

## การดักจับฝุ่นแป้งจากเครื่องพิมพ์ในโรงงานผลิตกล่องกระดาษและนำกลับมาใช้ใหม่ Recovery of starch powder particles collected from the printing machine in the carton printing factory

เอกมล หวันแสง สุวิชาญ ศักดิ์รัตนานา พีระพงษ์ ทีชสกุล\*  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112  
โทร 074-287-035 โทรสาร 074-212-893 Email: perapong@ratree.psu.ac.th\*

Ekkamon Wanseng, Suvichan Sakrattana, and Perapong Tekasakul\*  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University  
Hat Yai, Songkhla 90112  
Tel: 074-287-035 Fax: 074-212-893 Email: perapong@ratree.psu.ac.th\*

### บทคัดย่อ

เครื่องพิมพ์กล่องกระดาษในโรงงานโดยทั่วไปจะใช้ผงแป้งฝุ่นพ่นระหว่างแผ่นกระดาษหลังจากพิมพ์หมึกแล้ว เพื่อป้องกันการติดกันของแผ่นกระดาษ ทำให้เกิดมลภาวะของฝุ่นที่ฟุ้งในโรงงาน โครงการนี้ได้ศึกษาวิธีการดักอนุภาคฝุ่นแป้งไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายโดยในช่วงแรกได้ใช้วิธีกระแสไฟฟ้าสถิตในการบังคับให้ฝุ่นแป้งเกาะยึดกับกระดาษมากขึ้นซึ่งยังได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากเกิดการฟุ้งกลับของฝุ่นหลังจากที่ฝุ่นเกาะติดกระดาษแล้ว ซึ่งเกิดจากการใช้พัดลมเป่ากดให้กระดาษที่พ่นเคลือบแล้วเคลื่อนที่ลงไปกองอย่างเป็นระเบียบในพาเลทจึงได้ติดตั้งระบบดูดอากาศและใช้ไซโคลนในการดักอนุภาค พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศได้เป็นที่น่าพอใจ ระบบดักฝุ่นนี้สามารถติดตั้งกับเครื่องพิมพ์ที่เหลือทั้งหมดเพื่อลดปริมาณของฝุ่นแป้งที่ฟุ้งในโรงงาน ส่งผลให้คุณภาพชีวิตของพนักงานดีขึ้นและยังสามารถนำฝุ่นแป้งที่ดักได้กลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตด้วย

### Abstract

Anti-setoff powder has been generally used in carton printing machines in order to spray-coat the surface of the paper after being printed. This is necessary since the ink and vanish were not completely dried after the paper was ejected out of the machine even it was heated by an infrared-ray tube heater. This then causes the dispersion of powder dust in the factory. Controll of the dust is necessary since it affects health of workers who are directly exposed to the dust for 8 hours a day.

Electrostatic precipitation technique was employed as the first measure to direct the naturally charged particles on to the paper. However, the collection efficiency was not as high as expected since the particles were re-suspended in the air by a series of fans that were used to push the paper in the pallet. Cyclone was then employed to collect these particles. It has been found that the designed cyclone system has satisfactory performance. This system can then be installed on all other machines in order to reduce air pollution in the factory and result in better health of workers. Moreover, the recovered particles can be reused by mixing them with new powder.

### 1. บทนำ

ในโรงพิมพ์กล่องกระดาษโดยทั่วไปมักจะใช้ผงแป้งพิเศษ (anti set-off powder) พ่นระหว่างแผ่นกระดาษหลังจากพิมพ์หมึกแล้ว เพื่อป้องกันการยึดติดของแผ่นกระดาษเนื่องจากหมึกที่พิมพ์ยังไม่แห้ง ถึงแม้จะมีการให้ความร้อนแล้วก็ตาม หากเครื่องพิมพ์ที่ใช้ไม่มีระบบดักฝุ่นที่ดี ฝุ่นผงที่พ่นก็จะฟุ้งทำให้เกิดมลภาวะของฝุ่นภายในโรงงาน และทำให้เกิดความสกปรกต่อเครื่องโดยไปเกาะตามชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น โซ่ขับ เป็นต้น จึงต้องทำความสะอาดบ่อยและทำให้การบำรุงรักษาทำได้ยากขึ้น

บริษัท เอส แพ็ค แอนด์ พรินท์ จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ ณ เลขที่ 119 หมู่ 1 ถ.กาญจนวนิช ต.ท่าข้าม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เริ่มดำเนินการเมื่อปี พ.ศ.2537 โดยมีผลิตภัณฑ์ คือ กล่องบรรจุภัณฑ์ ใช้วัตถุดิบ คือ กระดาษคราฟท์ กระดาษ กล่อง แป้ง และหมึกพิมพ์

