การประเมินการปลดปล่อยมลพิษอากาศจากเครื่องพิมพ์และปัญหาสภาพแวดล้อมและอาการเจ็บป่วยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องพิมพ์ในสำนักงาน

Assessment of Airborne Pollutant Emissions from Printers and Environmental Complaints and Symptoms Related to Printer Usage in Offices

กานต์ นามีผล[1], มณีรัตน์ องค์วรรณดี[2*], วจัสกร กาญจนะ[3], พิไลพร พิมพ์ภูคำ[4]
Kan Nameepol[1], Maneerat Ongwandee[2*], Wajussakorn Kanjana[3], Pilaiporn Pimpukham[4]

บทคัดย่อ

เครื่องพิมพ์ปลดปล่อยมลพิษอากาศจำนวนมากซึ่งสามารถสร้างอันตรายต่อสุขภาพผู้ใช้งานได้ งานวิจัยนี้ต้องการวัดการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) และโอโซนจากเครื่องพิมพ์ 3 เครื่อง ได้แก่ เครื่องพิมพ์พ่นหมึกเครื่องใหม่ เครื่องพิมพ์พ่นหมึกผ่านการใช้งาน 2 ปี และเครื่องพิมพ์เลเซอร์เครื่องใหม่ ทำการทดลองในห้องทดสอบขนาด 0.21 ลบ.ม. วัดความเข้มข้นมลพิษตามลำดับเวลา 3 ช่วง คือ ช่วงก่อนพิมพ์ 30 นาที ขณะพิมพ์ 15 นาที และหลังพิมพ์อีก 60 นาที คำนวณอัตราการปลดปล่อยมลพิษด้วยสมการสมดุลมวลที่สภาวะสมดุล โดยทดสอบการพิมพ์ 3 รูปแบบ ได้แก่ พิมพ์กระดาษเปล่า พิมพ์ขาวดำ และพิมพ์สี ผลการตรวจวัดอัตราการปลดปล่อย PM2.5 จากเครื่องพิมพ์พ่นหมึกเครื่องใหม่มีค่า 0.11-1.36 มคก./ชม. ในขณะที่เครื่องพิมพ์พ่นหมึกที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าประมาณ 1.5 มคก./ชม. ไม่พบการปล่อยโอโซนจากเครื่องพิมพ์พ่นหมึกทั้งสองเครื่อง สำหรับการทดลองเครื่องพิมพ์เลเซอร์ด้วยห้องทดสอบไม่สามารถประเมินอัตราการปลดปล่อยมลพิษได้เนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะพิมพ์ต่อการทำงานของเครื่องมือวัด ดังนั้นจึงดัดแปลงวิธีการทดลองโดยไม่ใช้ห้องทดสอบ และวัดความเข้มข้นมลพิษตรงตำแหน่งที่เครื่องพิมพ์พ่นลมออก ทำการวัดตามลำดับเวลา 3 ช่วง พบว่าความเข้มข้น PM2.5 และโอโซนเพิ่มขึ้น 12-16% และ 5-12% ตามลำดับในขณะที่พิมพ์เทียบกับก่อนพิมพ์ นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ศึกษาพฤติกรรมการใช้เครื่องพิมพ์และการร้องเรียนที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องพิมพ์ของบุคลากรจำนวน 100 คนในสำนักงานของมหาวิทยาลัยมหาสารคามด้วยแบบสอบถาม ผลการทดสอบไคสแควร์พบว่า ปัจจัยด้านระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์และผู้ใช้มีผลต่อการถูกรบกวนอันเกิดจากการใช้เครื่องพิมพ์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วยการได้กลิ่นไม่พึงประสงค์ การระคายเคืองจมูก ตา คอ และการไอ จาม น้ำมูลไหล

คำสำคัญ: เครื่องพิมพ์พ่นหมึก, เครื่องพิมพ์เลเซอร์, อนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน, โอโซน

Abstract

Printers emit a variety of airborne pollutants which can cause adverse health effects on users. This study aimed to measure emissions of particulate matter less than 2.5 micron (PM2.5) and ozone from three selected printers, including a new inkjet, 2-year-old used inkjet and new laser printer. Testing was done using a 0.21-m3 chamber to measure pollutant concentrations during 3 consecutive stages, i.e. 30-min idling, 15-min printing and 60-min idling. An emission rate was estimated using a steady-state mass balance equation. Printing formats were tested for blank-paper printing, black and white printing and color printing. Results show that the new inkjet emitted PM2.5 ranging from 0.11 to 1.36 mg/h, while the used inkjet emitted 1.5 mg/h. No ozone emission was

[1] นิสิตปริญญาโท, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[2] รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[3] อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[4] นิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[1] Graduate student, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
[2] Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Mahasarakham University
[3] Lecturer, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
[4] Undergraduate student, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
* Corresponding author; Assoc. Prof. Maneerat Ongwandee, Ph.D., Faculty of Engineering Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand. E-mail: maneerat.O@msu.ac.th

observed from both inkjets. The chamber experiments for the laser printer encountered a pollutant measurement problem due to heat generated during printing. Thus, testing was modified by not using the chamber. Pollutant concentrations were monitored at the air exhaust from the laser printer during 3 consecutive stages. PM2.5 and ozone concentrations increased by 12-16% and 5-12%, respectively, during the printing stage compared with the first idling stage. Furthermore, this study examined printer usage behaviors and environmental complaints and symptoms related to printer usage among 100 staff members of Mahasarakham University by a questionnaire survey. Chi-square testing indicates that a distance between a user and printer plays an important role in user complaints and symptoms on unpleasant odor, irritation of nose, eyes and throat, and cough, sneeze and running nose at the significance level of 0.05.

