



การพัฒนาเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พื้น
Development of an Electrostatic Precipitator for Collection of Particles from
Rubber Wood Combustion

ชญาศักดิ์ รัตนโชติ
Chayasak Ratanachot

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พิน
ผู้เขียน	นายชญาศักดิ์ รัตนโชติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลมีบทบาทสำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานทดแทนหลักของประเทศ การใช้ไม้พินซึ่งเป็นชีวมวลก่อให้เกิดมลภาวะในรูปเขม่าควันซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเขม่าควันมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อสุขภาพเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการหาวิธีการกำจัดหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่าควันให้อยู่ในระดับที่ต่ำ อุปกรณ์ที่มีศักยภาพคือเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเนื่องจากมีความดันสูญเสียต่ำและประสิทธิภาพสูง งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่เหมาะสมในการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พิน ขนาดของเครื่องออกแบบให้มีขนาด ความกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 0.767×1.3×0.645 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 1.0 mm ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบและเส้นลวด 4 เงื่อนไขการทดลอง โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 22 kV(DC) จากวงจรวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ ผลการทดลองปรากฏว่าทุกเงื่อนไขการทดลองประสิทธิภาพการเกาะติดมากที่สุดในช่วงเวลาเริ่มต้น และประสิทธิภาพการเกาะติดลดลงตามปริมาณอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมากขึ้น และพบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบมีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับมาก ในขณะที่ระยะห่างระหว่างเส้นลวดแทบจะไม่มีผล โดยที่ประสิทธิภาพการดักจับจะมีค่าสูงสุดเมื่อระยะระหว่างแผ่นเรียบและระยะระหว่างเส้นลวดมีค่าต่ำที่สุด (5.0 cm และ 6.4 cm ตามลำดับ) โดยมีประสิทธิภาพเริ่มต้นสูงสุดเท่ากับ 83% โดยน้ำหนัก แต่จะลดลงตามปริมาณอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงจึงออกแบบและสร้างระบบทำความสะอาด โดยการฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นเรียบ ทุก ๆ 1 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าในช่วงเวลา 30 ถึง 120 นาทีไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดได้เนื่องจากมีเขม่าจากการเผาไหม้ยังพาราเกาะติดบนแผ่นเรียบ ซึ่งการฉีดน้ำเพื่อทำความสะอาดไม่สามารถกำจัดออกจากไม้ยังพาราได้ แต่ในช่วงเวลาหลังจาก 150 นาทีเป็นต้นไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดได้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 60.2% โดยน้ำหนัก

Thesis Title Development of an Electrostatic Precipitator for Collection of Particles
from Rubber Wood Combustion