เครื่องจักรหลักที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ เครื่องพิมพ์ offset มีอายุการใช้งาน 10 ปี เครื่องพิมพ์ corrugated มีอายุการใช้งาน 6 ปี ทางบริษัทมีเครื่องพิมพ์ offset ยี่ห้อ Heidelberg จำนวน 3 เครื่อง คือ รุ่น 102 VP รุ่น 102 F และรุ่น 102 F + L รุ่นละ 1 เครื่อง มีการทำงานที่เหมือนกันทั้ง 3 เครื่องข้างต้น จะใช้วัสดุสิ้นเปลืองชนิดหมึกพิมพ์ และวานิช (vanish) โดยมีส่วนผสมของน้ำมัน ทำให้ขั้นตอนการพิมพ์หมึกและวานิชไม่เซ็ทตัว (แห้ง) ในทันที แม้จะใช้ความร้อนจากหลอด IR (infrared ray) ขนาด 20 KV แล้วก็ตามจึงต้องใช้ฝุ่นแป้งฟบนบนผิวหน้ากระดาษเพื่อป้องกันงานพิมพ์เสียหายจากการซับหลัง เพราะขั้นตอนเก็บกระดาษหรือแผ่นพิมพ์ในพาเลท (pallet) จะมีจำนวน ประมาณ 1,500 – 1,700 แผ่นพิมพ์ต่อหนึ่งพาเลท ทำให้แผ่นล่างของแต่ละพาเลทมีความเสี่ยงต่อการเสียหายจากการซ้อนทับ

ฝุ่นแป้งที่ใช้เป็นฝุ่นแป้งผงจากพืชเคลือบพิเศษ ผลิตโดยบริษัท Varn International ประเทศอังกฤษ ในแต่ละเครื่องจะมีหัวพ่นแป้งฝุ่น 6 หัว เรียงในแนวเดียวกัน เครื่องทั้ง 3 ไม่มีระบบดักฝุ่น ทำให้เกิดฝุ่นฟุ้งกระจายในโรงงานอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของคนงานในระยะยาวได้ เนื่องจากอนุภาคขนาดนี้ถึงแม้ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าถึงปอดได้ แต่ก็สามารถเคลื่อนที่เข้าถึง โพรงจมูก คอ และหลอดลม ก่อให้เกิดความระคายเคือง และอาจทำให้เกิดอาการแพ้ในบางคน ส่งผลต่อสุขภาพระยะยาว [1] นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการสูญเสียในเชิงเศรษฐศาสตร์เนื่องจากฝุ่นที่ใช้แล้วนี้ไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งมีความเป็นไปได้หากมีระบบดักจับที่มีประสิทธิภาพ ฝุ่นจากการพ่นสามารถฟุ้งกระจายออกจากเครื่องได้ 2 ทางคือจากด้านบนผ่านตระแกรงที่มีไว้เพื่อระบายความร้อน และด้านหน้าบริเวณที่กระดาษที่พิมพ์เสร็จแล้วม้วนกองไว้

โครงการนี้จะเสนอแนวทางแก้ปัญหาโดยการป้องกันไม่ให้อนุภาคฟุ้งออกจากบริเวณเครื่องพิมพ์ โดยออกแบบระบบดักฝุ่นที่มีความเหมาะสมเพื่อนำอนุภาคฝุ่นแป้งเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่

