เครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต
An Indoor Air Cleaner for a Non Toxic Room by Electrostatic Technique

พานิช อินต๊ะ[1,*], อาทิตย์ ยาวุฑฒิ[1] วิสูตร อาสนวิจิตร[1] และ อุษณีย์ วินิจเขตคำนวณ[2]

[1] วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
[2] ภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
110 ถนนอินทวโรรส ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200
*ติดต่อ: E-mail: panich_intra@yahoo.com โทร 0-5326-6523 โทรสาร 0-5326-6523

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ พัฒนา และทดสอบสมรรถนะต้นแบบเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต โดยต้นแบบประกอบด้วย ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดตกตะกอนอนุภาค ชุดสร้างไอออน พัดลมดูดอากาศ ตัวควบคุมความเร็ว ตัวตั้งเวลา และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งการทำงานของเครื่องต้นแบบฯจะใช้พัดลมดูดอากาศเข้าภายในระบบโดยผ่านชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบเส้นลวด-แผ่นเพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคจะทำให้อนุภาคฝุ่นละอองเกิดประจุไฟฟ้า หลังจากนั้นฝุ่นละอองและอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าสถิตเหล่านี้จะถูกนำเข้าไปยังชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อที่ประกอบด้วยท่อตกตะกอนและขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรด โดยดิสชาร์จอิเล็กโทรดจะถูกจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ในขณะที่ท่อตกตะกอนมีศักย์เป็นกราวด์จะทำให้เกิดสนามโคโรนาดิสชาร์จขึ้นบริเวณรอบๆดิสชาร์จอิเล็กโทรด เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองที่ถูกอัดประจุเข้ามาในชุดตกตะกอนนี้จะตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่ผนังด้านในของท่อตกตะกอนและอากาศที่สะอาดผ่านออกมาผ่านชุดดิสชาร์จเพื่อดิสชาร์จให้อากาศมีความเป็นกลางของประจุไฟฟ้าเพื่อเพิ่มคุณภาพอากาศที่กรองออกมาให้บริสุทธิ์เป็นธรรมชาติ โดยต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99 % ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที
คำหลัก: ฝุ่นละออง มลพิษทางอากาศ เครื่องบำบัดอากาศในอาคาร

Abstract

In this paper, an indoor air cleaner for a non-toxic room by electrostatic technique was designed, developed and tested. The cleaner prototype consists of a particle charger, a particle collector, an ionizer, a fan, a speed controller, a timer and a high voltage power supply. In this system, a fan draws a sample air into the system through a wire-to-plate particle charger to set a charge on the particulate. After the particle charger, the charged particulates then enter the multiple-tube particle collector that consist multiple-tubes and corona discharge electrodes. In the collector, the discharge electrodes are high voltage power supply, while the multiple-tube is grounded. The corona discharge field inside the collector will be caused around the discharge electrodes. When charged particulates flow into the collector to collect and deposit with the electrostatic force on the inner walls of the outer tube and the air without particulate then passes out through a ionizer to discharge air to the charge neutrality to improve the clean air quality. The developed prototype will be effective in the removal of particulate up to 99% at the time of treatment for 70 minutes.
Keywords: Particulate Matter, Air Pollution, Indoor Air Cleaner.