Author Mr.Chayasak Ratanachot

Major Program Mechanical Engineering

Academic Year 2010

ABSTRACT

Nowadays, biomass is a major source of renewable energy. Wood is an important biomass fuel but its combustion leads to pollution in the form of smoke particles containing numerous chemical components, for example, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). To efficiently use the fuel wood, a proper gas cleaning or aerosol collection device must be used to control the smoke emission level. Therefore, a solution to eliminate or reduce smoke emission has been studied. An effective equipment for this purpose is an electrostatic precipitator (ESP) because of low pressure drop and high collection efficiency for small aerosol particles. The ESP used in this work was a wire-plate type. It was designed so that it could fit into any passage of hot gas from wood combustion. Dimension of the ESP used in this study is 0.767 x 1.300 x 0.645 m, and the discharge wire diameter is 1.0 mm. The gap between the collecting plates and the wire spacing are varied in the experiment. The applied voltage was 22kV(DC) from a bridge rectifier. Results showed that when the gap between the collecting plate electrodes was reduced to 5.0 cm, the spacing between the wire electrodes appeared to play an insignificant role in enhancing the efficiency. Higher collection efficiency was found to take place when the gaps between collecting plate electrodes and the wire electrode spacings were reduced to minimum (5.0 cm and 6.4 cm, respectively). An initial collection efficiency is 83% (by mass) and it decreased when dust was accumulated on the collection electrodes. In order to keep the collection efficiency rather constant, the ESP was equipped with a cleaning system using water injection to clean the plate at every hour, by choosing the configuration with minimum gap between the collecting plate (5cm) and minimum wire spacing (6.4 cm) for the maximum efficiency. However, the collection efficiency during 30 to 120 minutes cannot be increased because of the tar adhering to the collecting plates which cannot be removed easily by water spraying. After 150 minutes, the collecting efficiency can be increased to 60.2% (by mass) periodically.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลสำคัญหลายท่านด้วยกันจึงถือโอกาสขอขอบคุณบุคคลดังกล่าวคือ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงศ์ ทีฆสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ภูริระวีชัยกุล และดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ซึ่งเป็นคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และคำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยรวมถึงการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ นายนเรศ เจริญขวัญ เด็กชายภูมิพัฒน์ รัตนโชติ นางสาวพิมพ์พาสุข หนูไชยแก้ว ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเกี่ยวกับการจัดหาอุปกรณ์การออกแบบและการสร้างรวมถึงการทดลองในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์อนุญาตให้ใช้เครื่องมือและสถานที่ ขอขอบคุณ บิดา มารดา เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ได้คอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยและให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ชญาศักดิ์ รัตนโชติ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(11)
1 บทนำ	
1.1 การตรวจเอกสาร	2
1.2 วัตถุประสงค์	10
1.3 ขอบเขตการวิจัย	10
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	11
2 ทฤษฎี	
2.1 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิด เส้นลวด-แผ่นเรียบ	12
2.2 ประเภทและโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	13
2.3 ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคเขม่าตามสัดส่วนการดักจับเขม่า (Fractional Collection Efficiency)	16
2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle Motion)	18
2.5 ความแรงของสนามไฟฟ้า (Electrical Field Strength)	20
2.6 การให้ประจุอนุภาค	20
2.7 การผลิตยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet rubber production)	23
2.8 ละอองลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ไม้พืน (Wood Combustion Aerosol)	27
2.9 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	28
2.10 Toxic equivalency factor (TEFs) ของ PAHs	30
3 วิธีการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	31
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ในงานวิจัย	31
3.3 การทดลอง	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลและวิจารณ์ผล	
4.1 ผลการทดลองวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (Bridge Rectifier)	49
4.2 ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค	50
4.3 ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค	57
5 วิจัยและสรุปผล	
5.1 สรุปผล	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	
ก. แบบของส่วนประกอบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ	67
ข. สมการสมการ Deutsch – Anderson ซึ่งใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพ การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต การคำนวณการคำนวณการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติกและการคำนวณการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบโคสแควร์	76
ค. ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาคและประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค	87
ง. ลักษณะไดโอดแรงดันสูง (high voltage diode) No. ESJC13 9kV/450 mA	198
จ. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	200
ประวัติผู้เขียน	212

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	Toxic equivalency factor (TEFs) ของ PAHs	30
3.1	เงื่อนไขในการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ	45
4.1	เงื่อนไขในการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ และค่าจากการคำนวณโคสแควร์	50

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ	
	(a) การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า	14
	(b) อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น	14
	(c) อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นอย่างทวีคูณ	14
	(d) การเคลื่อนของอนุภาคไปเกาะติดที่ขั้วเก็บประจุ	14
2.2	(a) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก	14
	(b) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบขั้วเดี่ยว	15
	(c) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสองชั้น	15
2.3	ภาพมองด้านบนและด้านข้างของช่องการไหลของการตกตะกอนของเส้นลวดและแผ่นเรียบ	17
2.4	ขั้นตอนการทำยางแผ่นรมควัน	24
2.5	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม้ยาง	27
2.6	โครงสร้างของ PAHs16 ชนิดหลัก ที่กำหนดโดย US – EPA	29
3.1	ขั้นตอนการวิจัย	33
3.2	ไดอะแกรมชุดการทดลองทั้งหมดที่ใช้ร่วมในการทดลองของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	34
3.3	แบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่ทำการออกแบบ	34
3.4	ไดอะแกรมแสดงวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า	35
3.5	อุปกรณ์วงจรสำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	
	(a) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง	35
	(b) ไดโอดแรงดันสูง	35
	(c) ไดโอดแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง	35
	(d) วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์	35
3.6	แสดงลำดับการติดตั้งชุดเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูง	36
3.7	อุปกรณ์ยึดกระดาษกรอง	37