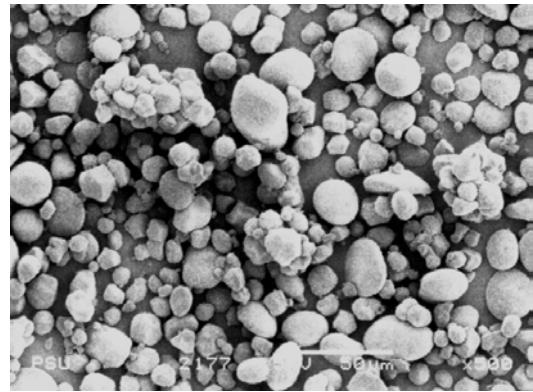
## 2. ฝุ่นแป้งและปริมาณการใช้

### 2.1 ค่าความชื้นของฝุ่นแป้ง

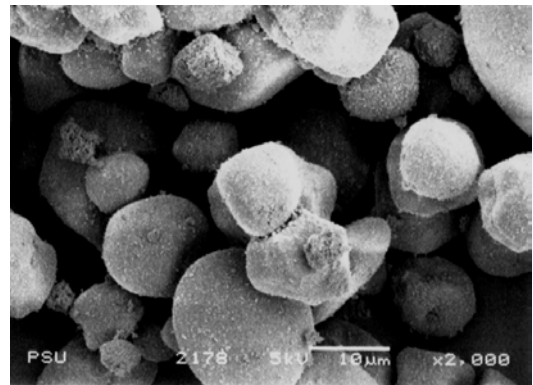
ในการหาค่าความชื้นของฝุ่นแป้ง ได้ทำการอบแห้งตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 5 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างหนักประมาณ 2 g ทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบโดยใช้เครื่องชั่งชนิดวิเคราะห์ (analytical balance) ยี่ห้อ Mettler ซึ่งมีความละเอียดถึง 0.1 mg จากนั้นทำการ อบในเตาอบ Memmert ที่อุณหภูมิ 80°C จนกระทั่งตัวอย่างแห้งสนิท แล้วทำการชั่งตัวอย่างในเครื่องชั่งเดิมอีกครั้งหนึ่ง พบว่าฝุ่นแป้งใหม่ที่ยังไม่ได้ใช้งานมีค่าความชื้นประมาณ 11.7% ฐานแห้ง

### 2.2 ขนาดของฝุ่นแป้ง

จากข้อมูลของผู้ผลิตได้ระบุว่าขนาดของอนุภาคฝุ่นแป้งอยู่ในช่วง 40 ถึง 45 ไมครอน แต่จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ถ่ายภาพพบว่าอนุภาคมีขนาดตั้งแต่ 10 ถึง 50 ไมครอน โดยมีการจับก้อนของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 1 ข้อมูลขนาดของอนุภาคนี้จะใช้ในการออกแบบตัวดักจับต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะของผงฝุ่นแป้งใหม่จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2000 เท่า

### 2.3 ปริมาณการใช้ฝุ่นแป้งในการพ่นเคลือบ

ในการพ่นเคลือบกระดาษนั้น ปริมาณฝุ่นแป้งที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสีที่พิมพ์ลงบนกระดาษ โดยที่ความเข้มข้นของสีมีหลากหลายขึ้นอยู่กับแบบในการพิมพ์ ยิ่งสีมีความเข้มข้นมากก็จำเป็นต้องพ่นฝุ่นแป้งเคลือบมากเช่นกัน พนักงานจะทำการปรับอัตราการพ่นฝุ่นแป้งโดยใช้ประสบการณ์ โดยมีการแบ่งตามความเข้มข้นของสี 10 ระดับ ใช้หมายเลขตั้งแต่ 0.0 – 0.9 เพิ่มขึ้นระดับละ 0.1 โดยหมายเลข 0.0 มีการใช้ปริมาณแป้งน้อยที่สุด ส่วนหมายเลข 0.9 มีการใช้ปริมาณแป้งมากที่สุด ในการใช้งานจริงปริมาณการใช้สูงสุดจะอยู่ที่ระดับ 0.7

ปริมาณการใช้ผงแป้งต่อกระดาษ 1 แผ่น และอัตราการฉีดผงแป้งรวมทั้ง 6 หัวฉีด แสดงให้เห็นในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณการใช้ฝุ่นแป้งจะสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสีที่ตั้งค่าการณไว้

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ฝุ่นแป้ง

ปริมาณการป้อน ฝุ่น	ผงแป้งที่ใช้ (mg/แผ่น)	อัตราฉีดผงแป้ง (mg/sec)
ต่ำ (0.1)	22	61
ปานกลาง (0.3)	59	164
สูง (0.7)	81	225

### 3. ความเข้มข้นของฝุ่นแบ่งในบรรยากาศ

#### 3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบสมรรถนะในการกำจัดอนุภาค จึงได้มีการเก็บตัวอย่างอนุภาคทั้งหมดที่ฟุ้งกระจายในอากาศบริเวณใกล้เครื่องพิมพ์ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องทำการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (isokinetic sampling) นั่นคือความเร็วของอากาศข้างนอก และในหัวเก็บตัวอย่างจะต้องเท่ากัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากทิศทางเคลื่อนที่ของอากาศในโรงงานไม่แน่นอนและมีความเร็วค่อนข้างต่ำ ดังนั้นสามารถใช้เงื่อนไขของเดวีส์ (Davies criteria) สำหรับอากาศนิ่งได้ [2] ในการเก็บตัวอย่างจะวางหัวเก็บตัวอย่างขนานกับพื้นดินเพื่อขจัดความผิดพลาดเนื่องจากการตกตะกอน (gravitational settling) ดังนั้น ณ สภาวะอากาศมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเก็บตัวอย่างสามารถคำนวณได้จาก