Keywords: Laser printer, Inkjet printer, PM2.5, Ozone

บทนำ

เครื่องพิมพ์หรือปริ้นเตอร์ (Printer) จัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำนักงาน (Electronic office equipment) ที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน เทคโนโลยีการพิมพ์สมัยใหม่สามารถจำแนกเครื่องพิมพ์ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องพิมพ์ระบบใช้ความร้อน (Thermal printer) เครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Inkjet printer) และเครื่องพิมพ์ระบบเลเซอร์ (Laser printer)[1] โดยเครื่องพิมพ์แบบใช้ความร้อนนิยมใช้พิมพ์ใบเสร็จจากเครื่องคิดเงินหรือตู้กดเงินอัตโนมัติ ส่วนเครื่องพิมพ์พ่นหมึกและเลเซอร์นิยมใช้งานในสำนักงาน เครื่องพิมพ์พ่นหมึกชนิดต่อเนื่อง (Continuous inkjet, CIJ) ใช้หัวพ่นหมึกเหลว (Nozzles) และมีอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า Piezoelectric crystal สร้างคลื่นอะคูสติกส์ (Acoustic wave) ทำให้ลำของน้ำหมึกที่ฉีดออกมาแตกเป็นละอองฝอยขนาดเล็กมากบนตำแหน่งที่เครื่องประมวลผลไว้แล้ว ซึ่งเรียกเครื่องพิมพ์นี้ว่า Piezoelectric inkjet จะแตกต่างจากเทคนิคพ่นหมึกแบบใช้ความร้อน (Thermal inkjet หรือ Bubble jet)[2] ซึ่งหมึกจะถูกให้ความร้อนก่อนฉีดพ่น ส่วนเครื่องพิมพ์เลเซอร์ใช้หลักการพิมพ์ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic printing) ลำแสงเลเซอร์จะถูกปล่อยเพื่อกำหนดภาพที่จะพิมพ์ลงบนกระบอกรับภาพ (drum) โดยบริเวณที่ไม่ถูกแสงจะไม่ถูกชาร์จด้วยอิเล็กตรอน เมื่อกระบอกรับภาพหมุนมาถึงตัวปล่อยผงหมึก (toner) ผงหมึกจะติดกับบริเวณกระบอกรับภาพที่มีประจุลบอยู่ จากนั้นกระบอกรับภาพจะอัดผงหมึกลงบนกระดาษ แล้วอบด้วยความร้อน[3]

การทำงานของเครื่องพิมพ์ปลดปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศ สามารถก่ออันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งานได้ เช่น สารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compounds, VOCs) สารอินทรีย์กึ่งระเหย (Semi VOCs) อนุภาคขนาดเล็ก (Particulate matter, PM) ก๊าซโอโซน (Ozone) เป็นต้น[4,5] Kagi et al.[4] ทดสอบเครื่องพิมพ์เลเซอร์ตรวจวัดความเข้มข้นโอโซนเพิ่มขึ้นจาก 1.5 เป็น 6 พีพีบี และอนุภาคขนาดเล็กกว่า 500 นาโนเมตรเพิ่มขึ้นในขณะที่พิมพ์ ทั้งนี้มีรายงานว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ปอดและกระแสเลือดได้[5] ประกอบกับการใช้งานเครื่องพิมพ์ในสำนักงานมักนิยมวางไว้ใกล้ผู้ใช้เพื่อความสะดวก และการระบายอากาศของอาคารสำนักงานมีค่าค่อนข้างต่ำ จากการสำรวจพบว่าอัตราการระบายอากาศของอาคารขนาดใหญ่พิเศษในกรุงเทพมหานครมีค่าเฉลี่ย 0.73 ลบ.ม./ชม.-ตร.ม. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานแนะนำที่ 2 ลบ.ม./ชม.-ตร.ม.[6] จึงทำให้เกิดการสะสมมลพิษภายในอาคารและอาจส่งผลต่อปริมาณการได้รับสัมผัสมลพิษ (Exposure) ของผู้ทำงานในอาคาร

งานวิจัยนี้ต้องการวัดการปลดปล่อยมลพิษได้แก่ อนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) และก๊าซโอโซน จากเครื่องพิมพ์พ่นหมึกและเลเซอร์ซึ่งมีอายุการใช้งานต่างๆ และรูปแบบการพิมพ์ทั้งการพิมพ์กระดาษเปล่า พิมพ์ขาวดำ และพิมพ์สี นอกจากนี้ทำการสำรวจพฤติกรรมการใช้เครื่องพิมพ์ในสำนักงาน

และสิ่งรบกวนจากการใช้งานเครื่องพิมพ์ด้วยแบบสอบถามและทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. เครื่องพิมพ์ที่ทดสอบ

งานวิจัยนี้เลือกทดสอบเครื่องพิมพ์จำนวน 3 เครื่องดังมีรายละเอียดจำเพาะของเครื่องพิมพ์แสดงใน Table 1

Table 1 Specification of 3 selected printers

No. Printer	Printer type	Printer age (year)	Printing property	Print speed (paper per min)***	Maximum printing resolution (dpi)
Printer#1*	Inkjet	0	BW** / Color	9.2 for BW 4.5 for Color	5760 x 1440
Printer#2*	Inkjet	2	BW / Color	7 for BW 3.5 for Color	5760 x 1440
Printer#3	Laser	0	BW / Color	12 for BW 10 for Color	1200 x 2400

* Same brand printers but only different specification in a maximum print speed
** BW denotes black and white
*** ISO/IEC 24734

2. ตัวแปรที่ทดสอบ

ผู้วิจัยทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อการปลดปล่อยมลพิษดังนี้

2.1 ชนิดเครื่องพิมพ์ ได้แก่ เครื่องพิมพ์พ่นหมึก และเครื่องพิมพ์เลเซอร์

2.2 อายุการใช้งานเครื่องพิมพ์ ได้แก่ เครื่องใหม่ไม่เคยใช้งาน กับเครื่องที่ใช้งานแล้ว 2 ปี ทดสอบเฉพาะเครื่องพิมพ์พ่นหมึก