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	(a) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น	39
	(b) ปะเก็นยาง	39
	(c) แผ่น orifice ซึ่งทำจากแผ่นพลาสติกใส	39
3.9	ลักษณะแผ่น orifice ที่ใช้ในการทดลองนี้	40
3.10	หลอดแก้วทำมานอมิเตอร์	40
3.11	ไดอะแกรมการสอบเทียบอุปกรณ์วัดการไหล	41
3.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความสูงของระดับน้ำกับอัตราการไหลของมาตรวัดการไหลมาตรฐานของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลตัวที่ 1	42
3.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความสูงของระดับน้ำกับอัตราการไหลของมาตรวัดการไหลมาตรฐานของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลตัวที่ 2	42
3.14	ไดอะแกรมระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	43
3.1.5	ระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	44
4.1	กราฟแสดงผลวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (Bridge Rectifier)	49
4.2	ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 และ 6.4 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน	52
4.3	ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 และ 6.4 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน	53
4.4	ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 และ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน	54
4.5	ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 และ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน	56
4.6	ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับ cvt	57
4.7	ผลการทดลองประสิทธิภาพระบบทำความสะอาดระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดทองแดง 6.4 cm เทียบกับเวลา	58

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A_c	collecting area
AC	alternating current
CaCl_2	calcium chloride
C_c	cunningham correction factor
C_i	mean thermal speed of ions
DC	direct current
d	equivalent cylindrical radius
d_c	distance between collecting plate electrode
d_p	diameter of particle
d_w	distance between collecting wire electrode
E	electrical strength
EHD	electro hydrodynamic
E_c	corona onset field
e	charge of electron
F_d	aerodynamic drag force
F_e	coulomb force
HEPA	high efficiency particulate air filter
Hp	horse power
I_c	average corona current
k	boltzman constant
MC (db)	moisture content (dry basis)
MMAD	mass median aerodynamic diameter
N_i	concentration of ions
$n(t)$	number of charge at time
$n_d(t)$	number of charges during time by diffusion charging
$n_f(t)$	number of charges during time by field charging

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

PAHs	polycyclic aromatic hydrocarbons
PIV	particle image velocimetry
PVC	polyvinylchloride
p	pressure
Q	volumetric gas flow
t	time
u_e	particle migration velocity
V_c	corona onset voltage
x	x direction
y	y direction
Z_i	ion electrical mobility
η	fractional collection efficiency
u	velocity constant
μ	viscosity
ε	dielectric constant of particle
ε_0	free-space permittivity
δ	gas density
ρ_a	air density
ρ_w	water density

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลมีบทบาทสำคัญเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ ในแต่ละปีประเทศไทยมีชีวมวลที่มีศักยภาพนำมาใช้ประโยชน์ได้ประมาณ 72 ล้านตัน เทียบได้กับ ถ่านลิกไนต์ 54 ล้านตัน ซึ่งเราใช้ผลิตพลังงานเพียง 50 เพอร์เซ็นต์ เท่านั้นเอง ที่เหลือที่ไม่ได้ใช้ คือ ใบอ้อย ยอดอ้อย ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง รากไม้ยางพารา ลำต้นข้าวโพด คิดเป็น ประมาณ 36 ล้านตัน ถ้านำทั้งหมดมาผลิตไฟฟ้าก็จะได้ประมาณ 2,300 เมกะวัตต์ (เพ็ญริรัตน์ อัครผลสุวรรณ, 2550) โดยทั่วไปแล้วการนำชีวมวลไปใช้ในประเทศไทยมี 2 ประเภทคือ ประเภทแรกนั้นนำชีวมวลไปใช้ในสร้างพลังงานความร้อนในระดับครัวเรือนโดยใช้ไม้ฟืนและถ่านซึ่งจัดเป็นชีวมวลสองชนิดที่มีปริมาณการใช้สูงสุดในภาคครัวเรือนของไทย ส่วนในภาคอุตสาหกรรมนั้นส่วนใหญ่ใช้กากหรือขานอ้อยและแกลบ ในประเภทที่สองการนำชีวมวลไปผลิตไฟฟ้านั้นยังจำกัดเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมประเภทที่ใช้กากอ้อยและแกลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก แม้ว่าแท้จริงแล้วประเทศยังมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอีกมาก (วงกต วงศ์อภัย, 2547)

