Dynamic Response Analysis for Toxic Gas Ventilation

รองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน) กทม.

E-mail: fengpsw@ku.ac.th Tel: 662-9428555 ext. 1803

Abstract

Modern industry with its complexity of operations and processes used an increasing number of chemical compounds and substances, many of which are highly toxic. The use of such materials may result in vapors in the workroom air in concentrations which exceed safe levels. Effective designed ventilation offers a solution to these problems where worker protection is needed. Conventionally, ventilation designs have been using steady state condition. However, this design method has some limitations and cannot analyze the transient state. Particularly, the high toxic chemical compound is required accurate ventilation control for human safety. This research work focused into the dynamic response analysis technique to determine the vapor concentration change over time. A transient model is a set of time differential equations in vapor concentration, working room volume, and evaporation rate of the solvent. Block diagram technique along with computer simulation technique were applied for the task. The analysis is useful for prediction the time duration when the toxic solvent begins vaporize and accumulate until the vapor concentration reaches dangerous level. Also, it can be used to determine the vapor concentration change over time.

Keywords: industrial ventilation, modeling, transient

บทคัดย่อ

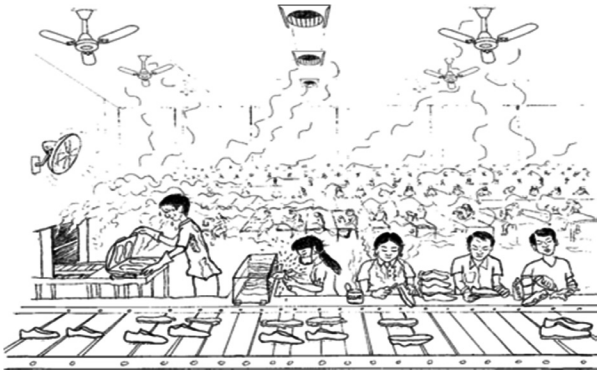
อุตสาหกรรมสมัยใหม่ที่มีความซับซ้อนทั้งในด้านการทำงานและขบวนการผลิต มีการใช้สารเคมีที่เป็นพิษสูง มากขึ้นเรื่อยๆ การใช้สารเคมีเช่น สารระเหยในห้องทำงาน อาจทำให้เกิดความเข้มข้นในระดับที่สูงเกินค่าความปลอดภัย ที่มาตรฐานและกฎหมายบังคับ การออกแบบระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ ช่วยแก้ไขปัญหาเหล่านี้ให้กับบุคลากรที่ทำงานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ การออกแบบระบบระบายอากาศ ที่ดำเนินการกันในปัจจุบัน จะใช้วิธีอ้างอิงจากสภาวะคงตัว ซึ่งวิธีการออกแบบนี้จะมีข้อจำกัดและไม่สามารถวิเคราะห์สภาวะที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากเวลาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารเคมีที่มีความเป็นพิษสูง ต้องการการควบคุมการระบายอากาศที่แม่นยำ เพื่อความปลอดภัยของคนทำงาน งานวิจัยเน้นไปที่เทคนิคการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารเคมีที่ระเหยต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป แบบจำลองทางพลศาสตร์เป็นกลุ่มสมการอนุพันธ์ต่อเวลา อยู่ในรูปแบบของความเข้มข้นของไอจากสารละลาย, ปริมาตรห้องทำงาน, อัตราการระเหยของสารละลาย เทคนิคการใช้ block diagram และ computer simulation ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ วิธีวิเคราะห์มีประโยชน์ ในการนำไปใช้หาค่าช่วงระยะเวลา ที่สารละลายระเหยกลายเป็นไอจากจุดเริ่มต้น และสะสมจนถึงความเข้มข้นในระดับที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ อีกทั้งวิธีวิเคราะห์นี้ยังสามารถนำไปใช้ในการหาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารเคมีที่ระเหย ต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา ณ ช่วงใดๆ ได้อีกด้วย

Keywords: industrial ventilation, modeling, transient

1. Introduction

อุตสาหกรรมสมัยใหม่ที่มีความซับซ้อนทั้งในด้านการทำงานและขบวนการผลิต มีการใช้สารเคมีที่เป็นพิษสูง มากขึ้นเรื่อยๆ การใช้สารเคมีเช่น สารระเหยในห้องทำงาน อาจทำให้เกิดความเข้มข้นในระดับที่สูงเกินค่าความปลอดภัย ที่มาตรฐานและกฎหมายบังคับ

กฎกระทรวงแรงงาน กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย พ.ศ. 2556 หมวด 3 การคุ้มครองความปลอดภัย ข้อ 10 ในบริเวณที่ลูกจ้างทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย ให้นายจ้างจัดให้มีสภาพและคุณลักษณะ ดังต่อไปนี้ มีระบบป้องกันและกำจัดอากาศเสียโดยใช้ระบบระบายอากาศเฉพาะที่ ระบบเปียก การปิดคลุม หรือระบบอื่น เพื่อมิให้มีสารเคมีอันตรายในบรรยากาศเกินปริมาณที่กำหนด และป้องกัน มิให้อากาศที่ระบายออกไปเป็นอันตรายต่อผู้อื่น หมวด ๔ การเก็บรักษา การบรรจุและการถ่ายเทสารเคมีอันตราย ข้อ 17 ให้นายจ้างจัดสถานที่เก็บรักษาสารเคมีอันตรายให้มีระบบระบายอากาศที่เหมาะสม และเกิดความปลอดภัยแก่ลูกจ้างที่ปฏิบัติงานและจัดการป้องกันมิให้อากาศที่ระบายออกเป็นอันตรายแก่ผู้อื่น