2.3 ลักษณะการพิมพ์เอกสาร ได้แก่ พิมพ์กระดาษเปล่า (Blank) พิมพ์ขาวดำ (Black and white) และพิมพ์สี (Color) สำหรับการพิมพ์ขาวดำ/การพิมพ์สีใช้พิมพ์ตัวหนังสือจำนวน 200 คำ ต่อกระดาษA4 1 แผ่น พิมพ์หน้าเดียว

3. ห้องทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ

Figure 1 แสดงห้องทดสอบและการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ พร้อมทั้งลำดับเวลาการทดสอบเครื่องพิมพ์ในแต่ละรอบ ห้องทดสอบทำจากวัสดุอะคริลิคใส (acrylic) ขนาด 0.21 ลบ.ม. ภายในติดตั้งเครื่องพิมพ์ที่จะทดสอบ ท่ออากาศออกต่อกับเครื่องวัด $PM_{2.5}$ (DUSTTRAK™ II aerosol monitor, TSI Inc., USA) และเครื่องวัดก๊าซโอโซน (UV absorption ozone analyzer, Teledyne API, USA) และวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบด้วยเครื่องวัดสภาวะอากาศ (Extech Instruments, Co., USA) การทดสอบแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงนิ่ง (Idling) เครื่องพิมพ์ไม่ได้ทำงาน เพื่อวัดความเข้มข้นภูมิหลังของมลพิษในห้องทดสอบเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นสั่งเครื่องพิมพ์ทำงาน (Printing) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากเครื่องพิมพ์หยุดทำงาน วัดความเข้มข้นมลพิษต่ออีก 60 นาที จึงเสร็จสิ้นการทดสอบ 1 รอบ ยกเว้น Printer#1 มีช่วงพิมพ์กระดาษเปล่า 5 นาที การทดสอบแต่ละตัวแปรทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

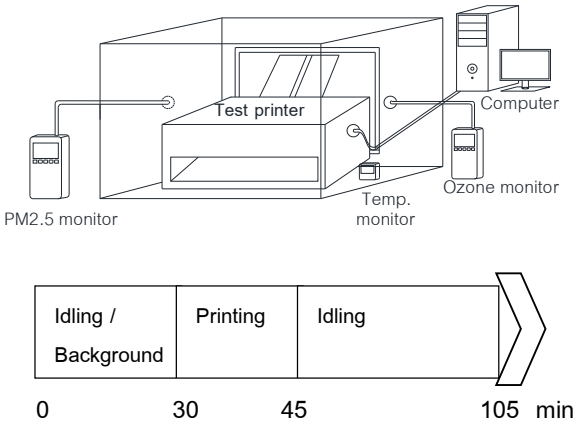


Figure 1 Experimental setup and experiment design for measurement of air pollutant emissions from printers

4. แบบจำลองคณิตศาสตร์

อัตราการปลดปล่อยมลพิษขณะพิมพ์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการสมดุลมวลของมลพิษที่เกิดขึ้นและที่ไหลเข้าออกห้องทดสอบ ณ สภาวะสมดุล (Steady state condition) ดังสมการ (1)

$$E = \lambda V(C - C_{in}) \qquad (1)$$

โดยที่ E = อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (มคก./ชม.)

λ = อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบ (ต่อ ชม.)

V = ปริมาตรอากาศในห้องทดสอบ (ลบ.ม.)

C = ความเข้มข้นมลพิษในห้องทดสอบ (มคก./ลบ.ม.)

C_{in} = ความเข้มข้นมลพิษภายนอกห้องที่ไหลเข้าไปในห้องทดสอบ (มคก./ลบ.ม.)

วัดอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องทดสอบด้วยวิธี tracer gas decay method[7] โดยใช้ CO_2 เป็นก๊าซทำรอย พบว่ามีค่า λ เท่ากับ 3.0 และ 2.2 ต่อ ชม. สำหรับห้องทดสอบขณะทดสอบเครื่องพิมพ์พ่นหมึก และขณะทดสอบเครื่องพิมพ์เลเซอร์ ตามลำดับ

5. การสำรวจพฤติกรรมการใช้เครื่องพิมพ์ในสำนักงานและสิ่งรบกวนจากการใช้งานเครื่องพิมพ์

การสำรวจใช้แบบสอบถามกับบุคลากรในสำนักงานของหน่วยงานต่างๆ ในมหาวิทยาลัยมหาสารคามแบบสุ่ม ระหว่างเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ 2561 จำนวน 120 คน มีผู้ตอบกลับ 100 คน คิดเป็นสัดส่วนตอบกลับ 83% แบบสอบถามประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 ภูมิหลัง ประกอบด้วย อายุ เพศ และอาชีพ

ส่วนที่ 2 ลักษณะการใช้งานเครื่องพิมพ์ ประกอบด้วย ระยะเวลาการใช้งานเครื่องพิมพ์ ชนิดเครื่องพิมพ์ที่ใช้ ระยะเวลาการพิมพ์แต่ละครั้ง จำนวนครั้งที่ใช้เครื่องพิมพ์ในแต่ละวัน รูปแบบการพิมพ์ และระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์กับผู้ใช้งาน

ส่วนที่ 3 สิ่งรบกวนจากการใช้เครื่องพิมพ์ ประกอบด้วย การได้กลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ขณะพิมพ์ การถูกรบกวนด้วยฝุ่นละออง การระคายเคืองจมูก ตา คอ และการไอ จาม น้ำมูลไหล

โดยทำการวิเคราะห์ ปัจจัยภูมิหลังและพฤติกรรมการใช้งานเครื่องพิมพ์มีผลต่อการรายงานสิ่งรบกวนจากการใช้เครื่องพิมพ์ของบุคลากรในสำนักงานหรือไม่ ด้วยการทดสอบไคสแควร์ (Chi-square test) กำหนดระดับนัยสำคัญ α=0.05 ในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน ทดสอบด้วยโปรแกรมสถิติ SPSS®

