า ก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 4 - 40 พีพีเอ็ม (ส่วนในล้านส่วน) ลดความสามารถในการดูดซับ TMA บนพื้นผิวซิลิกา พรอม และแผ่นยิปซัมทาสีได้มากกว่า 80% เทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้แอมโมเนีย และพิสูจน์ให้เห็นว่าการที่พื้นผิวมีความจุในการดูดซับ TMA ลดลงเป็นผลจากการแข่งขันการดูดซับ (Competitive adsorption) ระหว่างโมเลกุล TMA และแอมโมเนีย นอกจากนี้ ผลการศึกษาของ Ongwandee and Morrison (2008) ; Won et al (2001) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศภายในห้องทดสอบ มีผลให้ความจุของการดูดซับสารอินทรีย์บนผิววัสดุเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. หาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับ (Adsorption rate constant) สัมประสิทธิ์การคาย (Desorption constant) และความจุของการดูดซับ (Sorption capacity) ของนิโคตินบนผิววัสดุภายในอาคาร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศต่างๆ กัน
2. หาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับ สัมประสิทธิ์การคาย และความจุของการดูดซับของนิโคตินบนพรม ภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีก๊าซแอมโมเนีย 20 และ 40 พีพีเอ็ม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ กัน

## วิธีการวิจัย

### สารเคมี วัสดุและการเตรียม

1. สารดูดซับ (Sorbate) : นิโคตินบริสุทธิ์ ในรูปของเหลว เลขทะเบียน CAS 54-11-5, สูตรเคมี  $C_{10}H_{14}N_2$ , น้ำหนักโมเลกุล 162.24 กรัม/โมล, ความหนาแน่น 1.01 กรัม/มล., จุดหลอมเหลว  $-79^{\circ}\text{C}$ , จุดเดือด  $243-248^{\circ}\text{C}$

### 2. วัสดุดูดซับ (Sorbent)

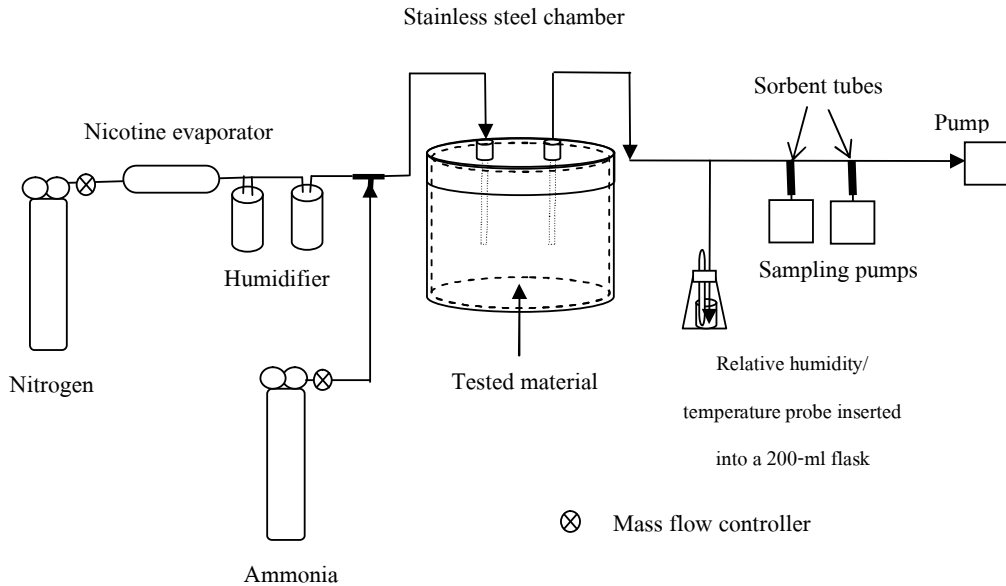
ก. พรมชนิด Regal Red Loop การผลิตพรมใช้วิธีตัดเป็นหย่อมๆ หรือเป็นห่วงซ้อนกัน และใช้สารละลายในการย้อมสีพรม ซึ่งเส้นใยแต่ละเส้นทำจากโพลีโพลีเอสเตอร์ 100% และเส้นใยมีความสูง 6.5 มม. ซึ่งพรมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