$$D_s \geq 4.05 Q^{1/3} d_p^{2/3} \quad (1)$$

โดยที่  $D_s$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเก็บตัวอย่างมีหน่วยเป็น mm ส่วน  $Q$  เป็นอัตราการไหลมีหน่วยเป็น  $m^3/hr$  และ  $d_p$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของอนุภาคมีหน่วยเป็น  $\mu m$  สมมุติว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของอนุภาคมีค่าเท่ากับ  $50 \mu m$  อัตราการไหลสูงสุดใช้ที่  $12 \text{ lpm}$  หรือ  $0.72 \text{ m}^3/hr$  ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเก็บตัวอย่างจะต้องมีค่าน้อยเท่ากับ  $49.3 \text{ mm}$  เราเลือกใช้ค่า  $D_s = 50 \text{ mm}$  และทำการออกแบบให้หัวเก็บตัวอย่างมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนแผ่นกรองที่ใช้ตัดกอนุภาคเป็นแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (high efficiency particulate air filter; HEPA filter) ชนิดใยแก้ว (glass fiber) ผลิตโดยบริษัท Cambridge Filter ประเทศญี่ปุ่น ตัดเป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง  $40 \text{ mm}$  โดยที่ก่อนทำการเก็บตัวอย่าง จะทำการกำจัดความชื้นจากแผ่นกรอง โดยเก็บแผ่นกรองในภาชนะกำจัดความชื้น (desiccator) เป็นเวลามากกว่า  $24 \text{ ชั่วโมง}$  แล้วจึงนำไปชั่งกับเครื่องชั่งชนิดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Mettler ซึ่งมีความละเอียดถึง  $0.1 \text{ mg}$  เมื่อทำการเก็บตัวอย่างแล้วนำมาอบในตู้กำจัดความชื้นอีกครั้งหนึ่งเป็นเวลามากกว่า  $24 \text{ ชั่วโมง}$  แล้วจึงนำไปชั่งกับเครื่องชั่งเดิมเพื่อหาน้ำหนักของอนุภาคที่ตกเก็บได้ ในการทดลองนี้จะทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 2 จุดคือ บริเวณด้านล่างและด้านบนของเครื่องพิมพ์ ทำการเก็บตัวอย่างครั้งละ  $60 \text{ นาที}$  ใช้มีสตูมอากาศในการดึงอากาศให้ไหลเข้าสู่หัวเก็บตัวอย่าง อัตราการไหลปรับโดยใช้ needle valve และอ่านค่าโดยใช้ rotameter ความเข้มข้นของฝุ่นโดยรวมในอากาศสามารถคำนวณได้จาก

$$c = \frac{m}{Qt} \quad (2)$$

โดยที่  $m$  คือมวลของอนุภาคที่ตกได้  $Q$  คืออัตราการไหล และ  $t$  คือช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่าง

#### 3.2 ความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศ

ผลของการเก็บตัวอย่างสำหรับงานพิมพ์ความเข้มปานกลาง (0.3) แสดงให้เห็นในตารางที่ 2 จะเห็นว่าบริเวณด้านบนของเครื่องจะมีความเข้มข้นสูงกว่าด้านล่าง ทั้งนี้เนื่องจากการฟุ้งของฝุ่นเกิดขึ้นบริเวณด้านบนของเครื่องซึ่งมีตะแกรงระบายความร้อน

ตารางที่ 2 ผลการเก็บตัวอย่างฝุ่นในโรงงาน

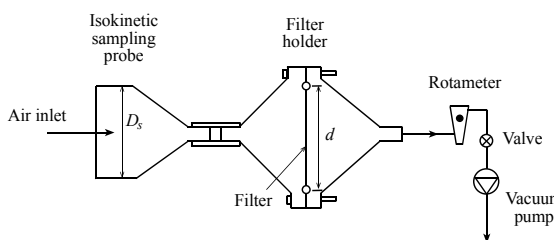
ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง	ด้านล่างเครื่องพิมพ์	ด้านบนเครื่องพิมพ์
ความเข้มข้นของฝุ่น ( $mg/m^3$ )	6.67	10.56

นอกจากนี้จากข้อมูลการตรวจวัดปริมาณฝุ่นรวม (total dust) ของศูนย์ความปลอดภัยในการทำงานพื้นที่ 12 โดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างอากาศที่ใช้เป็นแบบติดตัวบุคคล (personal sampling pump) ยี่ห้อ Mine Safety Appliances (MSA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อเข้ากับตลับเก็บตัวอย่างอากาศ ใช้กระดาศกรงชนิด PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $37 \text{ มิลลิเมตร}$  รูปทรงแปดเหลี่ยม เป็นตัวดักจับ อัตราการไหล  $1.5 \text{ ลิตรต่อนาที}$  พบว่าปริมาณฝุ่นทุกขนาดเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานของพนักงานมีค่าเท่ากับ  $7.76 \text{ mg/m}^3$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้