รูปที่ 1 : สภาพการทำงานที่มีการระบายอากาศที่ไม่เหมาะสม (ref: Workers' Guide to Health and Safety Todd Jailer, 2015)

อุตสาหกรรมและลักษณะงานที่ต้องสัมผัสกับ Solvents เป็นจำนวนมาก ได้แก่ การทาสีที่ต้องใช้สีที่มี solvent based โดยเฉพาะสีสเปรย์ โรงงานผลิตสี โดยเฉพาะโรงงานที่ใช้มือทำความสะอาดอุปกรณ์โดยใช้ solvent ล้าง การผลิต glass fiber reinforced polyester plastics การทำกรอบหรืออัดกรอบรูป (toluene) การทำความสะอาดหรือล้างคราบมันที่ผิวโลหะ (trichloroethane) และอุตสาหกรรมซักแห้ง (perchloroethylene)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC: Volatile Organic Compound) คือ กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compounds) ที่มีความดันไอมากกว่า 1 มิลลิเมตรปรอท สามารถระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันปกติ ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างสารละลาย Methyl chloroform เป็นกรณีศึกษาเนื่องจากมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมเป็น vapor degreasing และใช้เป็นตัวทำละลายในการล้างชิ้นงานโลหะ และเป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมการพิมพ์ ในเครื่องใช้สำนักงาน โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ และยาฆ่าแมลง เป็นตัวสกัดน้ำมันไขมัน และเรซิน ใช้เป็น aerosol Propellant

Methyl chloroform (Trichloroethane) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ชื่อสามัญ Methyl Chloroform สูตรทางเคมี CH_3CCl_3 กลิ่นคล้ายยาสลบคลอโรฟอร์ม สารเคมีในกลุ่มนี้ สามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้ 3 ทางคือ การหายใจเข้าทางปอด การกินหรือกลืนเข้าทางปาก และการสัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งเมื่อได้รับเข้าไปในร่างกายแล้วจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

ในมนุษย์พบว่าคลอโรฟอร์มรบกวนต่อระบบประสาทส่วนกลาง (สมอง) ตับ และไต ภายหลังได้รับโดยการหายใจหรือดื่มเข้าไปในปริมาณสูง การหายใจสารนี้ที่ความเข้มข้นสูง ทำให้กดการหายใจ (Respiratory Depression) เสียการทรงตัว ความดันลด และหัวใจวาย ที่ความเข้มข้นต่ำ อาจมีอาการปวดศรีษะ ระคายเคืองตา หากมีการหายใจหรือดื่มกินเข้าไปเป็นเวลาต่อเนื่องพบว่ามีการทำลายของตับและไต และมีผลต่อมะเร็งของตับและไต

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงอุตสาหกรรม ในฐานะหน่วยงานที่มีภารกิจเกี่ยวกับการ กำกับ ดูแล อำนวยการประสานงาน ติดตาม และประเมินผลเกี่ยวกับการฟื้นฟู คุ้มครอง และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี (คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ต้องไม่เกิน 0.43 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง (คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ต้องไม่เกิน 57 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) ลงวันที่ 30 พฤษภาคม 2520 กระทรวงมหาดไทยได้กำหนดสวัสดิการเกี่ยวกับสุขภาพอนามัยและความปลอดภัยสำหรับลูกจ้างไว้ หมวด 1 สารเคมี ข้อ 3 ไม่ว่าระยะเวลาใดของการทำ งานปกติ ห้ามมิให้นายจ้างให้ลูกจ้างทำงานในที่ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารเคมี (Chloroform) เกินกว่า 50 ppm (ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร) หรือ 240 (mg/m^3) มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร อีกทั้งยังมีข้อกำหนดให้ภายในสถานที่ประกอบการที่มีการใช้สารเคมีที่กำหนดไว้ ซึ่งสภาพของการใช้นั้นอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้หรือผู้อยู่ใกล้เคียง ให้นายจ้างจัดห้องหรืออาคารสำหรับการใช้สารเคมีไว้โดยเฉพาะ และในกรณีที่ภายในสถานที่ประกอบการที่มีสารเคมีฟุ้งกระจายสู่

บรรยากาศของการทำงานเกินกว่าที่กำหนดไว้ ให้นายจ้างดำเนินการแก้ไขหรือปรับปรุงเพื่อลดความเข้มข้นของสารเคมี มิให้เกินกว่าที่กำหนดไว้

ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) องค์กรอิสระของสหรัฐอเมริกาที่ทำงานในด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรม ทำงานในรูปของคณะกรรมการที่มีสมาชิกจากภาครัฐและเอกชน ทำหน้าที่ในการกำหนดระดับความเข้มข้นของสารเคมีในอุตสาหกรรม ได้มีการกำหนดมาตรฐานระดับความเข้มข้นของ Chloroform ไว้ที่ TLVTWA: 350 ppm และ TLVSTEL: 450 ppm

TLV (Threshold Limit Values) คือค่ามาตรฐานของสารเคมีในบรรยากาศการทำงานซึ่ง กำหนดโดยองค์กร ACGIH หมายถึงค่าความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศซึ่งคนปกติ จะสามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้โดยไม่เกิดผลกระทบใด ๆ ค่า TLV แบ่งออกเป็น