ข. ผ้าผ่านสำเร็จรูปมีสีเขียว เนื้อหนาพิเศษ ไร้รอยต่อ ทอภายในตัว ทำจากผ้าฝ้ายและโพลีเอสเตอร์  
ค. เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ผิวขัดเงา ด้วยไฟฟ้า

การเตรียมวัสดุทดสอบทำโดยการตัดพรมปูพื้นและผ้าผ่านที่ยังไม่เคยใช้ ให้มีขนาดเท่ากับที่จะติดตั้งในห้องทดสอบ นำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 2-3 สัปดาห์ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ระเหยที่ติดอยู่บนวัสดุทดสอบออกก่อน

### ระบบทดลองและขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดลองโดยใช้ห้องทดสอบขนาดเล็กทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดความจุ 10 ลิตร ซึ่งภายในติดตั้งวัสดุที่จะทดสอบ เริ่มทำการทดลองโดยระเหยนิโคตินของเหลวบริสุทธิ์ 5 มล. ให้กลายเป็นไอพร้อมทั้งผ่านก๊าซไนโตรเจน 40 มล./นาที่ เข้าไปในห้องทดสอบเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการดูดซับนิโคตินบนพรม ทั้งนี้ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซนิโคตินในห้องทดสอบมีค่าตามการคำนวณเท่ากับ 0.5 ก./ลบ.ม. [5 มก./10 ล.] จากนั้นจึงผ่านก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซแอมโมเนียผสมไนโตรเจน ที่มีความชื้นในก๊าซตามที่กำหนด ได้แก่ 0, 50 และ 90% เข้าสู่ห้องทดสอบด้วยอัตรา 200 มล./นาที่ จากนั้นใช้ปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพาต่อกับหลอดเก็บตัวอย่างซึ่งภายในบรรจุเรซินดูดซับชนิด XAD-4 (SKC®, USA) ดูดด้วยอัตราการไหล 80 มล./นาที่ เพื่อเก็บตัวอย่างนิโคตินในห้องทดสอบ และใช้หลอดเก็บตัวอย่างภายในบรรจุเรซินดูดซับชนิด Silica Gel เคลือบด้วยกรดซัลฟูริก (SKC®, USA) เพื่อเก็บตัวอย่างแอมโมเนีย ทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 13 ครั้ง เป็นเวลาต่อเนื่อง 72 ชม. ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1. ระบบทดลอง

**การวิเคราะห์ทางเคมี**

การวิเคราะห์หาปริมาณนิโคตินทำโดยสกัดเรซินในหลอดเก็บตัวอย่าง XAD-4 ด้วยสารละลาย Ethyl acetate ผสม Triethylamine 0.01% ปริมาตร 1 มล. เขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือนด้วยเสียง แล้วนำสารละลายที่ได้จากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatographer/Mass spectrometer (GC/MS) เพื่อหาความเข้มข้นนิโคตินในอากาศณเวลาเก็บตัวอย่างต่างๆ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์การดูดซับนิโคตินบนวัสดุที่ทดสอบ สำหรับการหาปริมาณแอมโมเนีย ทำโดยสกัดเรซินในหลอดเก็บตัวอย่าง Silica gel ด้วยน้ำกลั่น 20 มล. เขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือนด้วยเสียง แล้วจึงแยกเฉพาะส่วนสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SevenGo pro (Mettler Toledo® AG) ต่อกับหัววัดเมมเบรนสำหรับวัดแอมโมเนีย

**แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับ ( $k_a$ ) และสัมประสิทธิ์การคาย ( $k_d$ ) ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การดูดซับและการคายของมลพิษ (ในที่นี้ คือ นิโคติน) บนผิววัสดุเชิงจลศาสตร์ (Kinetic

adsorption/desorption models) แบบจำลองนี้พัฒนาขึ้นบนหลักการที่กำหนดให้ผิววัสดุเป็นทั้งแหล่งดูดซับสารมลพิษ (Sink) และแหล่งกำเนิดมลพิษเอง (Source) เนื่องจากผลของการคายตัว วัสดุดูดซับเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด (Homogenous) การดูดซับผิวเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ (Reversible) และการแพร่ของสารถูกดูดซับเข้าสู่ในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยมาก แบบจำลองนี้สามารถอธิบายด้วยสมการสมดุลมวลของสารมลพิษในอากาศและบนผิววัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังสมการ 1 และ 2 ตามลำดับ (Van Loy et al., 2001)

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{in} - QC - k_a CA + k_d M^n A \quad (1)$$

$$A \frac{dM}{dt} = A(k_a C - k_d M^n) \quad (2)$$

โดยที่

$C$  = ความเข้มข้นนิโคตินในอากาศภายในห้อง (มก./ลบ.ม.)