1. บทนำ

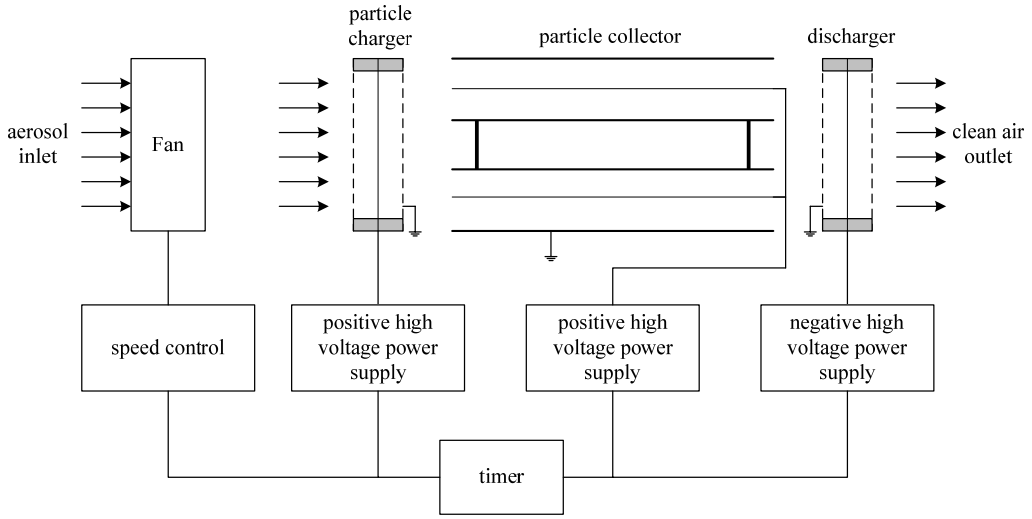
คุณภาพอากาศ (air quality) เป็นเรื่องที่หลายประเทศทั่วโลกกำลังให้ความสนใจและให้ความสำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของประชากรและต่อประสิทธิภาพการทำงานของคนทำงาน เป็นที่ยอมรับว่าคุณภาพอากาศจะดีต่อสุขภาพหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับระดับหรือปริมาณมลพิษที่ปนเปื้อนในอากาศ สารมลพิษที่สำคัญคืออนุภาคฝุ่นละอองลอยขนาดเล็ก (particulate matter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 ไมโครเมตร หรือที่เรียกว่า PM 2.5 ฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กคือการรวมกันของโมเลกุล (molecular) หรือกลุ่มโมเลกุลของสสารหรือสารประกอบต่างๆรวมไปถึงสารมลพิษชีวภาพที่อาจจะเป็นเชื้อรา ไวรัส หรือแบคทีเรีย ที่ลอยอยู่ปนกับฝุ่นละอองในอากาศที่เราหายใจเข้าไป [1] เนื่องจาก PM2.5 จะมีการตกตะกอนค่อนข้างช้าถึงช้ามาก (ระดับชั่วโมง ถึง วัน) จนในบางครั้งถือว่าเป็นประเภทลอยในอากาศอย่างถาวร จึงสามารถแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดหรือบรรยากาศเข้าสู่ที่พักอาศัย สำนักงาน โรงพยาบาล ร่วมไปถึงสถานศึกษา และส่งผลต่อสุขภาพและประสิทธิภาพในการทำงาน

ซึ่งผลกระทบต่อสุขภาพของมลพิษทางอากาศจาก PM 2.5 มาจากองค์ประกอบทางเคมีต่างชนิดปนเปื้อนอยู่ สารเคมีบางตัวมีคุณสมบัติออกซิแดนท์จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น สารโลหะที่มีคาร์บอน กรดเกลือ สารมลพิษอินทรีย์ รวมไปถึงสารมลพิษชีวภาพที่อาจจะเป็นเชื้อรา ไวรัส หรือแบคทีเรีย ซึ่งผลการวิจัยจากต่างประเทศรายงานถึงกลไกการกระตุ้นการหลั่งสารกระตุ้นการอักเสบ โดยอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจะสามารถเร่งให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระและทำให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชั่น ทำให้เกิดการทำลายเม็ดเลือดขาวในปอด ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลันต่อปอดทำให้ปอดอักเสบ ทั้งนี้ในบุคคลที่มีสุขภาพแข็งแรงและปกติ กลไกการป้องกันในร่างกายจะช่วยป้องกันความเสียหายได้ แต่บุคคลที่มีปัญหาทางเดินหายใจ เช่นผู้ที่เป็นโรคหอบหืด ผู้ที่เป็นโรคภูมิแพ้เรื้อรังหรือมีการอักเสบทางเดินหายใจ หรือผู้ที่หายใจเอาสารมลพิษในอากาศ เช่น ควันบุหรี่ หรือสูดโอโซน เข้าไปนั้น ความสามารถในการป้องกันตนเองอาจจะไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจำทำให้เสี่ยงต่อการที่ปอดจะเสียหายและเป็นอันตรายจากสารมลพิษอากาศได้ [1 – 2]