1) TLV—TWA (Threshold Limit Value — Time Weighted Average) หมายถึงค่าความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศที่ปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานจะได้รับในระยะเวลาไม่เกิน 8 ชั่วโมงทำงานติดต่อกันใน 1 วันเป็นเวลา 5 วันต่อสัปดาห์

2) TLV—STEL (Threshold Limit Value — Shot Term Exposure Limit) หมายถึงค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารเคมีในอากาศที่ปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานจะได้รับในระยะเวลา 15 นาที และได้รับซ้ำกันไม่เกิน 4 ครั้ง ใน 1 วัน แต่ละครั้งต้องห่างกันอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าปริมาณที่ได้รับรวมทั้งหมดจะไม่เกินค่า TLV — TWA ก็ตาม

3) TLV—C (Threshold Limit Value — Ceiling Exposure Limit) หมายถึงค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับขณะใด ๆ ที่ปฏิบัติงาน จะสูงเกินกว่าค่าความเข้มข้นนี้ไม่ได้เลย

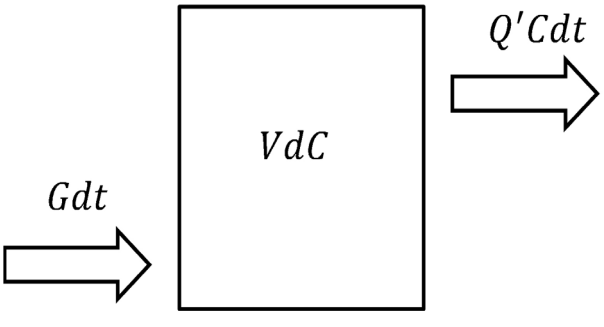
ค่า TLV — TWA, TLV — STEL และ TLV — C นี้ ผู้ให้นิยามคือ ACGIH เพื่อใช้บอกกำกับค่ามาตรฐาน TLV อย่างไรก็ตาม หลักการของค่าเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับค่า REL (Recommended Exposure Limit) ขององค์กร NIOSH และค่า PEL (Permissible Exposure Limit) ขององค์กร OSHA ได้เช่นเดียวกัน ค่ามาตรฐานระดับสารเคมีในบรรยากาศการทำงานเหล่านี้รวมเรียกว่าค่า Occupational Exposure Limit (OEL) ซึ่งในประเทศอื่นนอกจากสหรัฐอเมริกาค่ามาตรฐาน OEL อาจมีชื่อเรียกเป็นอย่างอื่นต่างออกไปได้ เช่น ในอังกฤษจะเรียกว่าค่า Occupational Exposure Standard (OES) ในเยอรมันจะเรียกว่าค่า Maximum Workplace Concentration (MAK) แม้ชื่อเรียกจะต่างกันไปในแต่ละประเทศ แต่หลักการส่วนใหญ่จะคล้ายคลึงกันคือตามหลักการของ ACGIH — TLV

การออกแบบระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพช่วยแก้ไขปัญหาเหล่านี้ให้กับบุคลากรที่ทำงานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ การออกแบบระบบระบายอากาศ ที่ดำเนินการกันในปัจจุบัน จะใช้วิธีอ้างอิงจากสภาวะคงตัว ซึ่งวิธีการออกแบบนี้จะมีข้อจำกัดและไม่สามารถวิเคราะห์สภาวะที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากเวลาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงต้องการการควบคุมการระบายอากาศที่แม่นยำ เพื่อความปลอดภัยของคนทำงาน งานวิจัยเน้นไปที่เทคนิคการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารเคมีที่ระเหยต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป แบบจำลองทางพลศาสตร์เป็นกลุ่มสมการอนุพันธ์ต่อเวลา อยู่ในรูปแบบของความเข้มข้นของไอจากสารละลาย, ปริมาตรห้องทำงาน, อัตราการระเหยของสารละลาย เทคนิคการใช้ block diagram และ computer simulation ได้ถูกนำมาใช้

ในการวิเคราะห์ วิธีวิเคราะห์มีประโยชน์ ในการนำไปใช้หาค่าช่วงระยะเวลา ที่สารละลายระเหยกลายเป็นไอจากจุดเริ่มต้น และสะสมจนถึงความเข้มข้นในระดับที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ อีกทั้งวิธีวิเคราะห์นี้ยังสามารถนำไปใช้ในการหาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารเคมีที่ระเหย ต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา ณ ช่วงใดๆ ได้อีกด้วย

2. System modeling (Numerical analysis)

ห้องหนึ่งในโรงงานที่มีปริมาตรห้อง (volume of room) V ที่มีแหล่งกำเนิดไอระเหยจากสารละลายที่เป็นพิษ มีอัตราการเกิดไอระเหยพิษ (rate of generation) G มีอัตราการระบายอากาศออกจากห้อง (effective volumetric flow rate) Q' โดยที่ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) ใช้ตัวย่อว่า C ผลต่างระหว่างมวลของไอระเหยที่เกิดจากแหล่งกำเนิด Gdt และมวลของไอระเหยที่เกิดจากการระบายอากาศออกจากห้อง Q'Cdt เท่ากับ มวลของไอระเหยที่สะสมในห้อง Vdc ผลต่างนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ mass balance คือ