$C_{in}$  = ความเข้มข้นนิโคตินในอากาศที่ไหลเข้าห้อง (มก./ลบ.ม.)

- $V$  = ปริมาตรอากาศภายในห้อง (ลบ.ม.)  
 $Q$  = อัตราการไหลของอากาศเข้าห้อง (ลบ.ม./ชม.)  
 $A$  = พื้นที่ผิวของวัสดุทดสอบ (ตร.ม.)  
 $k_a$  = สัมประสิทธิ์อัตราการดูดติดผิว (ม./ชม.)  
 $k_d$  = สัมประสิทธิ์การคาย (ต่อชม.)  
 $M$  = มวลนิโคตินที่ดูดซับอยู่บนวัสดุทดสอบ (มก./ตร.ม.)  
 $n$  = ค่าคงที่เลขยกกำลัง

ดังนั้นค่า  $k_a$ ,  $k_d$  และ  $n$  สามารถหาได้จากสมการ 1 และ 2 ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression) โดยใช้ค่าความเข้มข้นนิโคตินที่วัดอย่างต่อเนื่องตามเวลา และใช้วิธีของ Runge-Kutta ช่วยในการทำนายค่าพารามิเตอร์ ค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version 7.6.0.324 (R2008a) สำหรับค่าความจุของการดูดซับนิโคตินบนพรม สามารถแสดงได้ดังสมการ 3 (Van Loy et al., 2001)

$$k_e = \left( \frac{k_a}{k_d} \right)^{\frac{1}{n}} \times C_e^{\frac{1}{n}-1} \quad (3)$$

โดยที่

$C_e$  = ความเข้มข้นนิโคตินในอากาศ ณ สภาวะสมดุล (มก./ลบ.ม.)

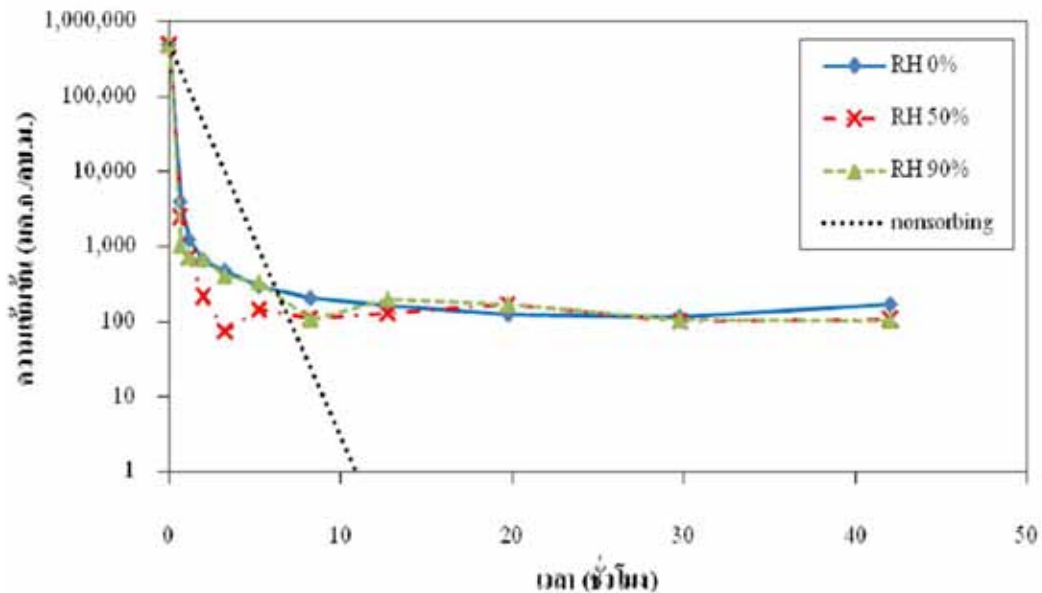
$k_e$  = Equilibrium partition coefficient (ม.)