ผลการทดลอง

1. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมลพิษในห้องทดสอบ

Figures 2 and 3 แสดงกราฟความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และโอโซนจากเครื่องพิมพ์พ่นหมึกเครื่องใหม่ (Printer#1) ตามลำดับขั้นตอนการทดสอบที่แสดงใน Figure 1 และแบ่งเป็น การพิมพ์กระดาษเปล่า พิมพ์ขาวดำ และพิมพ์สี รวมทั้งแสดงอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ (เฉพาะการทดสอบพิมพ์ขาวดำ) หมายเหตุ ข้อมูลของการทดลองซ้ำมีลักษณะกราฟแบบเดียวกัน

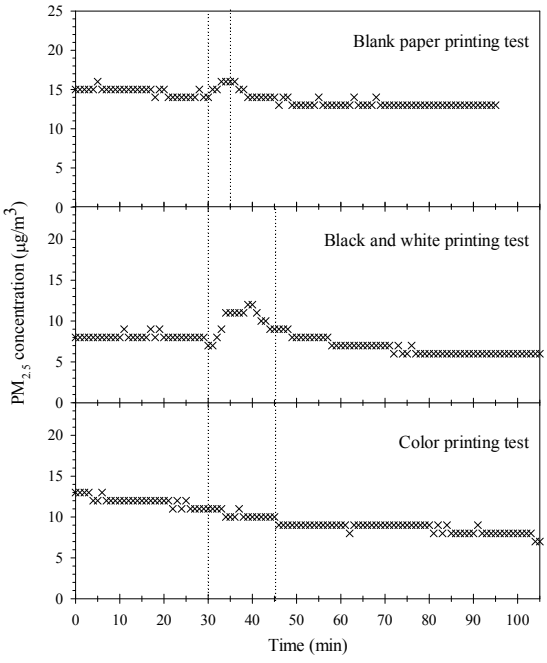


Figure 2 Time variation of $PM_{2.5}$ concentrations in the chamber for Printer#1. Note that the printing mode for blank paper lasted for 5 min.

จากกราฟ Figure 2 ชี้ให้เห็นว่าเครื่องพิมพ์พ่นหมึกเครื่องใหม่ (Printer#1) ปล่อยอนุภาคขนาดเล็กออกมาขณะที่พิมพ์ขาวดำและพิมพ์กระดาษเปล่า แต่การพิมพ์สีกลับไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ $PM_{2.5}$

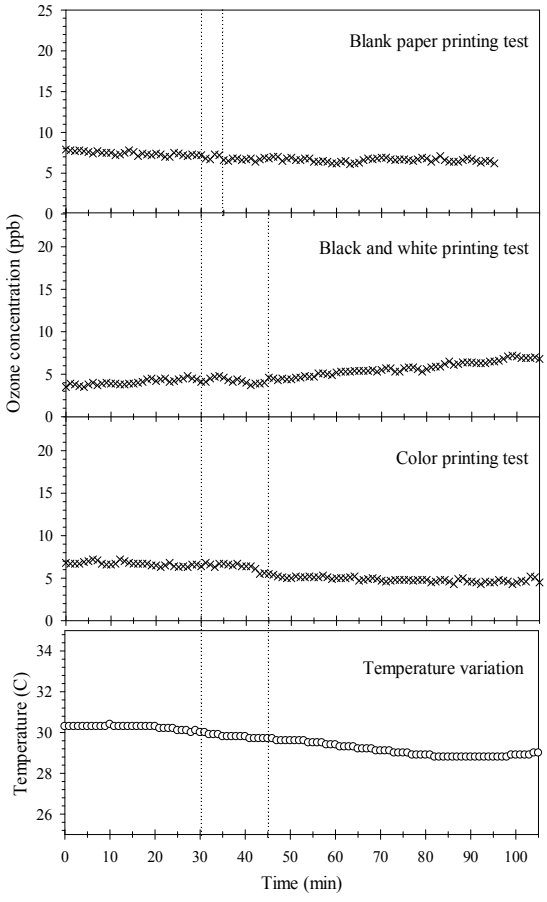


Figure 3 Time variation of ozone concentrations in the chamber for Printer#1. Note that the printing mode for blank paper lasted for 5 min.

ส่วนกราฟใน Figure 3 แสดงให้เห็นว่าการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์พ่นหมึกไม่มีการปลดปล่อยโอโซนออกมาทั้งนี้เพราะกระบวนการพิมพ์ไม่ได้ใช้หลักไฟฟ้าสถิตสำหรับการสร้างอิเล็กตรอนซึ่งแตกต่างจากหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์เลเซอร์ นอกจากนี้อุณหภูมิภายในห้องทดสอบมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองเพราะเครื่องพิมพ์แบบ Piezoelectric inkjet ไม่ใช้ความร้อนในการอุ่นน้ำหมึกแต่อย่างใด สำหรับเครื่องพิมพ์พ่นหมึกที่ผ่านการใช้งานมา 2 ปี (Printer#2) ไม่พบการปล่อยโอโซนและอุณหภูมิในห้องทดสอบมีค่าคงที่ แต่พบการปล่อยมลพิษ $PM_{2.5}$ เช่นเดียวกับเครื่องใหม่ ทั้งนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของ $PM_{2.5}$ ขณะพิมพ์สีอีกด้วย ดังแสดงใน Figure 4

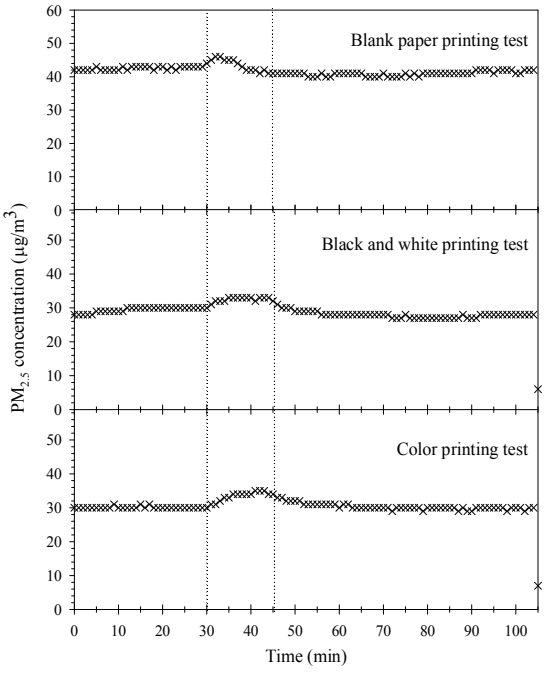


Figure 4 Time variation of $PM_{2.5}$ concentrations in the chamber for Printer#2.