รูปที่ 2: Schematic diagram of Ventilation system

Rate of accumulation = Rate of generation — Rate of removal

$$VdC = Gdt - Q'Cdt$$

where

V = volume of room, ft3

G = rate of generation, cfm

Q' = effective volumetric flow rate, cfm

C = concentration of gas or vapor

t = time

จัดรูปสมการได้ว่า

$$\frac{dC}{G - Q'C} = \frac{dt}{V}$$

Integrate ทั้ง 2 ด้านของสมการ

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{G - Q'C} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{V}$$

$$ln\left(\frac{G - Q'C_2}{G - Q'C_1}\right) = -\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V}$$

เมื่อ 1 หมายถึงสภาวะเริ่มต้น และ 2 หมายถึงสภาวะสุดท้ายที่พิจารณา

เมื่อต้องการวิเคราะห์หาช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลง (t_2-t_1) หรือ ΔT ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) จาก C_1 มาเป็น C_2

$$\Delta T = -\frac{V}{Q'}\left(ln\left(\frac{G - Q'C_2}{G - Q'C_1}\right)\right)$$

ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) มีหน่วยเป็น ppm (part per million) หรือ parts/10^6 ตัวอย่างเช่น ถ้า C_2 = 200 ppm ให้ระบุค่าในสมการว่า $C_2 = 200/10^6$

เมื่อต้องการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) C_2 โดยการแก้สมการจาก Natural logarithm function

$$ln\left(\frac{G - Q'C_2}{G - Q'C_1}\right) = -\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V}$$

$$\frac{(G - Q'C_2)}{(G - Q'C_1)} = e^{-\left\{\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V}\right\}}$$

$$(G - Q'C_2) = (G - Q'C_1)\, e^{-\left\{\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V}\right\}}$$

$$(Q'C_2 - G) = (Q'C_1 - G)\, e^{-\left\{\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V}\right\}}$$

$$C_2 = \frac{\left\{(Q'C_1 - G)\, e^{-\left\{\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V}\right\}}\right\} + G}{Q'}$$

ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) ที่คำนวณได้จากสมการนี้ ถ้าต้องการแปลงหน่วยให้เป็น ppm จะต้องคูณด้วย 106

เนื่องจากในสภาพของห้องที่มีการผสมอากาศและไอระเหยที่ไม่สมบูรณ์ ACGIH มีการกำหนดค่า factor K สำหรับสภาพการหมุนเวียนระบายอากาศแบบต่างๆ ดังนั้น

$$Q' = \frac{Q}{K}$$

เมื่อ

Q' = effective ventilation rate, cfm

Q = actual ventilation rate, cfm

K = a factor to allow for incomplete mixing

อัตราการเกิดไอระเหยพิษ (rate of generation) G จากแหล่งกำเนิดสารละลายที่เป็นพิษ สามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$G = \frac{403 \times SG \times ER}{MW}$$

เมื่อ

G = generation rate, cfm

Constant = 403 (the volume in ft^3 that 1 pint of liquid, when vaporized, will occupy at STP, ft^3/pint)

SG = specific gravity of volatile liquid

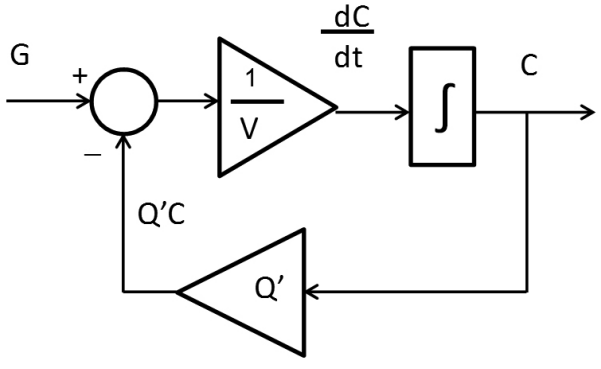
ER = evaporation rate of liquid, pts/min

MW = molecular weight of liquid

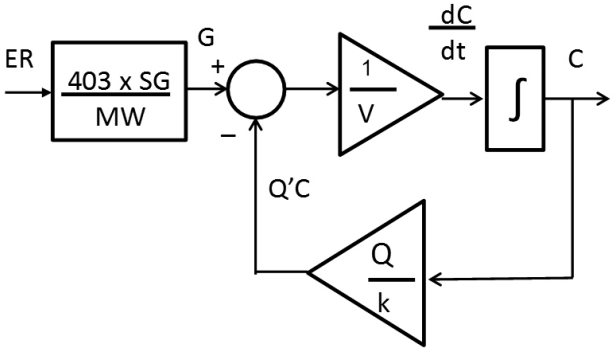
3. Dynamic analysis by computer simulation

การวิเคราะห์สมการอนุพันธ์ Laplace transforms เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของระบบ Laplace transform ได้ถูกใช้ประยุกต์ใช้กับสมการ ventilation พารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ ได้ถูกเชื่อมโยงเข้าหากัน ด้วยเทคนิคของ block diagram การเชื่อมโยงค่า system gain ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากเวลา ในที่นี้คือ V (volume of room) และ Q' (effective ventilation rate, cfm) ค่า integrator ที่เป็นขั้นตอนย่อยที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาแสดงการเชื่อมโยงระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลง concentration ของไอระเหย dC/dt และ การเปลี่ยนแปลง concentration ของไอระเหย C summing junction point เป็นขบวนการที่รวมผลกระทบของสอง input ที่มาจากค่า G = rate of generation, cfm และ negative feedback