ค่า  $k_e$  ยิ่งมาก แสดงถึงพื้นผิวมีความจุในการดูดซับนิโคตินได้มาก

## ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของนิโคตินในอากาศภายในห้องทดสอบ

รูปที่ 2 แสดงค่าความเข้มข้นของนิโคตินในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนภายในห้องทดสอบที่ใส่พรมไว้ภายใน ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90 %



รูปที่ 2. ความเข้มข้นของนิโคตินในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนภายในห้องทดสอบที่ใส่พรมไว้ภายใน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90%

กราฟการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นนิกโคตินในอากาศเทียบกับเวลา มีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกการทดลอง นั่นคือ ความเข้มข้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงครึ่งหลังของการทดลอง ค่าความเข้มข้นนิกโคตินในอากาศหลังจากทดลองเป็นเวลา 50 นาที พบว่า มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1,000 - 4,000 มก.ก./ลบ.ม. ซึ่งต่ำกว่าค่าความเข้มข้นเริ่มต้นทางทฤษฎี 0.5 ก./ลบ.ม. เป็นอย่างมาก ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเกิดการดูดซับของนิกโคตินบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบ ในขณะที่กลไกการระบายอากาศสามารถกำจัดนิกโคตินออกนอกห้องทดสอบ คิดเป็นเพียง 0.21% เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของนิกโคตินในอากาศระหว่างวัสดุที่ไม่มีความสามารถในการดูดซับ ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง กับวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับและคายสารมลพิษในอากาศตามสภาพความเป็นจริง พบว่า ค่าความเข้มข้นนิกโคตินในอากาศของพื้นผิวที่ไม่มีความสามารถในการดูดซับ จะมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงกว่า และความเข้มข้นจะลดลงช้ากว่ากรณีวัสดุมีความสามารถในการดูดซับ โดยมีเพียงปัจจัยการระบายอากาศเป็นกลไกเดียวที่กำจัดนิกโคตินออกจากอากาศ หลังจากนั้น 11 ชั่วโมงค่าความเข้มข้นจะลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่วัสดุที่พื้นผิวมีความสามารถในการดูดซับ ค่าความเข้มข้นของนิกโคตินในอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นจะคงอยู่ในอากาศต่อไปอีกเป็นระยะเวลาานาน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากนิกโคตินส่วนใหญ่ในอากาศถูกดูดซับไว้บนผิวของวัสดุทดสอบ และจะคายตัวกลับออกมาในอากาศอย่างช้าๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ในสภาพความเป็นจริง การกำจัดนิกโคตินที่ดูดซับบนวัสดุภายในอาคารด้วยวิธีการระบายอากาศเพียงอย่างเดียว ไม่อาจกำจัดนิกโคตินให้ลดลงได้ในระยะเวลาอันสั้น

ตาราง 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับและการคายของวัสดุทดสอบทั้ง 3 ชนิด ที่ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มข้นก๊าซแอมโมเนียต่างๆ กัน พบว่า ค่า  $R^2$  (Coefficient of determination) จากการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นนิกโคตินในอากาศที่วัดได้จริงและความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายค่าพารามิเตอร์ด้วยแบบจำลองสมการ (1) และ (2) มีค่าสูงกว่า 0.99 ในทุกการทดลอง สำหรับค่าความเข้มข้น  $C_0$  หรือความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลที่ใช้สำหรับการคำนวณค่า  $k_1$  ด้วยสมการ (3) นั้น ได้จากค่าความเข้มข้นของนิกโคตินในอากาศในช่วงท้ายของการทดลองที่ค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อย่างไรก็ดี งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทดสอบปรากฏการณ์ดูดซับและการคายของนิกโคตินด้วยระยะเวลาของแต่ละการทดลองเท่ากับ 72 ชม. ซึ่งอาจไม่นานพอที่จะทำให้ความเข้มข้นนิกโคตินเข้าสู่สภาวะสมดุลที่แท้จริงได้ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการทดลองนานกว่า 4 เดือน ดังนั้นค่า  $k_1$  ที่แสดงจึงเป็นค่าเฉพาะจากการทดสอบในระยะเวลา 72 ชม. ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบความจุการดูดซับระหว่างชนิดของวัสดุ และสภาพแวดล้อมต่างๆ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ทางจลน์  $k_1$  และ  $k_2$  ไม่ขึ้นกับค่า  $C_0$  สำหรับค่า  $n$  เป็นค่าคงที่ของเลขยกกำลังในแบบจำลองการดูดซับ Freundlich แสดงถึงระดับสะสมและความหลากหลายของพลังงานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการดูดซับ (Weber, JR and Digiano, 1996) ซึ่งผลการทดลองของพรหมและผัวานได้<sup>๓</sup> มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear adsorption) ยกเว้นการดูดซับของผิวหลักกล้ำไรสนิมที่มีค่า  $n$  เท่ากับ 1.4-1.7 การดูดซับแสดงออกในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น อาจเนื่องจากการกระจายของพลังงานของพื้นผิวดูดซับมีความแตกต่างกัน (Distributed surface energies)