ดังนั้น เครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารแบบไฟฟ้าสถิต (indoor electrostatic air cleaner) มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับโรงพยาบาลโดยเฉพาะห้องปลอดความเป็นพิษ เนื่องจากช่วยในการขจัดปัญหาเรื่องเชื้อโรคโดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย ควันบุหรี่ ฝุ่นและกลิ่นต่างๆ ที่เป็นอัตรายต่อผู้ป่วยได้ [2] แต่เครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารที่มีจำหน่ายในประเทศยังมีราคาค่อนข้างสูง จึงทำให้มีการใช้งานค่อนข้างจำกัด [2 – 3] ดังนั้น จุดมุ่งหมายของบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตที่ใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และมีความเหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์

2. หลักการทำงานของเครื่องต้นแบบฯ

รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานของต้นแบบบำบัดอากาศภายในอาคารและห้องปลอดความเป็นพิษที่จะทำการพัฒนาขึ้น เครื่องบำบัดอากาศภายในอาคาร (indoor electrostatic air purifier) ที่จะพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation) ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองทางทฤษฎีสูงถึง 99 ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ [3] สำหรับฝุ่นละอองระดับต่ำกว่า 2.5 ไมครอนและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ โดยเครื่องบำบัดอากาศต้นแบบประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศ (fan) ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค (particulate charger) ชุดตกตะกอนอนุภาค (particulate collector) และชุดสร้างไอออน (ionizer) ซึ่งการทำงานของเครื่องต้นแบบฯจะใช้พัดลมดูดอากาศเข้าภายในระบบโดยผ่านแผ่นกรองขั้นแรก (pre-filter) เพื่อดักจับอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ก่อนหลังจากนั้นอากาศที่ยังมีอนุภาคขนาดเล็กจะไหลผ่านเข้าสู่ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค (particles charger) แบบเส้นลวด-แผ่น (wire-to-plate charger) เพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคจะทำให้อนุภาคฝุ่นละอองเกิดประจุไฟฟ้า (charged particles) หลังจากนั้นฝุ่นละอองและอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าสถิตเหล่านี้จะถูกนำเข้าไปยังชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อ (multiple-tube type) ที่ประกอบด้วยท่อตกตะกอนและขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรด โดยดิสชาร์จอิเล็กโทรดจะถูกจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ในขณะที่ท่อตกตะกอนมีศักย์เป็นกราวด์จะทำให้เกิดสนามโคโรนาดิสชาร์จขึ้นบริเวณรอบๆดิสชาร์จอิเล็กโทรด เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองที่ถูกอัดประจุเข้ามาในชุดตกตะกอนนี้



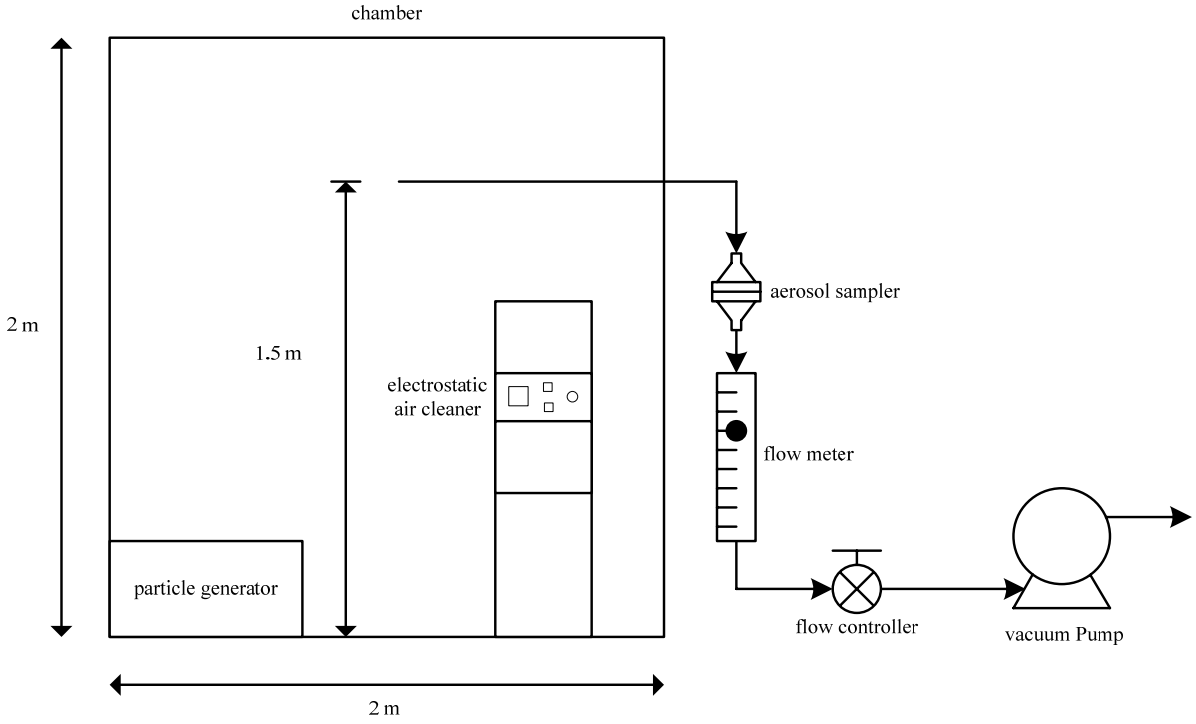
รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารที่พัฒนาขึ้น [2]