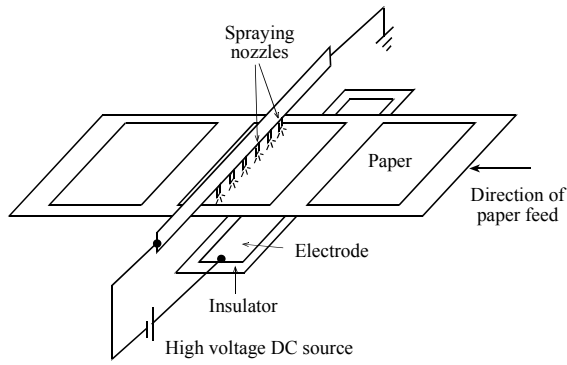
### 4. การใช้ไฟฟ้าสถิตในการลดการฟุ้งของฝุ่นแบ่ง

#### 4.1 การออกแบบระบบ

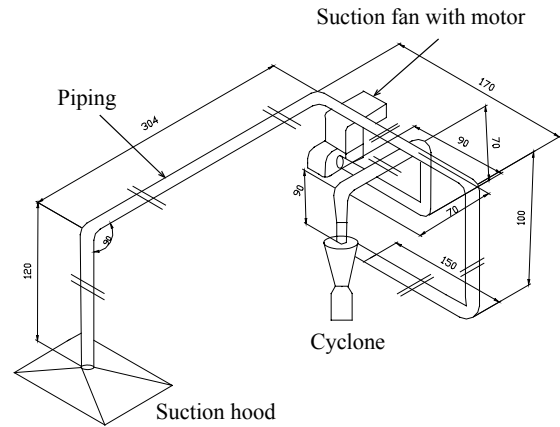
จากการที่อนุภาคเกิดการเสียดสีในหัวฉีดทำให้อนุภาคมีประจุทางไฟฟ้า ซึ่งทำให้มีโอกาสในการบดบังอนุภาคให้เคลื่อนที่ไปสู่แผ่นกระดาศและลดการฟุ้ง ด้วยการสร้างสนามไฟฟ้าแล้วบังคับให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาหัวตรงข้าม ในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งชุดสร้างสนามไฟฟ้าอย่างง่ายเพื่อติดตั้งบริเวณใต้หัวฉีดพ่นฝุ่นแบ่ง (nozzles) ดังแสดงในรูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าความดันสูงขนาด  $15 \text{ kV}$  วงจร Wheatstone bridge สำหรับแปลงกระแสกลับให้เป็นกระแสตรง แผ่นขั้วอิเล็กโทรดใช้แผ่นสแตนเลสบางวางบนแผ่นฉนวน Bakelite เมื่อกระดาศวิ่งเข้ามาในสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นจังหวะเดียวกันกับหัวฉีดผงแบ่งฉีดผงแบ่งพ่นบนหน้ากระดาศ อนุภาคผงแบ่งซึ่งมีประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดจากการเสียดสีกันที่หัวฉีดและจากสนามไฟฟ้า จะถูกแรงดึงดูดทางไฟฟ้าบังคับให้วิ่งเข้าหาขั้วเก็บนั้นก็คือ แผ่นสแตนเลส แต่ช่องว่างระหว่างหัวฉีดกับขั้วเก็บจะมีกระดาศวิ่งผ่านจึงทำให้อนุภาคฝุ่นแบ่งเกาะติดหน้ากระดาศแทนที่จะฟุ้งกระจาย



รูปที่ 2 ชุดเก็บตัวอย่างอากาศในโรงงาน



รูปที่ 3 ชุดดักเก็บอนุภาคด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 4 ระบบดักจับฝุ่นแ่่งด้วยไซโคลน

#### 4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองโดยใช้ชุดดักเก็บอนุภาคด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตพบว่า ความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศ บริเวณด้านบนของเครื่องสำหรับ ระดับความเข้มข้นกลางลดลงจาก  $8.2 \text{ mg/m}^3$  (กรณีไม่ได้ใช้ชุดดักเก็บอนุภาคด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต) เหลือ  $6.7 \text{ mg/m}^3$  ซึ่งลดลงประมาณ 18% ซึ่งยังไม่เป็นที่น่าพอใจทั้งนี้เนื่องจากเกิดการฟุ้งกลับของฝุ่นหลังจากที่ฝุ่นเกาะติดกระดาษแล้ว เนื่องจากมีการใช้พัดลมเป่ากาศให้กระดาษที่พื้นเคลือบแล้วให้เคลื่อนที่ลงไปกองในพาเลท ดังนั้นจึงต้องมีระบบดูดอากาศที่ฟุ้งกระจายและมีอุปกรณ์ในการดักอนุภาคในอากาศเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