ที่มาจากผลคูณระหว่าง Q' และ C อาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นี้ เป็น แบบจำลองแบบ SISO (single input and single output) โดยมี G หรือ ER เป็น input และ C เป็น output มี forward function เป็น 1/Vs มี feedback function เป็น Q/k



รูปที่ 3 : Block diagram of Ventilation system เมื่อ rate of generation G เป็น input



รูปที่ 4 : Block diagram of Ventilation system เมื่อ evaporation rate of liquid ER เป็น input

4. การประยุกต์ใช้งานกับกรณีศึกษาสารระเหย Methyl Chloroform

เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานเข้ากับห้องผลิตห้องหนึ่งในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอีเล็คโทรนิกส์ มีปริมาตรห้องขนาด 100,000 cu.ft (พื้นที่ 696 sq.m x ความสูง 4 m) มีการการใช้ Methyl Chloroform ซึ่งเป็นสารไม่มีสี มี Melting point −33 °C Boiling point 74 °C Molar mass 133.40 g/mol Density 1.32 g/cm3

สามารถละลายในน้ำได้ 0.4% ที่ 20 deg C มีความดันไอ Vapor pressure 100 mmHg ที่ 20 deg C เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC: Volatile Organic Compound) ที่มีความดันไอมากกว่า 1 มิลลิเมตรปรอท จึงสามารถระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันปกติ Methyl chloroform ถูกใช้เป็น vapor degreasing และใช้เป็นตัวทำละลายในการล้างชิ้นงานโลหะ จากการตรวจสอบพบว่า สารละลายดังกล่าวมีการสูญเสียไปเนื่องจากการระเหยด้วยอัตรา 0.142 Liter/min (0.0375 Gallon/min = 0.3 pts/min) สามารถวิเคราะห์หา อัตราการเกิดไอระเหยพิษ (rate of generation) G จากแหล่งกำเนิดสารละลายที่เป็นพิษสามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$G = (403 \times SG \times ER) / MW$$

$$= 403 \times 1.32 \times 0.3 / 133.4$$

$$= 1.2 \text{ cfm}$$

ระบบระบายอากาศสามารถระบายอากาศได้ 2,000 cfm (Q' = 2,000 cfm) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่นำเสนอไว้ สามารถนำมาวิเคราะห์เฉพาะจุดที่สนใจได้ ยกตัวอย่าง การตรวจสอบเวลาเมื่อมีการกำหนดค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษสมมติว่าต้องการตรวจสอบเวลาเมื่อมีการกำหนดค่า

ความเข้มข้น C2 = 200 ppm โดยเริ่มต้นจาก initial condition ที่ค่า Concentration C1 = 0 สามารถใช้สมการ

$$\Delta T = -\frac{V}{Q'}\left(ln\left(\frac{G-Q'C_2}{G-Q'C_1}\right)\right)$$

$$\Delta T = -\frac{100{,}000}{2{,}000}\left(ln\left(\frac{1.2-(2{,}000)(200)}{1.2-(2{,}000)(0)}\right)\right)$$

$$\Delta T = 20.3\ min$$

แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ห้องขนาด 100,000 cu.ft ที่มีการทำงานกับสารอันตราย มีการระเหยของไอพิษอันตราย Methyl Chloroform ด้วยอัตรา 1.2 cfm และมีการระบายอากาศอยู่แล้ว 2,000 cfm ก็ยังคงทำให้เกิดการสะสมของสารดังกล่าว ซึ่งถ้าเริ่มต้นการระเหยจากสภาวะที่ไม่มีการสะสมของสารดังกล่าวเลย จะใช้เวลาเพียง 20.3 นาทีในการพัฒนาการสะสมความเข้มข้นของไอพิษอันตรายให้สูงขึ้น กลายเป็น 200 ppm

ยกตัวอย่าง การตรวจสอบความเข้มข้นของไอระเหยพิษเมื่อมีการกำหนดระยะเวลา สมมติว่าต้องการตรวจสอบความเข้มข้นของไอระเหยพิษเมื่อมีการกำหนดระยะเวลา 60 นาที โดยเริ่มต้นจาก initial condition ที่ค่า Concentration C1 = 0 สามารถใช้สมการ

$$C_2 = \frac{\left\{(Q'C_1 - G)\ e^{-\left\{\frac{Q'(t_2-t_1)}{V}\right\}}\right\} + G}{Q'}$$

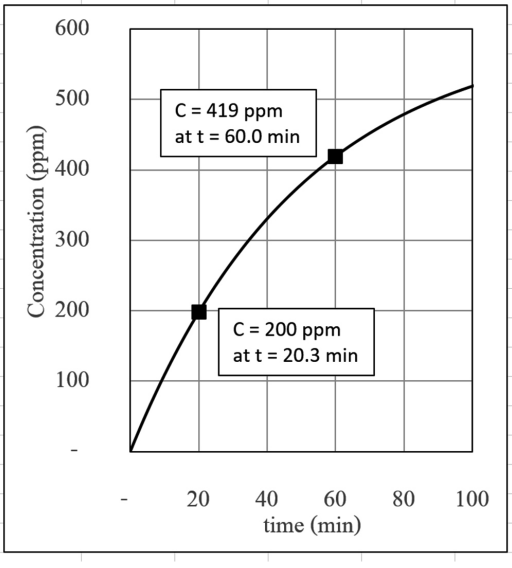
$$C_2 = \frac{\left\{((2{,}000)\ (0) - 1.2)\ e^{-\left\{\frac{(2{,}000)\ (60)}{100{,}000}\right\}}\right\} + 1.2}{2{,}000}$$