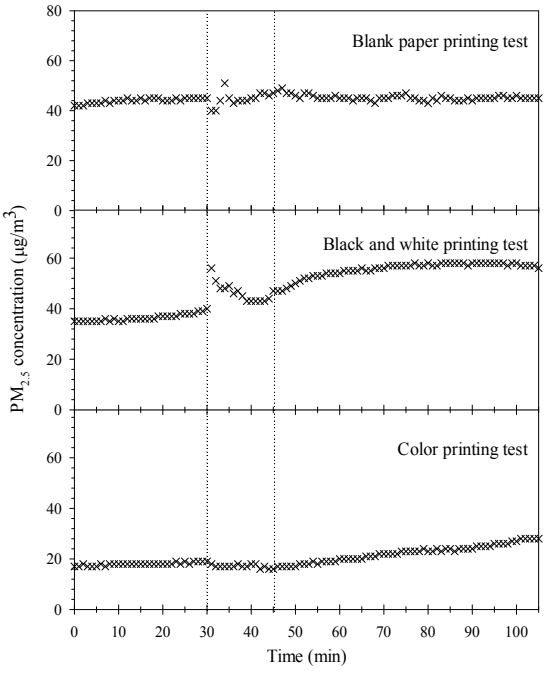


Figure 5 Time variation of $PM_{2.5}$ concentrations in the chamber for Printer#3

Figures 5 and 6 แสดงความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และโอโซนจากเครื่องพิมพ์เลเซอร์เครื่องใหม่ (Printer#3) ตามลำดับขั้นตอนการทดสอบที่แสดงใน Figure 1 และแบ่งเป็นการพิมพ์กระดาษเปล่า พิมพ์ขาวดำ และพิมพ์สี รวมทั้งแสดงอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ (เฉพาะการทดสอบพิมพ์ขาวดำ) หมายเหตุข้อมูลของการทดลองซ้ำมีลักษณะกราฟแบบเดียวกัน

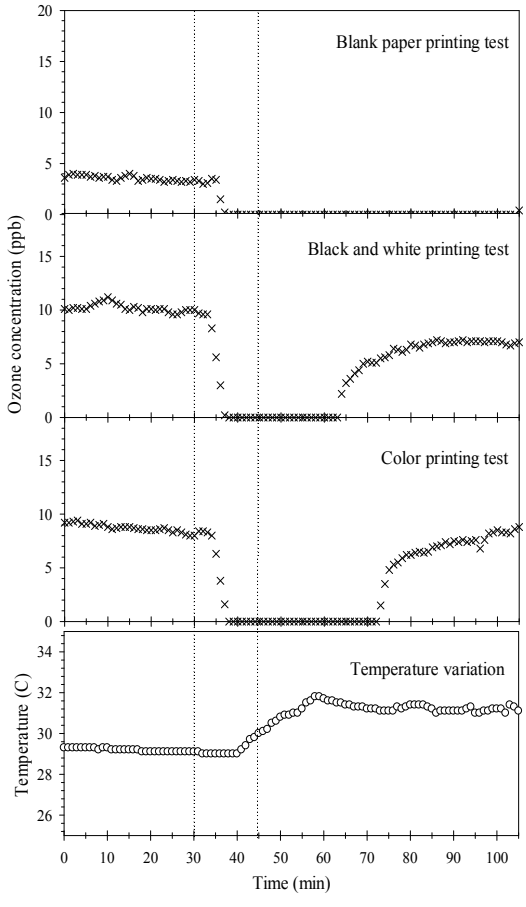


Figure 6 Time variation of ozone concentrations in the chamber for Printer#3

Figure 5 สังเกตได้ชัดเจนว่าเมื่อเครื่องพิมพ์เลเซอร์ (Printer#3) เริ่มต้นพิมพ์ขาวดำจะปล่อย $PM_{2.5}$ ออกมาในลักษณะพัลส์ (Pulse emission) คือความเข้มข้นเพิ่มขึ้นสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ McKone et al.[8] ที่รายงานลักษณะการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กมาก (Ultrafine particle) จำนวนมากออกจากเครื่องพิมพ์เลเซอร์เมื่อเริ่มต้นทำงานจากสภาวะหยุดนิ่งหรือที่เรียกว่า Initial cold start print แต่ปรากฏการณ์นี้ไม่พบในเครื่องพิมพ์พ่นหมึก ส่วนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโอโซนใน Figure 6 พบว่าเครื่องมือวัดอ่านค่าเท่ากับศูนย์ทั้งนี้อาจมีผลมาจากการความร้อนที่เพิ่มขึ้นสูงเมื่อมีการพิมพ์ โดยอุณหภูมิในห้องทดสอบเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการวัดปริมาณโอโซนของเครื่องมือวัด โดยทุกการทดลองของเครื่องพิมพ์เลเซอร์มีความร้อนเกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้และทำให้ไม่สามารถวัดความเข้มข้นโอโซนได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ปรับเปลี่ยนวิธีการวัดมลพิษจากเครื่องพิมพ์เลเซอร์ใหม่เพื่อให้ได้รับผลกระทบจากความร้อนในขณะพิมพ์ให้น้อยที่สุด รายละเอียดการทดสอบที่ดัดแปลงและผลแสดงในหัวข้อ 3