### 5. การดักฝุ่นแ่่งด้วยไซโคลน

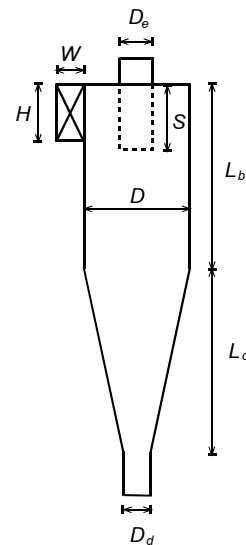
#### 5.1 การออกแบบระบบ

สำหรับการดักจับแ่่งฝุ่นจากเครื่องพิมพ์ของโครงการนี้จะเลือกใช้เครื่องดักจับชนิดไซโคลน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดโตกว่า 10 ไมครอน ดังนั้นการใช้ไซโคลนโดยการออกแบบให้เหมาะสม จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากต้นทุนการก่อสร้างต่ำ และการใช้พลังงานจะต่ำกว่าการใช้ถุงกรอง [3-5]

ระบบโดยรวมแสดงให้เห็นในรูปที่ 4 ฝุ่นแ่่งจะถูกดูดผ่านปล่องดูด (hood) ที่อยู่เหนือช่องระบายอากาศด้านบน จากนั้นจะต่อเข้ากับเครื่องดักอนุภาคแบบไซโคลนโดยใช้แรงดูดจากพัดลมดูด ซึ่งขับโดยมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 2 แรงม้า และสามารถปรับรอบได้ด้วยอินเวอร์เตอร์ การปรับรอบของมอเตอร์ทำให้สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศที่ดูดเข้าได้ ทั้งนี้อัตราการไหลจะต้องเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ถ้าอัตราการไหลต่ำไปอาจไม่สามารถดูดฝุ่นได้ดี แต่หากอัตราการไหลสูงเกินไปฝุ่นแ่่งจะถูกดูดเข้าปล่องดูดโดยไม่สัมผัสกับชั้นกระดาษที่ต้องการเคลือบ ส่วนอากาศที่สะอาดจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอกอาคาร ฝุ่นที่ติดจะสะสมด้านล่างของไซโคลนซึ่งออกแบบเป็นภาชนะทรงกระบอกสามารถถอดออกได้ ดังนั้นฝุ่นนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ในการออกแบบไซโคลน กำหนดขนาดตัดของอนุภาคที่ 10 ไมครอน และกำหนดให้ความเร็วทางเข้าไซโคลนมีค่าเท่ากับ 15 m/sec ขนาดต่าง ๆ ของไซโคลนซึ่งมีหน่วยเป็น cm มีค่าดังนี้ โดยดูรูปที่ 5 ประกอบ [4]

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อทางออก ( $D_o$ )	9
ความกว้างปากทางเข้าของก๊าซ ( $W$ )	3.6
ความสูงของปากทางเข้าของก๊าซ ( $H$ )	10.8
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวไซโคลน ( $D$ )	18
ความยาวช่วงทรงกระบอก ( $L_b$ )	18
ความยาวช่วงรูปกรวย ( $L_c$ )	36
ความกว้างทางออกฝุ่นเก็บ ( $D_o$ )	6.3
ความยาวของทรงกระบอกทางออก ( $S$ )	15.3



รูปที่ 5 ขนาดต่าง ๆ ของไซโคลน

ส่วนความดันสูญเสียในไซโคลนสามารถคำนวณได้จาก [4]

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V^2 \left( \frac{30\sqrt{D}}{L_b + L_c} \right) \left( \frac{HW}{D_o^2} \right) \quad (3)$$

โดยที่  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $V$  คือความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าไซโคลน จากการคำนวณพบว่าความดันสูญเสียในไซโคลนมีค่าประมาณ 1,150 Pa ส่วนความดันสูญเสียในระบบท่อและข้อต่อทั้ง