รูปที่ 2 รูปถ่ายต้นแบบเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารที่พัฒนาขึ้น

จะตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ที่ผนังด้านในของท่อตกตะกอน (collection tube) และอากาศที่สะอาดผ่านออกมาผ่านชุดดิสชาร์จ (discharger) เพื่อดิสชาร์จให้อากาศมีความเป็นกลางของประจุไฟฟ้า (neutral) เพื่อเพิ่มคุณภาพอากาศที่กรองออกมาให้บริสุทธิ์เป็นธรรมชาติ ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้สามารถปรับความเร็วของอากาศได้และตั้งเวลาการทำงานได้ 24 ชั่วโมง และสามารถถอดล้างทำความสะอาดชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดตกตะกอนอนุภาค และชุดสร้างไอออนได้ตลอดอายุการใช้งาน รูปที่ 2 แสดงรูปถ่ายต้นแบบเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารที่พัฒนาขึ้น

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมการประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบฯ ในการศึกษานี้ได้วางเครื่องต้นแบบฯภายในห้องจำลองขนาดมิติ 2 x 2 x 2 เมตร โดยบริเวณมุมห้องมีการพ่นอนุภาคฝุ่นควันด้วยเครื่องสร้างอนุภาคตัวอย่างการเผาไหม้ (combustion aerosol generator) แบบแพร่กระจายราบเรียบ (laminar diffusion burner) ด้วยน้ำมันที่สภาวะก่อนการเป็นเขม่า (presooting condition) โดยภายใต้สภาวะนี้เขม่าจะถูกสร้างโดยเปลวที่กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งจะให้ความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ต่ำมากๆ โดยการไหลของอากาศที่ตัดผ่านปลายของเปลวไฟ จะช่วยในการสร้างอนุภาคที่มีความเข้มข้นสูงและอากาศยังช่วยพาอนุภาคให้เคลื่อนที่ออกจากห้องเผาไหม้ โดยไอเสียจากเปลวไฟจะถูกผสมกับอากาศอย่างรวดเร็วโดยการใช้เครื่องเป่าอากาศ เพื่อทำให้เกิดอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง โดยปกติแล้วละอองลอยที่ได้จะมีความเข้มข้นจำนวนมากกว่า 10^{13} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตรโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยเฉลี่ยที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะอยู่