2. อัตราการปลดปล่อย $PM_{2.5}$ จากเครื่องพิมพ์พ่นหมึก

การทดลองโดยใช้ห้องทดสอบสามารถประเมินอัตราการปลดปล่อย $PM_{2.5}$ จากเครื่องพิมพ์พ่นหมึกได้ด้วยสมการ (1) และแสดงค่าใน Table 2 สำหรับอัตราการปลดปล่อยโอโซนของเครื่องพิมพ์พ่นหมึกมีค่าเป็นศูนย์

Table 2 $PM_{2.5}$ emission from inkjet printers

Printing format	$PM_{2.5}$ Emission* (μg/h)	
	New inkjet (Printer#1)	Used inkjet (Printer#2)
Blank paper	0.29±0.30	1.59±0.34
Black and white	1.36±0.43	1.51±0.03
Color	0.11±0.15	1.47±1.14

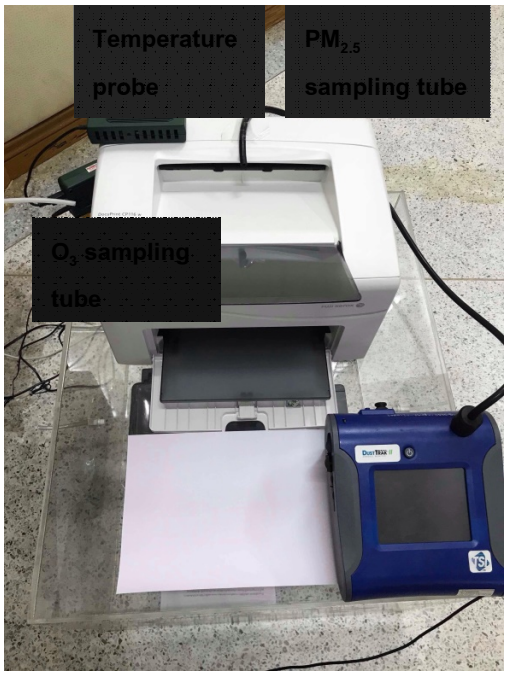
* Averaging from duplicate experiments. A plus and minus sign denotes standard deviation.

จากการประเมินอัตราการปลดปล่อย $PM_{2.5}$ ขณะพิมพ์ทั้งเครื่องใหม่และเครื่องที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว มีค่าในช่วง 0.1-1.6 มคก./ชม. เครื่องใหม่มีอัตราการปล่อย $PM_{2.5}$ สูงสุดในขณะพิมพ์ขาวดำส่วนการพิมพ์กระดาษเปล่าและพิมพ์สีมีอัตราการปล่อยค่อนข้างต่ำ งานวิจัยของ McKone et al.[8] พบว่าการพิมพ์ที่ใช้หมึกพิมพ์บนพื้นที่กระดาษมาก เช่น 20% toner coverage มีการปล่อยอนุภาคขนาดเล็กออกมามากกว่าการพิมพ์ 10% toner coverage หรือ 0% toner coverage (การพิมพ์กระดาษเปล่า) ซึ่งคล้ายคลึงกับผลที่ตรวจวัดได้ในงานวิจัยนี้ ในทางตรงข้ามเครื่องพิมพ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกลับมีอัตราการปล่อย $PM_{2.5}$ ใกล้เคียงกันในการทดสอบพิมพ์ทั้ง 3 รูปแบบคือประมาณ 1.5 มคก./ชม.ซึ่งสูงกว่าเครื่องพิมพ์ใหม่ จึงอาจเป็นไปได้ว่าหัวพ่นหมึกที่ผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่งอาจก่อให้เกิดการปล่อยอนุภาคออกมามากถึงแม้จะเป็นการพิมพ์กระดาษเปล่าก็ตาม

3. มลพิษจากเครื่องพิมพ์เลเซอร์

ผู้วิจัยได้ดัดแปลงวิธีการทดสอบเครื่องพิมพ์เลเซอร์โดยไม่ใช้ห้องทดสอบดังแสดงใน Figure 7 ติดท่อชักตัวอย่างอากาศเพื่อวัด $PM_{2.5}$ และโอโซนที่ตำแหน่งที่เครื่องพิมพ์ปล่อยลมออกขณะพิมพ์ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้ วัดความเข้มข้นภูมิหลังของมลพิษเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นสั่งเครื่องพิมพ์ทำงานเป็นเวลา 15 นาที หลังจากเครื่องพิมพ์หยุดทำงาน จะวัดความเข้มข้นมลพิษต่ออีก 60 นาที จึงเสร็จสิ้นการทดสอบ 1 รอบ ผลการทดสอบจะแสดงด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมลพิษขณะ

พิมพ์เทียบกับความเข้มข้นภูมิหลัง โดยทั้งนี้ไม่สามารถประเมินอัตราการปลดปล่อยมลพิษได้เพราะไม่ได้ใช้ห้องทดสอบ



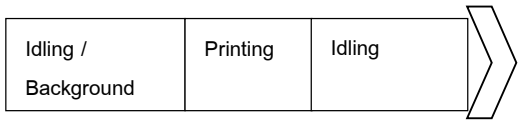


Figure 7 Experimental setup and experiment design for measurements of air pollutants from laser printer

Table 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเฉลี่ยของ $PM_{2.5}$ และโอโซนขณะพิมพ์เทียบกับความเข้มข้นเฉลี่ยภูมิหลัง แบ่งเป็นการพิมพ์ 3 รูปแบบ ค่าที่รายงานในตารางได้จากค่าเฉลี่ยของการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

Table 3 Percentage change in $PM_{2.5}$ and ozone concentrations during printing

Printing format	Percentage change*	
	$PM_{2.5}$	Ozone
Blank paper	16±9	12±16
Black and white	13±11	5±7
Color	12±6	7±3

* Averaging from duplicate experiments. A plus and minus sign denotes standard deviation.