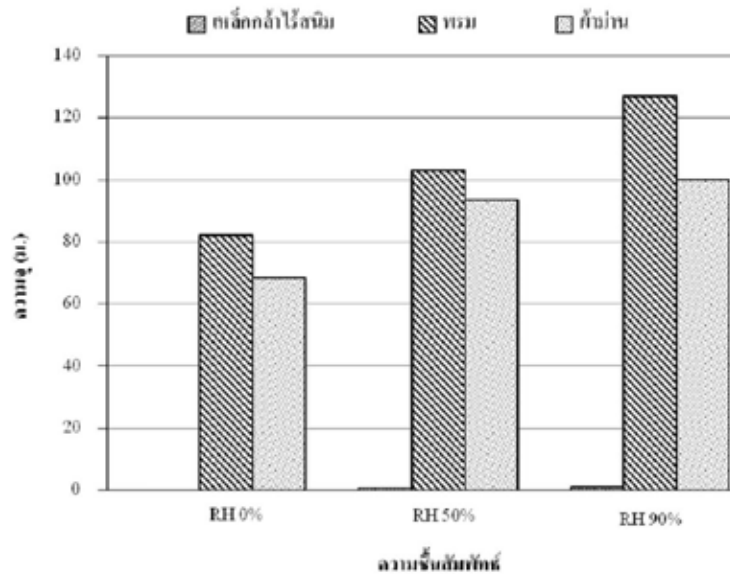
ตารางที่ 1. ค่าพารามิเตอร์การดูดซับนิโคตินบนวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ก๊าซแอมโมเนีย (พีพีเอ็ม)	$k_a$ (ม./ชม.)	$k_d$ (ต่อชม.)	$k_e$ (ม.)	$C_e$ (มก./ลบ.ม.)	n
เหล็กกล้าไร้สนิม	0	-	0.055	0.015	0.362	897	1.4
	50	-	0.065	0.005	0.791	341	1.5
	90	-	0.095	0.0015	1.06	322	1.7
ผ้าฝ้าย	0	-	0.26	0.0038	68.4	127	1
	50	-	0.29	0.0031	93.5	46	1
	90	-	0.29	0.0029	100	162	1
พรม	0	-	0.22	0.00042	82.1	129	1.2
	50	-	0.24	0.00035	102.	127	1.2
	90	-	0.3	0.00034	126	129	1.2
	0	20	0.28	0.010	69.5	128	0.9
	50	20	0.29	0.0083	82.4	65	0.9
	90	20	0.29	0.0060	110	35	0.9
	0	40	0.27	0.012	52.8	97	0.9
	50	40	0.29	0.0092	78.8	121	0.9
	90	40	0.29	0.0070	98.7	60	0.9

ความจุการดูดซับนิโคตินของวัสดุทดสอบแต่ละชนิด

รูปที่ 3 แสดงค่าความจุการดูดซับนิโคติน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90% สำหรับผิวเหล็กกล้า

ไร้สนิมมีค่าเท่ากับ 0.36 ม., 0.79 ม. และ 1.06 ม., สำหรับพรมมีค่าเท่ากับ 82.1 ม., 102 ม. และ 126 ม., สำหรับผ้าฝ้ายมีค่าเท่ากับ 68.4 ม., 93.5 ม. และ 85.7 ม. ตามลำดับ