ภาคใต้ของประเทศไทยมีการปลูกยางพาราเป็นจำนวนมาก เมื่อไม้ยางพาราไม่สามารถผลิตน้ำยางได้อีก จึงมีการนำไม้ฟืนจากไม้ยางพาราซึ่งเป็นชีวมวลที่สำคัญมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ความร้อนซึ่งจะก่อให้เกิดมลภาวะในรูปเขม่าควันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเขม่าควันมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อสุขภาพ เช่น polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) เป็นต้น (Furuuchi et al., 2006; Bai et al., 2007; Tekasakul et al., 2008) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการหาวิธีการควบคุมหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่าควันให้อยู่ในระดับที่ต่ำ จึงเกิดแนวคิดในการหาวิธีการกำจัดหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่า ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น ห้องตกตะกอนไซโคลอน ห้องถลุงกรอง เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เครื่องสับผัดหรือเครื่องเก็บแบบเปียก เครื่องกรองใย เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยทุกวิธีได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายขึ้นอยู่กับชนิดและอนุภาครวมทั้งปัจจัยอื่นๆ วิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักเขม่าจากการเผาไหม้ไม้ฟืนเพื่อทำการทดลองและคำนวณประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการกำจัดปริมาณอนุภาคเขม่าสูง มีรูปร่างที่เหมาะสมมีความสูญเสียความดันที่ต่ำ มีประสิทธิภาพสูง และมีค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมวิธีอื่น (วงพันธ์ ลิ้มปเสนีย์, 2543)

1.1 การตรวจเอกสาร

การปลดปล่อยอนุภาคจากการเผาไหม้ชีวมวล

การตรวจเอกสารสำหรับการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอนุภาคจากการเผาไหม้ชีวมวล การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและสารพิษที่ปนเปื้อนมากับซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะมนุษย์ มีดังนี้

Kalasee et al. (2003) ศึกษาผลของอนุภาคเขม่าจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราในโรงรมควันยาง ขนาดของอนุภาควัดได้โดยการใช้การเก็บตัวอย่างแบบลำดับส่วน (cascade andersen sampler) ซึ่งประกอบไปด้วย 8 ลำดับส่วน พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในโรงรมควันอยู่ในช่วง 0.43 micron ถึง 4.7 micron มี mass median aerodynamic diameter (MMAD) เท่ากับ 0.95 micron ความเข้มข้นของอนุภาคขึ้นอยู่กับความชื้นของไม้ยางพารา

Hedberg et al. (2002) ได้ศึกษาลักษณะทางเคมีในหลาย ๆ องค์ประกอบ รวมถึง PAHs ที่ถูกปล่อยมาจากการเผาไหม้ไม้เบิร์ช (birch-wood) ซึ่งเป็นไม้ที่ใช้ในครัวเรือนในประเทศแถบสแกนดิเนเวียพบว่า มี fluorine, phenanthrene, anthracene, fluoranthene และ pyrene ซึ่งทำให้มีผลรวมเชิงมวลของ PAHs มากกว่า 70 %

Venkataraman et al. (2002) ศึกษาการกระจายตัวของ PAHs จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวภาพคือ ไม้ อิฐ และมูลสัตว์ ผลปรากฏว่าการกระจายตัวของ PAHs ในอนุภาคมี MMAD อยู่ในช่วง 0.4-1.01 micron