$$C_2 = 4.194\ \times 10^{-4}$$
$$= 419.4\ \times\ 10^{-6}$$
$$= 419\ ppm$$

แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ห้องขนาด 100,000 cu.ft ที่มีการทำงานกับสารอันตราย มีการระเหยของไอพิษอันตราย Methyl Chloroform ด้วยอัตรา 1.2 cfm และมีการระบายอากาศอยู่แล้ว 2,000 cfm ก็ยังคงทำให้เกิดการสะสมของสารดังกล่าว โดยเริ่มต้นจาก initial condition ที่ค่า Concentration C1 = 0 เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที การสะสมของความเข้มข้นของไอพิษอันตรายสูงขึ้นเป็น 419 ppm

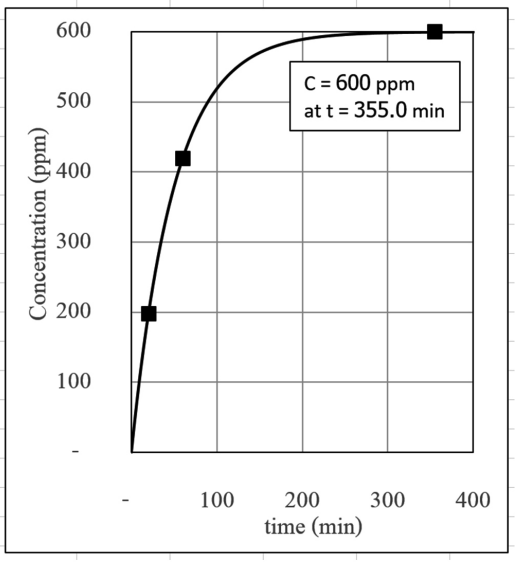
เนื่องจากเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของไอพิษอันตราย เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบพลศาสตร์ (dynamic) เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา ดังนั้น เทคนิคการวิเคราะห์แบบ dynamic simulation โดยใช้ block diagram จึงถูกนำมาใช้

แบบจำลองแบบ block diagram ที่ถูกพัฒนาไว้ตามรูป x ได้ถูกนำไปสร้างใน Matlab & Simulink program มีการตั้งค่า sampling rate ที่ทุก 1 นาที มี input เป็น ER = evaporation rate of liquid หน่วยเป็น pts/min มี output เป็น C = concentration of gas or vapor หน่วยเป็น ppm ผลของการ simulation ได้แสดงไว้ดังรูป



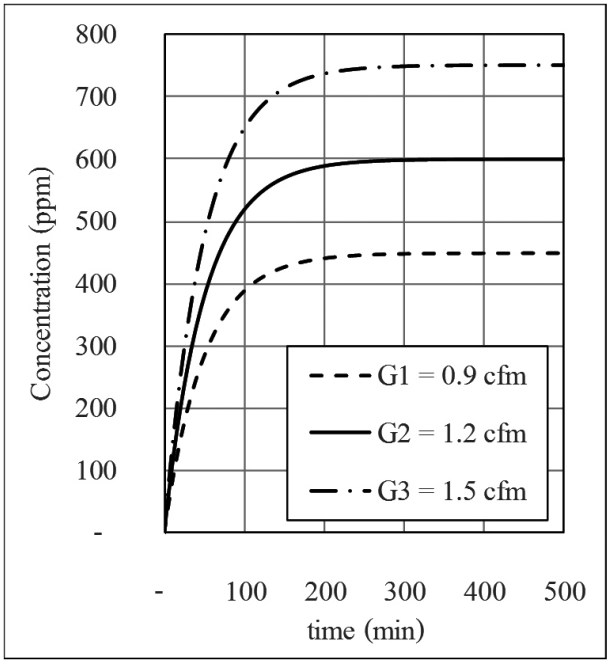
รูปที่ 5 : ผลการ simulation สำหรับ G = 1.2 cfm, Q' = 2,000 cfm ในช่วงเวลา 100 นาที

จะเห็นไว้ ค่าที่ได้มีความสอดคล้อง ระหว่างผลการคำนวณแบบ manual calculation และ computer simulation ที่ความเข้มข้นของไอระเหยพิษเท่ากับ 200 ppm ณ เวลา 20.3 นาที และ ความเข้มข้นของไอระเหยพิษเท่ากับ 419 ppm ณ เวลา 60 นาที โดยที่ข้อดีของการใช้ computer simulation ทำให้เห็นความต่อเนื่องของการสะสมของความเข้มข้นของไอระเหยพิษ



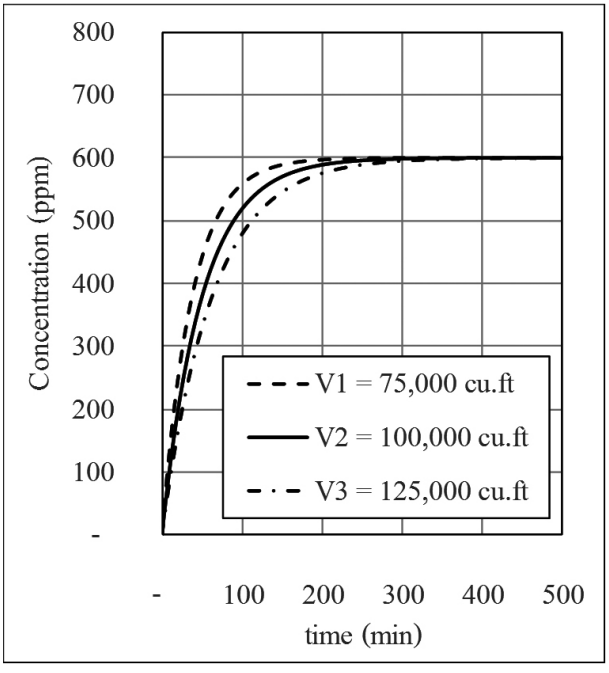
รูปที่ 6 : ผลการ simulation สำหรับ G = 1.2 cfm, Q' = 2,000 cfm ในช่วงเวลา 400 นาที