หมตมีค่าประมาณ 9.0 Pa ดังนั้นความดันสูญเสียรวมในระบบมีค่าประมาณ 1,159 Pa หรือ 118 mmH<sub>2</sub>O เราเลือกใช้พัดลมดูดชนิดใบพัดโค้งไปด้านหลัง (backward-curved blades) ซึ่งขับโดยมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 2 แรงม้า มีความดันสถิตย์ 155 mmH<sub>2</sub>O (Artith Ventilator รุ่น AV-B112) และใช้อินเวอเตอร์ (Primus รุ่น PI-02-220) ขนาด 2 แรงม้า สำหรับปรับความเร็วรอบ

## 5.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองเก็บตัวอย่างอากาศ ณ ตำแหน่งใกล้เครื่องพิมพ์ซึ่งใช้ระบบดักฝุ่นด้วยไซโคลนและไม่ใช้ระบบไฟฟ้าสถิต เมื่อใช้กำลังมอเตอร์เต็มที่ในการดูดสำหรับงานพิมพ์ความเข้มปานกลาง (0.3) พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นในโรงงานบริเวณใกล้จุดฟุ้งกระจายของฝุ่นมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ระบบดักฝุ่น ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยสามารถลดความเข้มข้นได้ถึง 54% ณ บริเวณเครื่อง และ 72% ณ บริเวณคนงาน ซึ่งในการคำนวณได้นำความเข้มข้นของฝุ่นที่ฟุ้งจากเครื่องอื่น (background) มาหักลบออก

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของฝุ่นเมื่อใช้ระบบดักฝุ่นเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ระบบดักฝุ่น

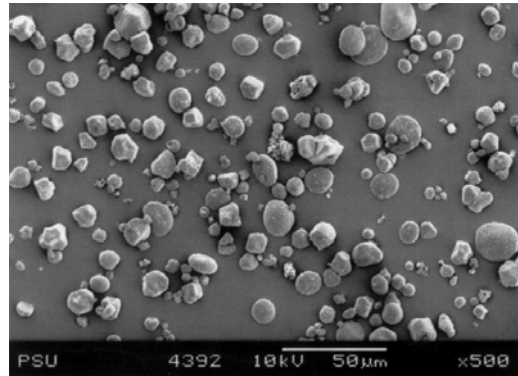
ระบบ	ความเข้มข้นของฝุ่น (mg/m <sup>3</sup> )	
	บริเวณเครื่อง	บริเวณคนงาน
ไม่ใช้ระบบดักฝุ่น	17.25	6.25
ใช้ระบบดักฝุ่น	9.75	2.64
Background	3.25	1.25
ประสิทธิภาพการดักจับ	<b>54%</b>	<b>72%</b>

จากการทดลองเป็นเวลา 1 สัปดาห์ โดยการใช้ผงฝุ่นแป้งทั้งหมด 10.0 กก ปริมาณผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนมีทั้งสิ้น 0.175 กก จากการคำนวณเทียบกับความเข้มข้นของฝุ่นแป้งบริเวณเครื่อง พบว่าอัตราการได้คืนของฝุ่นแป้งจากปริมาณที่ดูดเข้าสู่ระบบมีค่า ประมาณ 22% โดยส่วนอนุภาคฝุ่นที่ถูกดูดส่วนใหญ่จะตกตะกอนในท่อ และข้อต่อก่อนเดินทางถึงไซโคลน

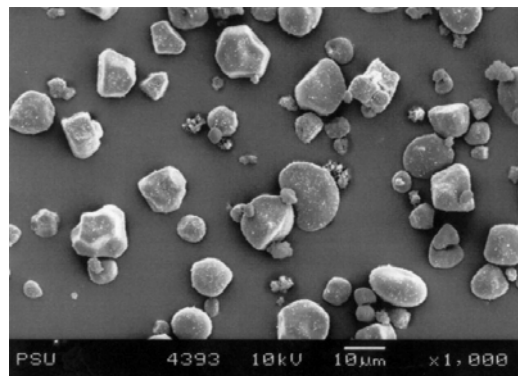
จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องกราด ถ่ายภาพผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนพบว่าอนุภาคมีขนาดต่ำกว่า 10 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยที่อนุภาคขนาดใหญ่เกิดการตกตะกอนในท่อ และข้อต่อก่อนเดินทางถึงไซโคลนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนค่าความชื้นของผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนมีค่า 8.6% ฐานแห้ง ซึ่งต่ำกว่าผงฝุ่นแป้งใหม่คือ 11.7% ฐานแห้ง ดังนั้นผงฝุ่นแป้งที่ดักได้นี้จะน่ากลับมาใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตามได้มีการวิเคราะห์สิ่งปนเปื้อนเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีผลต่อคุณสมบัติของฝุ่นแป้ง