Saez et al. (2003) ตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคเขม่าควันจากระบวนการเผาไหม้ชีวมวล โดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบหลายลำดับส่วน และการวัดความเข้มข้นส่วนประกอบของ 16 PAHs ในอนุภาคเขม่าควัน พบว่าปริมาณอนุภาคเขม่าควันมี PAHs น้ำหนักโมเลกุลสูงจะสัมพันธ์กับอนุภาคที่มี MMAD เล็กกว่า 2 micron และมีการกระจายตัวแบบโหมดเดียว

Furuuchi et al. (2006) วิจัยและตรวจหาคุณลักษณะของอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสถานที่ทำงานในสหกรณ์กองทุนสวนยาง

กับสิ่งแวดล้อมของบรรยากาศของอำเภอหาดใหญ่ โดยการหาค่าของความเข้มข้น การกระจายขนาดของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราโดยศึกษา PAHs 15 องค์ประกอบพบว่าความเข้มข้น PAHs ของอนุภาคขนาดเล็กกว่า 3.3 micron มีค่าสูงกว่า 10^5 ng m^{-3} ในขณะที่อนุภาคที่ใหญ่กว่า 3.3 micron มีความเข้มข้น PAHs ประมาณ 10^3 ng m^{-3} และมีมากที่สุดในพื้นที่ทำงานในสหกรณ์สวนยางผลของการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ อัตราการเผาไหม้ อุณหภูมิ ความชื้นของไม้ฟืน

Chomanee et al. (2009) ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคควันจากการเผาไหม้ของไม้ยางพารา ในกระบวนการรมควันยางแผ่นของสหกรณ์กองทุนสวนยางและศึกษาผลกระทบของมวลอนุภาคต่อการเกิดมลภาวะทางอากาศโดยรอบของสหกรณ์กองทุนสวนยางและเมืองหาดใหญ่ โดยศึกษาค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นโดยรวมด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคปริมาตรสูง ผลปรากฏว่าอนุภาคควันจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราแสดงการกระจายอยู่ในโหมดอนุภาคขนาดกลาง (accumulation mode) มี MMAD เท่ากับ 0.68 micron ซึ่งจากการศึกษาโดย Tekasakul et al. (2008) พบว่าอนุภาคจากสถานที่ทำงานของสหกรณ์กองทุนสวนยางและอำเภอหาดใหญ่มีการกระจายของอนุภาคเป็น 2 โหมด ประกอบด้วยอนุภาคขนาดกลาง (accumulation mode) มีขนาดอนุภาค 0.54 micron และอนุภาคหยาบ (coarse-mode) มีอนุภาคขนาด 4.0 micron ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบการเปลี่ยนแปลงของ PAHs สัมพันธ์กับปริมาณยางแผ่นรมควัน ปริมาณน้ำฝนและทิศทางลม นอกจากนี้พบว่า PAHs ชนิดหลายวงแหวนมีปริมาณมากในอนุภาคขนาดเล็กของตัวอย่างจากบริเวณพื้นที่ทำงานของสหกรณ์กองทุนสวนยาง

จากการทบทวนเอกสารการเผาไหม้ชีวมวลคือ ไม้เบิร์ช ิฐ มูลสัตว์ และไม้ยางพารา การปลดปล่อยของอนุภาคจากการเผาไหม้ขนาดของอนุภาคแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและความชื้นของชีวมวล การเผาไหม้ชีวมวลมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันคือ PAHs ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอนุภาคขนาดเล็กโดย PAHs มวลโมเลกุลสูงจะมีค่ามากขึ้นในอนุภาคขนาดเล็กถึงค่าความเป็นพิษที่สูงขึ้นของอนุภาคขนาดเล็กเพราะสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ และเป็นสารก่อมะเร็งก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะมนุษย์ ดังนั้นควรมีการกำจัดอนุภาคเขม่าควันด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

การดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้ชีวมวล

การดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้ชีวมวลเพื่อลดปริมาณอนุภาคเขม่าควันก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศมีหลายวิธีและหลายอุปกรณ์ เช่น ห้องถลุงกรอง เครื่องตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงโลก เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง การใช้ละอองน้ำในการดักจับ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการของเครื่องตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงโลก เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง การใช้ละอองน้ำในการดักจับยังไม่สามารถที่จะดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กได้ โดยเฉพาะอนุภาคที่ละเอียดมากอยู่ในช่วงระหว่าง submicron และ micron (0.01-10 micron) การใช้วิธีการของห้องถลุงกรองจะทำให้เกิดความดันสูญเสีย (pressure drop) สูงเมื่อเกิดการเกาะติดของอนุภาคเพิ่มมากขึ้น เครื่องตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงโลกสามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 micron และจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งกว้าง เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลางและการใช้ละอองน้ำในการดักจับอนุภาคจะให้ประสิทธิภาพในการดักจับที่ต่ำและเหมาะสมสำหรับดักจับอนุภาคที่มีขนาด 5-10 micron (Tantichaowan et al. 2006) มีวิธีการหนึ่งที่น่าจะเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้นั้นคือ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตซึ่งเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงเกือบ 100 % (Tantichaowan et al. 2006) ในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือฝุ่นละอองในบรรยากาศรวมถึงละอองไอ ฝุ่น ควัน เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับอนุภาคในช่วงของ submicron โดยใช้แรงทางไฟฟ้าสถิต ปัจจุบันนี้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนิยมนำมาใช้ร่วมกับโรงไฟฟ้า เตาเผาขยะและในอุตสาหกรรมต่างๆ

กระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เป็นวิธีการกำจัดอนุภาคออกจากการไหลของแก๊สโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ขั้วปล่อยประจุ (discharge electrode) และขั้วเก็บประจุ (collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วปล่อยประจุ (discharge electrode) โดยที่ขั้วเก็บประจุต่อลงสู่พื้นดิน (ground) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ขึ้นโดยรอบ ๆ อิเล็กโทรด ไอออนและอิเล็กตรอน จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วปล่อยประจุกับขั้วเก็บประจุ เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน ไอออนจะเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นเป็นผลทำให้อนุภาคได้รับประจุ และอนุภาคที่มีประจุ (charged particle) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วเก็บประจุด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนแผ่นตกตะกอน โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากขั้ว

เก็บประจุโดยการเกาะจับเก็บประจุหรือการฉีดด้วยน้ำเพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลงไป (พานิช อินตะ และณัฐวุฒิ คุยฎี, 2550)

Zukeran et al. (1997) ทดสอบสมรรถนะของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักจับอนุภาคในอากาศ มีเส้นลวด 3 เส้น โดยควันทันจากเผาเครื่องหอม อนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.1 micron การทดลองกำหนดอัตราการไหล 10 ถึง 100 L/min และจ่ายแรงดันไฟฟ้า 9 ถึง 30 kV ให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพการดักจับโดยน้ำหมักมีค่าเท่ากับ 99.99 % แต่ประสิทธิภาพโดยจำนวนอนุภาคมีค่าต่ำกว่า 30 % เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากยังไม่เกาะติดบนแผ่นเรียบ

Kim et al. (1999) ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบขั้วเดี่ยว ทำการทดลองภายใต้อุโมงค์ลม การทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเรียบ ขนาดของเส้นลวด ความเร็วของอากาศ ความปั่นป่วนและแรงดันไฟฟ้าที่ให้ ผลปรากฏว่าเมื่อลดขนาดของเส้นลวดและระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเรียบ จะให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

Tantichaowan et al. (2006) ออกแบบและสร้างอุปกรณ์เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-ผนังทรงกระบอก ผนังทรงกระบอกทำจากสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 mm ความยาว 254 mm มีเส้นลวดทองแดงตรงกลางในผนังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 11 kV(DC) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะในการดักจับอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม้พิน โดยการเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดของอนุภาค ความเร็ว และศักย์ไฟฟ้าที่ให้ นอกจากนี้ได้ศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของอุปกรณ์ดังกล่าวที่สภาวะการใช้งานจริงร่วมกับเตาเผาไม้พิน รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของอนุภาคที่เกาะอยู่บนขั้วเก็บ (dust-loading) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของอุปกรณ์ดักจับอนุภาคชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ ผลปรากฏว่าเครื่องดักจับอนุภาคชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ให้เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้น อนุภาคขนาดเล็กแสดงประสิทธิภาพในการดักจับที่สูงกว่าหรือถูกดักจับได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่ ที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง การมีอยู่หรือการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุมีผลต่อประสิทธิภาพหรือสมรรถนะในการดักจับอนุภาคจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคที่เกาะ