ประโยชน์ถัดมาของการใช้ computer simulation ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่า สุดท้ายเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ความเข้มข้นของไอระเหยพิษจะมีค่าเป็นเท่าไร ผ่านเกณฑ์ตามกฎหมายหรือมาตรฐานหรือไม่ และใช้เวลานานเท่าไร ในการพัฒนาการไปถึงจุดดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ จะเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ที่ 600 ppm โดยใช้เวลา 355 นาที (5 ชั่วโมง 55 นาที)

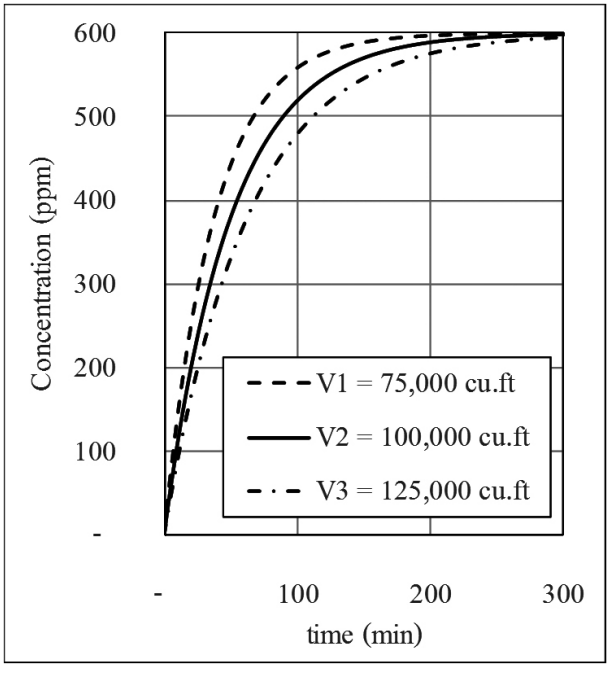


รูปที่ 7 : ผลการ simulation เปรียบเทียบสำหรับค่า rate of generation ที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลา 500 นาที

Computer simulation ยังสามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบที่ส่งผลต่อ ค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ จากรูปจะเห็นได้ว่า ผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษ G generation rate ส่งผลอย่างชัดเจนต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ โดยที่อัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษ G generation rate ที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษสูงขึ้นอย่างชัดเจน อีกทั้ง ผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษ G generation rate ส่งผลอย่างชัดเจนต่อสภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ โดยที่อัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษ G generation rate ที่สูงขึ้นจาก 1.2 cfm มาเป็น 1.5 cfm ทำให้สภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ สูงขึ้นจาก 600 ppm มาเป็น 750 ppm



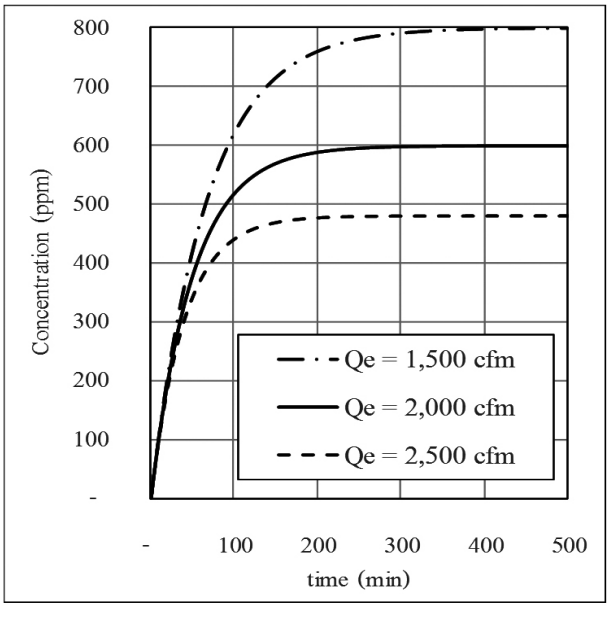
รูปที่ 8 : ผลการ simulation เปรียบเทียบสำหรับค่า room volume ที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลา 500 นาที



รูปที่ 9 : ผลการ simulation เปรียบเทียบสำหรับค่า room volume ที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลา 300 นาที

กรณีที่ห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิต มีขนาดแตกต่างกัน โดยการปรับเปลี่ยนค่า V volume of room ใน Computer simulation จากรูปจะเห็นได้ว่า ผลการเปลี่ยนแปลงของขนาดของห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิตส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ โดยที่ขนาดของห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิต ที่มีขนาดเล็กลง จาก 100,000 cu.ft มาเป็น 75,000 cu.ft ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษสูงขึ้น จากเดิมเข้าสู่สภาวะคงตัว 600 ppm ที่ 355 นาที มาเป็นที่ 266 นาที