ในการวิเคราะห์สิ่งปนเปื้อน ของผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลน ได้ทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยวิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) โดยใช้เครื่อง Philips PW2400 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ ออกซิเจน (O) จนถึง ยูเรเนียม (U) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 โดยในการวิเคราะห์นี้พิจารณาเฉพาะสิ่งปนเปื้อน

โดยไม่ไดวิเคราะห์ธาตุพื้นฐานของฝุ่นแป้งจากพืชซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของผงฝุ่นแป้งใหม่และผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลน พบว่ามีธาตุองค์ประกอบใกล้เคียงกัน โดยที่ฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนมีธาตุใหม่คือ อลูมิเนียม (Al) และคลอรีน (Cl) แต่มีในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นผงแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนสามารถนำไปใช้ใหม่โดยการผสมกับผงฝุ่นแป้งใหม่



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ลักษณะของผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 1000 เท่า

ตารางที่ 4 ธาตุองค์ประกอบของอนุภาคผงฝุ่นแป้งจากการวิเคราะห์ด้วย X-ray fluorescence spectrometer (XRF)

ธาตุ	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)	
	ผงฝุ่นแป้งใหม่	ผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลน
Si	1.33	1.51
P	0.58	1.00
S	0.06	0.07
Ca	2.48	4.80
Al	-	0.03
Cl	-	0.12
Trace elements	Na, Mg, Al, Cl, K, Fe, Sn	Na, Mg, K, Ti, Fe, Sn

## 6. สรุปผล

จากการทดลองพบว่าการใช้ไฟฟ้าสถิต พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศ บริเวณใกล้จุดฟุ้งกระจายของฝุ่นได้ประมาณ 18% ซึ่งยังไม่เป็นที่น่าพอใจทั้งนี้เนื่องจากเกิดการฟุ้งกลับของฝุ่นหลังจากที่ฝุ่นเกาะติดกระดาษแล้ว อันเนื่องมาจากมีการใช้พัดลมเป่ากตให้กระดาษที่พื้นเคลือบแล้วเคลื่อนที่ลงไปกองอย่างเป็นระเบียบในพาเลท จึงได้ติดตั้งระบบดูดอากาศที่ฟุ้งกระจายและใช้ไซโคลนในการดักอนุภาคในอากาศ ซึ่งจากผลการเก็บตัวอย่างพบว่าสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศ บริเวณใกล้จุดฟุ้งกระจายของฝุ่น (บริเวณเครื่องพิมพ์) ได้ถึง 54% ส่วนความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศ บริเวณที่คนงานทำงานลดลงประมาณ 72% โดยมีความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศหลังจากลบค่า background เหลือเพียง  $1.39 \text{ mg/m}^3$  ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานคือ  $15 \text{ mg/m}^3$  [6] อยู่มาก ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ ส่วนผงฝุ่นแป้งที่ดักได้ด้วยไซโคลนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยนำไปผสมกับผงฝุ่นแป้งใหม่ อย่างไรก็ตามหากต้องการเพิ่มสมรรถนะในการดูดผงฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย สามารถทำได้โดยการใช้พัดลมดูดและมอเตอร์ที่ใหญ่ขึ้น ระบบดักฝุ่นนี้สามารถติดตั้งกับเครื่องพิมพ์ที่เหลือทั้งหมดเพื่อลดปริมาณของฝุ่นแป้งที่ฟุ้งในโรงงาน ส่งผลให้คุณภาพชีวิตของพนักงานดีขึ้นและยังสามารถนำฝุ่นแป้งที่ดักได้กลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตด้วย

## 7. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับปริญาตรี ประจำปี 2546 หมายเลข FE0010/46 นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บริหารและพนักงาน บริษัท เอส แพ็ค แอนด์ พรีนท์ จำกัด (มหาชน) ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีตลอดโครงการ และขอขอบคุณ ดร.ประการ กุรุหงษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.สงขลานครินทร์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Hines, T. K. Ghosh, S. K. Loyalka and R. C. Warder, Jr., *Indoor air quality & control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 116-118., 1993.
- [2] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd ed., Wiley, N.Y., 1999.
- [3] วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ นิตยา มหาผล และธีระ เกรอด *มลภาวะอากาศ* สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 216-263 พ.ศ.2538.
- [4] ศิริกัลยา สุวจิตตนนท์ วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล ชิกาโอ คานาโอกะ และจุฬามาต เกตุทัต *มลภาวะอากาศ* สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 170-263 พ.ศ.2542.
- [5] N. D. Nevers, *Air pollution control engineering*, McGraw-Hill, Singapore, pp. 166-263, 1995.
- [6] ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) พ.ศ. 2520