ผลการตรวจวัดพบว่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องพิมพ์ทำงานทั้งการพิมพ์กระดาษเปล่า พิมพ์ขาวดำ และพิมพ์สี ประมาณ 12-16% และยังพบการปล่อย $PM_{2.5}$ ออกมาในลักษณะพัลส์เมื่อพิมพ์กระดาษเปล่าและพิมพ์ขาวดำ ส่วนก๊าซโอโซนตรวจพบว่ามีระดับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันในขณะที่พิมพ์ แต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองซ้ำ 2 ครั้งค่อนข้างสูงซึ่งอาจเป็นเพราะการไหลของอากาศรอบเครื่องพิมพ์และโอโซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับมลพิษอื่นในอากาศได้อย่างรวดเร็ว เช่น สารอินทรีย์ระเหยที่มาจากหมึกพิมพ์เช่นกัน ทำให้ความเข้มข้นโอโซนที่ตรวจวัดมีค่าแปรปรวนในช่วงเวลาที่เครื่องพิมพ์ทำงาน[4] ส่วนอุณหภูมิที่วัดตรงลมเป่าออกจากเครื่องพิมพ์เลเซอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.5-1 องศาเซลเซียส

4. ผลสำรวจพฤติกรรมการใช้เครื่องพิมพ์ในสำนักงานและสิ่งรบกวนจากการใช้งานเครื่องพิมพ์

ผลสำรวจผู้ใช้เครื่องพิมพ์ในสำนักงานของมหาวิทยาลัยมหาสารคามจำนวน 100 คน มีรายละเอียดแสดงใน Table 4

Table 4 Printer usage behaviors and environmental complaints related to printer usage

Topic	Survey result		
1. Average user age	33 years		
2. Gender	Male 38%	Female 62%	
3. Occupation	Office staff 95%	Lecturer 5%	
4. Printer usage period	< 1 years 9%	1-3 years 20%	> 3 years 71%
5. Type of printer used	Laser 72%	Inkjet 26%	Others 2%
6. Printing duration for each time	1-5 min 51%	5-10 min 28%	> 10 min 21%
7. Number of daily usage	1-5 times 26%	5-10 times 43%	> 10 times 31%
8. Printing format	Color 3%	Black-white 71%	Both 26%
9. Distance between printer and user	< 1 m 47%	1-3 m 29%	> 3 m 24%
10. Unpleasant odor	Often 18%	Sometimes 60%	Never 22%
11. Dust disturbance	Often 13%	Sometimes 66%	Never 21%
12. Irritation of nose, eyes and throat	Often 29%	Sometimes 51%	Never 20%
13. Cough, sneeze and running nose	Often 31%	Sometimes 54%	Never 15%

ผู้ตอบแบบสอบถามมีอายุเฉลี่ย 33 ปี เป็นเพศชาย 38% และหญิง 62% เป็นเจ้าหน้าที่สำนักงาน 95% และอาจารย์ 5% ผู้ตอบแบบสอบถาม 71% ใช้เครื่องพิมพ์มานานกว่า 3 ปี และใช้เครื่องพิมพ์ชนิดเลเซอร์มากกว่าชนิดพ่นหมึก ผู้ใช้งาน 79% ใช้เวลาในการพิมพ์แต่ละครั้ง 1-10 นาที และใช้งานเครื่องพิมพ์ 1-10 ครั้งต่อวัน นอกจากนี้พบว่าพิมพ์งานขาวดำมากที่สุด ระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์และผู้ใช้งานอยู่ในช่วง 1-3 เมตร ผู้ใช้รายงานสิ่งรบกวนที่เกิดจากการใช้เครื่องพิมพ์ โดยมีอาการไอ จาม น้ำมูกไหล เกิดขึ้นบ่อยๆ สูงถึง 31% ตามมาด้วยอาการระคายเคืองจมูก ตา คอ 29% การได้กลิ่นไม่พึงประสงค์ 18% และ การถูกรบกวนด้วยฝุ่นละออง 13% Reijula and Sundman-Digert[9] ระบุว่าอัตราการรายงานสิ่งรบกวนอันเนื่องจากสภาพแวดล้อมการทำงานที่สูงกว่า 20% จัดว่าเป็นอัตราที่มากกว่าค่าปกติ ซึ่งในงานวิจัยนี้อาจชี้เป็นนัยว่า อาการไอ จาม น้ำมูกไหล และการระคายเคืองจมูก ตา คอ มีความเกี่ยวข้องกับการใช้งานเครื่องพิมพ์

ผลการวิเคราะห์ว่าปัจจัยภูมิหลังและพฤติกรรมการใช้งานเครื่องพิมพ์มีผลต่อการรายงานสิ่งรบกวนและอาการเจ็บป่วยจากการใช้เครื่องพิมพ์ของบุคลากรในสำนักงานหรือไม่ด้วยการทดสอบไคสแควร์ กำหนดระดับนัยสำคัญ α=0.05 ในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน (H_0) Table 5 แสดงค่า *p*-value จากผลการทดสอบ

Table 5 *p*-value in Chi-square test

	Odor*	Dust*	Irritation*	Cough sneeze*
Age	0.277	0.354	0.427	0.347
Gender	0.759	0.795	0.488	0.62
Occupation	0.294	0.507	0.245	0.229
Printer usage period	0.135	0.078	0.275	0.017**
Type of printer used	0.394	0.836	0.698	0.668
Printing duration for each time	0.682	0.521	0.578	0.508
Number of daily usage	0.398	0.132	0.09	0.599
Printing format	0.842	0.331	0.508	0.388
Distance between printer and user	0.002**	0.073	0.04**	0.021**