ข้อสังเกตประการหนึ่งจะเห็นได้ว่า กรณีที่ห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิต มีขนาดแตกต่างกัน ไม่ได้ส่งผลต่อสภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษเลย โดยที่กรณีที่ห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงขนาดจาก 75,000 cu.ft มาเป็น 125,000 cu.ft ไม่ได้ส่งผลต่อสภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษเลย โดยยังมีค่าอยู่ที่ 600 ppm



รูปที่ 8 : ผลการ simulation เปรียบเทียบสำหรับค่า effective ventilation rate ที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลา 500 นาที

การออกแบบขนาดพัดลม เพื่อกำหนดเวลาที่เหมาะสมในการควบคุมการระบายอากาศ รวมถึงสามารถกำหนดได้ว่าจะให้สภาวะสมดุลสุดท้ายของห้องไปอยู่ สภาวะใด สามารถทำได้โดยการใช้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ชุดนี้

Computer simulation สามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศในระบบทีส่งผลต่อ ค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ จากรูปจะเห็นได้ว่า ผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศ effective ventilation rate ส่งผลอย่างชัดเจนต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ โดยที่อัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศ effective ventilation rate ที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษลดลงอย่างชัดเจน และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นจากเดิม

โดยที่อัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศ effective ventilation rate ที่สูงขึ้นจาก 2,000 cfm มาเป็น 2,500 cfm ทำให้สภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ ลดลงจาก 600 ppm มาเป็น 480 ppm และยังทำให้การเข้าสู่สภาวะสมดุลเข้าได้เร็วขึ้นจากเดิม ณ เวลา 355 นาที มาเป็นที่ 275 นาที

5. Conclusions

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบระบายอากาศ สามารถสร้างขึ้นได้จากหลักการทรงมวล (conservative of mass) โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ขนาดของห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิต (volume of room), อัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษ (generation rate), ค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ (concentration), อัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศ (effective ventilation rate)

ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

เทคนิคการวิเคราะห์แบบ dynamic simulation ทำให้สามารถการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษต่อเวลาได้

จากผลการวิเคราะห์แบบ dynamic simulation พบว่าอัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษ (rate of generation) ที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ (concentration) สูงขึ้น อีกทั้งอัตราการระเหยเป็นไอของสารพิษที่สูงขึ้นส่งผลต่อสภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษที่สูงขึ้น

ผลการเปลี่ยนแปลงของขนาดของห้องโรงงานหรือห้องขบวนการผลิตส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ โดยที่ขนาดของห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิต ที่มีขนาดเล็กลงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษสูงขึ้น แต่กรณีที่ห้องโรงงาน หรือห้องขบวนการผลิต มีขนาดแตกต่างกัน ไม่ได้ส่งผลต่อสภาวะคงตัวของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษเลย

การออกแบบขนาดพัดลม เพื่อกำหนดเวลาที่เหมาะสมในการควบคุมการระบายอากาศ รวมถึงสามารถกำหนดได้ว่าจะให้สภาวะสมดุลสุดท้ายของห้องไปอยู่ สภาวะใด สามารถทำได้โดยการใช้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ชุดนี้

ผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศ (effective ventilation rate) ส่งผลอย่างชัดเจนต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษ โดยที่อัตราการไหลของพัดลมระบายอากาศ ที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไอระเหยพิษลดลงอย่างชัดเจน และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นจากเดิม

6. Acknowledgements

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก โครงการวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมระบบปรับอากาศและทำความเย็น คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กทม.

7. References

1) Yan Shi and Shuai Ren, Modelling and Simulation of Volume Controlled Mechanical Ventilation System, Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering Volume 2014, Article ID 271053, 7 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2014/271053
2) Arash Guity and Bob Gulick, Healthcare Ventilation Research Collaborative: Displacement Ventilation Research —Phase II Summary Report, December 2009
3) Todd Jailer, Workers' Guide to Health and Safety, 2015
4) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH).
5) Edward G. Pita (2002), Air Conditioning Principles and Systems: An Energy Approach, Fourth Edition.
6) W.F. Stoecker (1989). Design of Thermal Systems, Third Edition, McGraw-Hill.
7) M.H.Kim and C.W.Bullard (2000), Dynamic Characteristics of a R-410A Split Air Conditioning System, Purdue University, Purdue e-Pubs, International Refrigeration and Air Conditioning Conference.
8) Steve Pfister (2004), Transient Modeling of Vapor Compression Refrigeration Systems Using Measured Compressor COP, Purdue University, Purdue e-Pubs, International Refrigeration and Air Conditioning Conference.
9) B.Yu and A.H.C. van Paassen (2004), Simulink and bond graph modeling of an air-conditioned room, Science Direct, Simulation Modeling Practice and Theroy 12, p 61-76
10) Katsuhiko Ogata (2002). Modern Control Engineering, Fourth Edition, Prentice Hall.
11) ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 94 ตอนที่ 64 ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) พ. ศ. 2520.
12) ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 112 ตอนที่ 52 ง ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2538) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป พ.ศ. 2538 .
13) ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 124 ตอนพิเศษ 143 ง ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 30 (พ.ศ. 2550) เรื่องกำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี พ.ศ. 2550 .
14) ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 13 ง ประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่องกำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับ สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง พ.ศ. 2551