รูปที่ 3. ความจุการดูดซับนิโคตินของวัสดุทดสอบแต่ละชนิด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

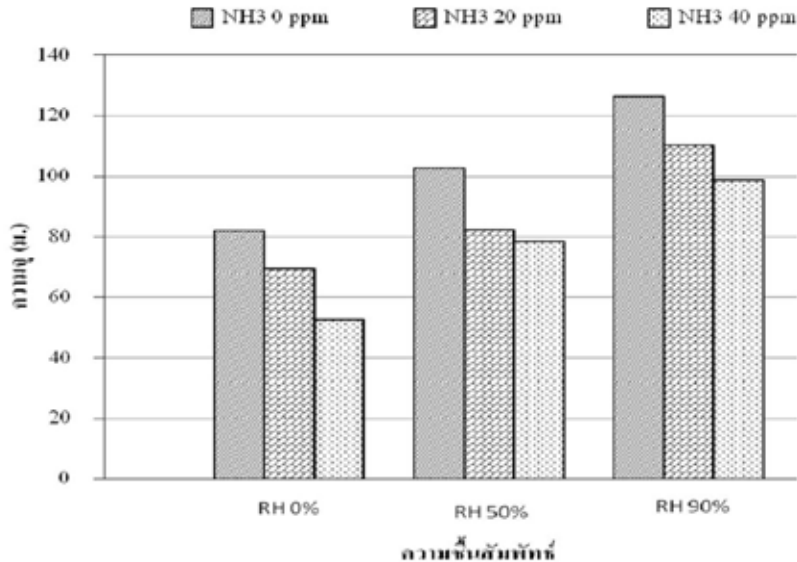
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุของการดูดซับนิโคตินระหว่างวัสดุทดสอบทั้ง 3 ประเภท พบว่าพื้นผิวของทรมมีค่าความจุการดูดซับนิโคตินมากที่สุด รองลงมาคือฟิวมัน และเหล็กกล้าไร้สนิม ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก เหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะของพื้นผิวที่ราบเรียบจึงมีพื้นที่ผิวจริงต่ำกว่าวัสดุที่มีพื้นผิวขรุขระ อย่างเช่นทรมหรือฟิวมัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Van Loy et al. (2001) ได้ศึกษาพฤติกรรมกรมการเปลี่ยนแปลงของนิโคตินและฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) ที่ดูดซับบนทรมและแผ่นผนัง โดยทำการทดสอบในห้องทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับสามารถหาได้จากแบบจำลองสมดุลมวลของนิโคตินหรือฟีนแอนทรีนในอากาศภายในห้องทดสอบพบว่าค่าความจุของเหล็กกล้า

ไร้สนิมในการดูดซับนิโคตินและฟีนแอนทรีนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าความจุการดูดซับของนิโคตินบนทรมและแผ่นผนังมีค่ามากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประมาณ 100-1000 เท่าและเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับและสัมประสิทธิ์การคายของนิโคตินบนทรมที่ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับมีค่าน้อยกว่าประมาณ 10-20 เท่า ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การคายมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Van Loy et al (2001)

**อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อความจุของการดูดซับ**

รูปที่ 4 แสดงค่าความจุการดูดซับนิโคตินของเหล็กกล้าไร้สนิม ทรม และฟิวมัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90%





รูปที่ 4. ค่าความจุการดูดซับนิโคตินของวัสดุทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มข้นก๊าซแอมโมเนียต่างๆ

ค่าความจุการดูดซับนิโคตินของเหล็กกล้าไร้สนิม, พรม และผ้าปูที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90% พบว่าความจุการดูดซับนิโคตินบนเหล็กกล้าไร้สนิมพรม และผ้าปู มีค่าความจุการดูดซับเพิ่มขึ้น 2.9, 1.5 และ 1.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 90% ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเกิดกลไกการละลายน้ำของนิโคตินในชั้นฟิล์มของน้ำหรือการเพิ่มพื้นที่การดูดซับโมเลกุลของนิโคตินบนผิวชั้นน้ำร่วมกับ จึงทำให้เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าความจุการดูดซับนิโคตินจึงเพิ่มขึ้นตาม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ongwadee and Morrison (2008) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อความสามารถในการดูดซับ ไตรเมทิลอะมีนบนพื้นผนังยิปซัมทาสีและพรม พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 50 เป็น 90% ความจุในการดูดซับของพรมเพิ่มขึ้น 1.6 เท่า แต่ความจุในการดูดซับของแผ่นผนังไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนงานวิจัยของ Won et al (2000) ได้ศึกษาการดูดซับของสารอินทรีย์ระเหยบนพรมภายในอาคารใหม่ โดยทำการทดลองในห้องทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งใส่พรมไว้ภายในห้องทดสอบ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 80% พบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการ