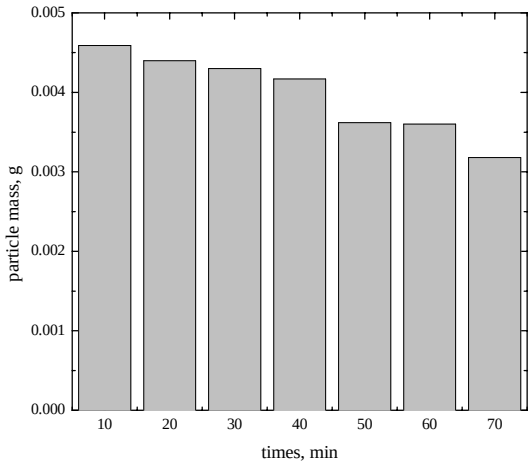
รูปที่ 3 ไดอะแกรมการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องต้นแบบฯ

ในช่วงขนาดเล็กกว่า 1 μm ไปจนถึง 10 μm [4] ซึ่งค่าความเข้มข้นจำนวนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแหล่งจ่ายอนุภาคตัวอย่างนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศผสมและเชื้อเพลิง

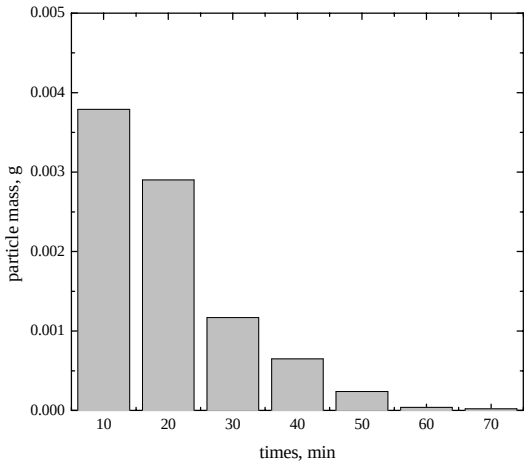
โดยห้องจำลองนี้จะสร้างจากโครงสร้างท่อ PVC และคลุมปกปิดอย่างดีด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการรั่วไหลของควันอนุภาคและให้มีการมองเห็นควันอนุภาคได้ง่าย ในการทดสอบจะทำการพ่นหรือปล่อยอนุภาคฝุ่นควันตัวอย่างบริเวณมุมห้องทดสอบและปล่อยให้อนุภาคฝุ่นควันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วห้องทดสอบ โดยใช้เวลาในการพ่นประมาณ 10 นาที สำหรับการวัดและเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นภายในห้องทดสอบจะใช้วิธีมาตราฐานของ USEPA (40 CFR Parts 50 Appendix L) ซึ่งเป็นวิธีการอ้างอิงสำหรับการวัดของฝุ่นละเอียด PM2.5 ในบรรยากาศ [5] โดยมีการเก็บตัวอย่างอากาศที่ความสูงประมาณ 1.5 เมตร ใช้ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละอองที่ประกอบด้วย ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาค แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA) ของบริษัท Whatman โมเดล EPM 2000 ชุดวัดและควบคุมการไหลของอากาศของ Dwyer และปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) และเก็บตัวอย่างที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที โดยจะเก็บตัวอย่างอนุภาคทุก 10 นาทีเป็นเวลา 70 นาที โดยไม่มีการเปิดเครื่องบำบัดอากาศฯต้นแบบ เพื่อเก็บตัวอย่างอากาศขณะที่ยังไม่มีการบำบัดอากาศ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองใหม่โดยพ่นอนุภาคตัวอย่าง แต่ครั้งนี้จะทำการเปิดเครื่องบำบัดต้นแบบฯและทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคทุก 10 นาทีเป็นเวลา 70 นาที หลังจากนั้นจะนำอนุภาคที่สะสมตัวบนแผ่นกรองอนุภาคทั้งสองนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลของ Sartorious รุ่น Ohaus DV215CD semi microbalance เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดหรือการกำจัดอนุภาคของเครื่องต้นแบบเทียบกับเวลา และทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 การทดลอง

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

รูปที่ 4 (ก) แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของอนุภาคควันเทียบกับเวลาขณะปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ จากรูปพบว่ามวลของอนุภาคที่เก็บตัวอย่างได้ในแต่ละเวลามีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งการลดลงของมวลอนุภาคที่เล็กน้อยนี้อาจจะเนื่องมากจากการแพร่กระจายไปเกาะและสะสมตัวที่ผิวด้านในของพลาสติกที่คลุมและมีการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกลงบนพื้นของห้องจำลอง