* Description of environmental complaints shown in Table 4

** Significance at α=0.05; rejecting the null hypothesis

จากผลการทดสอบสมมติฐานด้วยไคสแควร์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า การได้กลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ขึ้นกับระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์กับผู้ใช้งาน การระคายเคืองจมูก ตา คอขึ้นกับระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์กับผู้ใช้งานเช่นเดียวกัน ส่วนการไอ จามน้ำมูลไหลขึ้นกับทั้งระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์กับผู้ใช้และระยะเวลาการใช้เครื่องพิมพ์ ถึงแม้ว่า *p*-value ของการถูกรบกวนด้วยฝุ่นละอองที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์กับผู้ใช้มีค่าเท่ากับ 0.073 ผลที่ได้อาจพอสรุปในทิศทางเดียวกันได้ว่าปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการรับรู้สิ่งรบกวนของผู้ใช้งานเครื่องพิมพ์คือ ระยะห่างของเครื่องพิมพ์กับผู้ใช้ โดยผู้ใช้ที่นั่งทำงานห่างจากเครื่องพิมพ์น้อยกว่า 1 เมตร รายงานการได้รับผลกระทบจากสิ่งรบกวนมากที่สุด ในขณะที่ปัจจัยอื่น ได้แก่ ชนิดเครื่องพิมพ์ ระยะเวลาพิมพ์ในแต่ละครั้ง จำนวนครั้งที่พิมพ์ในแต่ละวัน และรูปแบบการพิมพ์ ไม่มีผลต่อการถูกรบกวนทั้ง 4 ประเด็นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ตรวจวัดการปล่อยมลพิษอากาศ $PM_{2.5}$ และโอโซนจากเครื่องพิมพ์แบบพ่นหมึกและเลเซอร์ โดยทดสอบพิมพ์ 3 แบบ คือ พิมพ์กระดาษเปล่า พิมพ์ขาวดำ และพิมพ์สี พบว่าเครื่องพิมพ์ทั้งสองประเภทมีการปล่อย $PM_{2.5}$ ขณะพิมพ์ เครื่องพิมพ์พ่นหมึกเครื่องใหม่ปล่อย $PM_{2.5}$ สูงสุดขณะพิมพ์ขาวดำ ในขณะที่เครื่องพิมพ์พ่นหมึกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วปล่อย $PM_{2.5}$ สูงกว่าเครื่องใหม่ทั้งการพิมพ์ 3 แบบ ส่วนเครื่องพิมพ์เลเซอร์เครื่องใหม่ปล่อย $PM_{2.5}$ ทั้งการพิมพ์ 3 แบบเช่นกันและยังปล่อยโอโซนร่วมด้วย นอกจากนี้ผลการสำรวจพฤติกรรมการใช้เครื่องพิมพ์และสิ่งรบกวนจากการใช้งานเครื่องพิมพ์ของบุคลากรในสำนักงานชี้ให้เห็นว่า ระยะห่างระหว่างเครื่องพิมพ์และผู้ใช้งานมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการถูกรบกวนที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องพิมพ์ ได้แก่ การได้กลิ่นไม่พึงประสงค์ การระคายเคือง และการไอจามน้ำมูลไหล และอาจรวมถึงการถูกรบกวนด้วยฝุ่นละอองขณะพิมพ์ซึ่งตรวจพบทั้งจากการใช้เครื่องพิมพ์พ่นหมึกและเลเซอร์ที่ผลิตฝุ่นละอองขนาดเล็กออกมา

ดังนั้นสำนักงานต่างๆ ควรมีมาตรการในการลดผลกระทบของบุคลากรจากการได้รับสัมผัสมลพิษจากการใช้งานเครื่องพิมพ์ เช่น การจัดวางตำแหน่งเครื่องพิมพ์ให้มีระยะห่างมากพอจากผู้ใช้ การจัดให้มีการระบายอากาศของอาคารที่เหมาะสม การดูแลเครื่องพิมพ์ที่มีอายุการใช้งานให้อยู่ในสภาพที่ดีเพื่อลดการปล่อยมลพิษ เป็นต้น อย่างไรก็ดีควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ระดับกำลังไฟฟ้า (วัตต์) ของเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่อาจมีผลต่อการปล่อยโอโซน และการตรวจวัดมลพิษอากาศประเภทสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมาขณะพิมพ์เช่นเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณนายธนากร รัตนพันธุ์ และนางสาวนิราวรรณ คำพรม สำหรับการจัดสร้างอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

1. Wikipedia the free encyclopedia. (2018). Printer (Thai language). Available from: https://th.wikipedia.org/wiki/เครื่องพิมพ์. [cited 29 March 2018].
2. Society for Imaging Science and Technology. (2015). How a printing press works, Virginia: USA. Available from: http://www.imaging.org/site/IST/Resources/Imaging_Tutorials/How_a_Printing_Press_Works/IST/Resources/Tutorials/Printing_Press.aspx?hkey=6 e0 5 0 e2 f-5726-4290-a635-12c39f67a296. [cited 1 April 2018].
3. Wikipedia the free encyclopedia. (2018). Laser printing. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_printing. [cited 29 March 2018].
4. Kagi, N., Fujii, S., Horiba, Y., Namiki, N., Ohtani, Y., Emi, H., Tamura, H., & Kim, Y. S. (2007). Indoor air quality for chemical and ultrafine particle. *Building and Environment, 42*, 1949–1954.
5. Chemical Information Management Unit (2007). CHEMTRACK – Particles from laser printer. Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM), Chulalongkorn University. Available from: http://www.chemtrack.org/NewsDetail.asp?TID=2&ID=60. [cited 29 March 2018].
6. Ongwandee, M., Moonrinta, R., Panyametheekul, S., Tangbanluekal, C., & Morrison, G. (2009). Concentrations and strengths of formaldehyde and acetaldehyde in office buildings in Bangkok, Thailand. *Indoor and Built Environment*, *18(6)*, 569-575.
7. ASTM (2000). Standard Test Method for Detecting Air Exchange in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution, ASTM E741-00. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania: USA.
8. McKone, T., Maddalena, R., Destaillats, H., Hammond, K., Hodgson, A., Russell, M., & Perrino, C. (2009). Report - Indoor Pollutant Emissions from Electronic Office Equipment. Air Resources Board (ARB) and the California Energy Commission, USA.
9. Reijula, K. & Sundman-Digert, C. (2004). Assessment of Indoor Air Problems at Work with a Questionnaire. *Journal of Occupational and Environmental Medicine, 61*, 33-38.