ดูดซับของสารอินทรีย์ระเหยที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง เช่น 2-propanol ซึ่งค่าความจุการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้น

#### ผลของก๊าซแอมโมเนียต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินบนพรม

จากรูปที่ 4 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0, 50 และ 90% และความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียที่ 20 และ 40 พีพีเอ็ม สามารถลดความจุการดูดซับนิโคตินบนพรมลงได้ถึง 35% เทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้ก๊าซแอมโมเนีย เมื่อเปรียบเทียบค่า  $k_u$  และ  $k_d$  ระหว่างการทดลองที่ใช้และไม่ใช้ก๊าซแอมโมเนีย (ดังตาราง 1) พบว่าค่า  $k_u$  มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า  $k_d$  ของการทดลองใช้แอมโมเนียกลับมีค่ามากกว่า การทดลองที่ไม่ใช้แอมโมเนียถึง 20-30 เท่า ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญทำให้ความสามารถในการดูดซับของพรมลดลง เมื่อมีการใช้แอมโมเนียร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 40 พีพีเอ็ม ไม่มีผลสำคัญในการลดความจุการดูดซับของพรม นอกจากนี้พบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินเมื่อมีก๊าซแอมโมเนียร่วมด้วย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำๆ ความจุในการดูดซับนิโคตินที่ความเข้มข้นก๊าซแอมโมเนียทั้งสองค่า จะมีค่าต่ำกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุการดูดซับนิโคตินบนพรมที่ใช้ก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็มในงานวิจัยนี้ กับค่าความจุการดูดซับไทรเมทิลอะมีน (TMA) บนพรมจากงานวิจัยของ Ongwandee and Morrison (2008) ที่ใช้ก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 40 พีพีเอ็มเช่นกัน พบว่า ค่าความจุการดูดซับ TMA ลดลงได้ถึง 83% ซึ่งมากกว่าการใช้แอมโมเนียในการกำจัดนิโคตินที่ลดลงได้เพียง 35% เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การคายของ TMA พบว่ามีค่า 1-4 ต่อชม. ซึ่งสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การคายของนิโคตินอยู่ 100-1000 เท่า ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแตกต่างกันเพียง 10 เท่า ในงานวิจัยของ Ongwandee and Morrison (2008) พิสูจน์ให้เห็นว่ากลไกที่สำคัญที่ทำให้ความจุในการดูดซับ TMA ลดลงเมื่อมีก๊าซแอมโมเนียร่วมด้วย ว่าเกิดจากการแข่งขันการดูดซับบนผิววัสดุระหว่างโมเลกุลของก๊าซแอมโมเนียและก๊าซ TMA มากกว่ามาจากผลของกลไกการละลายของ TMA ในชั้นฟิล์มของน้ำที่เป็นค่าได้น้อยลงเมื่อมีก๊าซแอมโมเนีย ในขณะที่การคายของนิโคตินบนพรมมีค่าสัมประสิทธิ์การคายต่ำมากถึงแม้จะมีก๊าซแอมโมเนียร่วมด้วย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า โมเลกุลของนิโคตินมีแรงในการดูดติดบนผิวของวัสดุหรือฟิล์มของน้ำบนวัสดุ แข็งแรงกว่าแรงในการดูดติดระหว่างโมเลกุลของ TMA และพื้นผิว ทั้งนี้โครงสร้างโมเลกุลของนิโคตินประกอบด้วยอะตอมไนโตรเจน 2 อะตอมซึ่งเพิ่มตำแหน่งในการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวมากกว่าโมเลกุลของ TMA ที่มีอะตอมไนโตรเจนเพียง 1 อะตอม นอกจากนี้นิโคตินจัดเป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหย มีค่าความดันไอต่ำกว่า TMA ถึง 1400 เท่า ดังนั้นนิโคตินจึงมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปโมเลกุลที่ดูดติดบนผิว (Sorbed nicotine) มากกว่าจะอยู่ในรูปที่เป็นก๊าซในอากาศ

## สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์และก๊าซแอมโมเนีย ต่อความสามารถในการดูดซับนิโคตินสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุของการดูดซับนิโคตินระหว่างวัสดุทดสอบทั้ง 3 ประเภทพบว่า พื้นผิวของพรมมีความจุการดูดซับนิโคตินมากที่สุด รองลงมาคือผ้าปู และเหล็กกล้าไร้สนิม ตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะของพื้นผิวที่เรียบลื่น จึงมีพื้นที่ผิวของการดูดซับต่ำกว่าพื้นผิวที่ลักษณะขรุขระเป็นเส้นใย อย่างเช่นพรมหรือผ้าปู

2. ความชื้นสัมพัทธ์มีอิทธิพลต่อความจุการดูดซับของวัสดุทดสอบทั้ง 3 ประเภท เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 0 เป็น 90% มีผลให้ค่าความจุการดูดซับนิโคตินเพิ่มขึ้น 1-3 เท่า ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเกิดกลไกการละลายน้ำของนิโคตินในชั้นฟิล์มของน้ำบนผิววัสดุที่ก่อตัวขึ้นเมื่ออากาศมีความชื้นสูงขึ้นมาก ๆ หรือมาจากการเพิ่มพื้นที่การดูดติดโมเลกุลของนิโคตินบนผิวชั้นน้ำนอกเหนือจากการดูดติดนิโคตินบนผิววัสดุแห้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

3. การดูดซับนิโคตินของวัสดุทดสอบภายใต้ก๊าซแอมโมเนียสามารถลดความจุการดูดซับนิโคตินบนพรมลงได้ ค่าความจุจะลดลงมากขึ้นในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง แต่การเพิ่มความเข้มข้นก๊าซแอมโมเนียจาก 20 เป็น 40 พีพีเอ็ม มีผลเพียงเล็กน้อยในการลดความจุการดูดซับนิโคตินบนพรม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การคายเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งผลการศึกษาที่ได้นี้อาจสามารถนำไปประยุกต์เป็นวิธีการกำจัดนิโคตินที่ดูดซับบนพรมในห้องพักที่มีการสูบบุหรี่เป็นประจำ การใช้แอมโมเนียจะช่วยลดเวลาการกำจัดให้สั้นลง เมื่อเทียบกับการระบายอากาศเพียงอย่างเดียว

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2552 ร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (TRF MAG Window II) ปี 2552 และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ภายใต้โครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่

(วท.) ประจำปี 2550 และ งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี งบประมาณ 2553 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข, 2530. **ชีวิตจะสั้นเพราะควันบุหรี่ (จุดสาร)**. กรุงเทพฯ: กระทรวงสาธารณสุข.

Ongwadee, M., Bettinger, S., and Morrison, G. 2005. The influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to a mineral surface. **Indoor Air**. 15: 408-419.

Ongwadee, M., and Morrison, G. 2008. Influence of ammonia and carbon dioxide on the sorption of a basic organic pollutant to carpet and latex-painted gypsum board. **Environmental Science & Technology**. 42: 5415-5420.

Weber, JR. WJ., and Diaiano, FA. 1996. Process dynamics in environmental systems. New York: John Wiley & Sons.

Won, D., Corsi, RL., and Rynes, M. 2000. New indoor carpet as an adsorptive reservoir for volatile organic compounds. **Environmental Science & Technology**. 34: 4193-4198.

Won, D., Sander, DM., Shaw, CY., and Corsi, RL. 2001. Validation of the surface sink model for sorptive interactions between VOCs and indoor materials.” **Atmospheric Environment**. 35: 4479-4488.

Van Loy, MD., Riley, WJ., Daisey, JM., and Nazaroff, WW. 2001. Dynamic behavior of semivolatile organic compounds in indoor air. 2. Nicotine and phenanthrene with carpet and wallboard. **Environmental Science & Technology**. 35: 560-567.