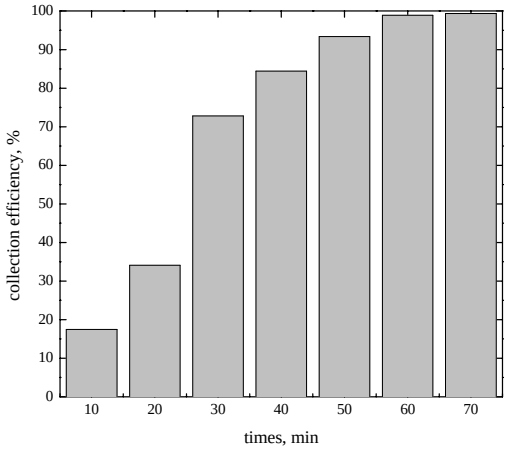
(ก) ขณะปิดเครื่องบำบัดอากาศฯ



(ข) ขณะเปิดเครื่องบำบัดอากาศฯ

รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของอนุภาคควันเทียบกับเวลา

โดยมวลของอนุภาคควันที่พบมีค่าเท่ากับ 0.00459, 0.00440, 0.00430, 0.00417, 0.00362, 0.00360 และ 0.00318 กรัม ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ และรูปที่ 4 (ข) แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของอนุภาคควันเทียบกับเวลาขณะเปิดเครื่องบำบัดอากาศที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ตามลำดับ จากรูปพบว่ามวลของอนุภาคควันที่เก็บตัวอย่างได้มีค่าลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมวลของอนุภาคควันมีค่าเท่ากับ 0.00379, 0.00290, 0.00117, 0.00065, 0.00024, 0.00004 และ 0.00002 กรัม ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที



รูปที่ 5 กราฟประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องบำบัดอากาศฯเทียบกับเวลา

ตามลำดับ รูปที่ 5 แสดงกราฟประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องบำบัดอากาศฯเทียบกับเวลา ซึ่งค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคจะหาได้จากสัดส่วนระหว่างมวลของอนุภาคตัวอย่างในขณะปิดและเปิดเครื่องบำบัดอากาศฯที่เวลาต่างๆ จากรูปพบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องบำบัดอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น โดยเครื่องบำบัดอากาศฯต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะให้ประสิทธิภาพในตกตะกอนหรือการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99 % ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที

5. สรุป

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งประกอบด้วย ชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดตกตะกอนอนุภาค ชุดสร้างไอออน พัดลมดูดอากาศ ตัวควบคุมความเร็ว ตัวตั้งเวลา และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคฝุ่นควันภายในห้องจำลองขนาดมิติ 2 x 2 x 2 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ที่มีการพ่นอนุภาคฝุ่นควันด้วยเครื่องสร้างอนุภาคตัวอย่างการเผาไหม้แพร่กระจายแบบราบเรียบ (laminar diffusion burner) ด้วยน้ำมัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องบำบัดอากาศฯต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในตกตะกอนหรือการกำจัดฝุ่นละอองได้สูงถึง 99 % ที่เวลาในการบำบัดอากาศ 70 นาที

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ รหัสโครงการ MT-RD-2554-03

7. เอกสารอ้างอิง

[1] USEPA. (1998). PM 2.5 General Information, Office of Air Quality Planning and Standards.

[2] พานิช อินต๊ะ อุษณีย์ วินิจเขตคำนวณ อาทิตย์ ยาวุฑฒิ และวิสูตร อาสนวิจิตร. (2554). *รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง การพัฒนาเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยการผสมผสานเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตและการกรอง*, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ

[3] Jaworek, A., Krupa.A. and Czech,T. (2006). Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning: A Brief Review, *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, pp. 133 – 155.

[4] Yawootti, A., Intra, P. and Tippayawong, N. (2010). A Combustion Aerosol Generator for Submicron Aerosol Production, paper presented in *the 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Nong Khai, Thailand.

[5] USEPA. (1997). 40 CFR Parts 50 Appendix L; Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM2.5 in the Atmosphere, Federal Register, Vol. 62, No. 138, pp. 38714 - 38752.