อยู่บนเครื่องดักจับอนุภาคมีมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่ปลดปล่อยระหว่างขั้วที่ลดลง

นฤปดี ศรีสังข์ และคณะ (2006) สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีท่อ สแตนเลสทำหน้าที่เป็นขั้วเก็บอนุภาคและมีหลอดทองแดงที่อยู่กลางท่อทำหน้าที่เป็นขั้วโคโรนาถ่ายประจุให้กับอนุภาคสำหรับดักจับอนุภาคเขม่าควัน ในการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12.3 kV(DC) ให้กับเครื่อง ทำการติดตั้งปั๊มสุญญากาศ โดยตั้งอัตราการไหลที่ 20 L/min เพื่อการเก็บตัวอย่างเขม่าควันที่ทางเข้าและทางออกทุกๆ 30 นาที ผลปรากฏว่า 30 นาทีแรก มีค่าประสิทธิภาพ 90%, 80% และ 75% ที่ค่าความต่างศักย์ 12.3 kV, 9.7 kV and 8.6 kV ตามลำดับ

วชร กาลาสี และคณะ (2006) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้งที่เจือปนในอากาศที่มีอัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 5 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีท่อสแตนเลสทำหน้าที่เป็นขั้วเก็บอนุภาคและหลอดทองแดงที่อยู่กลางท่อทำหน้าที่เป็นขั้วโคโรนาถ่ายประจุให้กับอนุภาค จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของการดักจับอนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้งของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ออกแบบไว้มีค่าประมาณ 50% และ 35% ตามลำดับ

Kalasee (2009) ทำการปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับแยกเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในห้องรมควันยางพารา อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกเขม่าควันคือ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบขนาดความกว้าง×ยาว×สูงเท่ากับ 30×150×60 cm ซึ่งแบ่งช่องการไหลเป็น 12 ช่อง แต่ละช่องมีเส้นลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ยาว 150 cm ตรงกลางช่องการไหล ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบเท่ากับ 10 cm โดยที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 kV(DC) และ Impaction Wall ขนาดปากท่อทางเข้าเท่ากับ 60 cm ยาวเท่ากับ 150 cm ระยะหยุดของอนุภาคเท่ากับ 30 cm ขนาดของแผ่นเรียบที่พุ่งชนขนาดกว้าง 150 cm ยาว 60 cm ในการทดลองขนาดของอนุภาควัดได้โดยการใช้การเก็บตัวอย่างแบบลำดับส่วนประกอบไปด้วย 8 ลำดับส่วน ผลปรากฏว่าเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสามารถดักจับอนุภาคเขม่าควันในช่วง 0.43-3.3 micron และ Impaction Wall สามารถดักจับอนุภาคเขม่าควันในช่วง 3.3-4.7 micron สำหรับประสิทธิภาพในการดักจับจากการดักจับโดยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตและ Impaction Wall เท่ากับ 50% โดยที่ค่าบ่งบอกของสีของยางพาราอยู่ในช่วง 6.0-12.0 ซึ่งคุณภาพของยางพาราดีกว่าการรมควันโดยไม่มีอุปกรณ์แยกอนุภาค

จากการทบทวนเอกสารการดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้ชีวมวลมีหลายวิธี วิธีการของห้องถูกรองจะมีประสิทธิภาพสูงแต่จะทำให้เกิดความดันสูญเสียสูงเช่นกัน วิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการดักจับอนุภาคที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและความดันสูญเสียต่ำ

การเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิด เส้นลวด-แผ่นเรียบ

ในหัวข้อนี้จะทบทวนเอกสารการจำลองการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเกาะติดบนแผ่นเรียบ

Zhang et al. (2005) a เสนอหลักการอย่างง่ายของการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ (wire-plate electrostatic precipitator) โดยใช้หลักการของสมดุลพลังงาน เมื่ออนุภาคได้รับประจุจะเกาะติดบนขั้วเก็บประจุได้เมื่อพลังงานจลน์มีค่าน้อยกว่าผลรวมของพลังงานจากไฟฟ้าสถิตในตัวมันเองและพลังงานพื้นผิวระหว่างอนุภาคที่ได้รับการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุและขั้วเก็บประจุ เมื่อใช้ CaCl_2 เป็นอนุภาคที่ไหลผ่านและให้ขนาดอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ผลปรากฏว่าค่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อนำอาผงเหล็กมาใช้เป็นอนุภาคที่ไหลผ่านจะให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจะมีค่าต่ำลงเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น

Zhang et al. (2005) b สร้างแบบจำลองเพื่อสังเกตการเกิดขึ้นของร่องรอยของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเขม่าที่เกาะติดอยู่บนขั้วเก็บประจุ ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ (wire-plate electrostatic precipitator) โดยการเกิดร่องรอยของอนุภาคที่เกาะติดอยู่นั้นจะใช้หลักเกณฑ์ของการเปรียบเทียบกันระหว่างพลังงานที่ผิวกับพลังงานจลน์ของประจุที่อนุภาค ซึ่งถ้าพลังงานที่ผิวมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์จะทำให้เกิดการเกาะติดของอนุภาคเขม่าบนขั้วเก็บประจุ และในทางกลับกันนั้นถ้าพลังงานที่ผิวมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานจลน์จะทำให้เกิดการเกาะติดของอนุภาคเขม่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผลปรากฏว่าอนุภาคเขม่าที่มีขนาด 0.5 micron มีร่องรอยของการเกาะติดบนขั้วเก็บประจุซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนเนื่องจาก พลังงานที่ผิวมีค่า 7.21×10^{-15} J ในขณะที่พลังงานจลน์มีค่า 1.06×10^{-17} J อนุภาคเขม่าที่มีขนาด 5 micron มีร่องรอย

ของการเกาะติดของอนุภาคเขม่าบนขั้วเก็บประจุคดน้อยลงเนื่องจากพลังงานที่ผิวมีค่า 1.55×10^{-13} J ในขณะที่พลังงานจลน์มีค่า 1.66×10^{-14} J และอนุภาคเขม่าที่มีขนาด 50 micron แทบจะไม่มี การเกาะติดของอนุภาคเขม่าบนขั้วเก็บประจุ เนื่องจากพลังงานที่ผิวมีค่า 3.35×10^{-12} J ในขณะที่พลังงานจลน์มีค่า 1.06×10^{-11} J

พานิช อินต๊ะ และณัฐวุฒิ คุชฎี (2550) เสนอวิธีการทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นเรียบ สำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.01 – 100 micron จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเส้นลวด-แผ่นเรียบ มีศักยภาพสูงเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออกจากเตาเผาชีวมวล โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แรงดันไฟฟ้าในช่วง 1 – 100 kV ความเร็วของแก๊สในช่วง 0.5 – 2.0 m/s และอุณหภูมิของแก๊สในช่วง 250 - 750 °C โดยใช้สมการของ Deutsch (Parker, 1997) จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 micron มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ยสูงถึง 99.99% และอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 micron จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ยที่ 91.68%

จากการทบทวนเอกสารการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเกิดจากพลังงานจลน์ของอนุภาคมีค่าน้อยกว่าพลังงานจากไฟฟ้าสถิตและพลังงานพื้นผิวระหว่างอนุภาคที่ได้รับการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุและขั้วเก็บประจุจะเกิดการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจูดังนั้นในการเพิ่มพลังงานจากไฟฟ้าสถิตโดยการให้แรงดันไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุมากขึ้น

ลักษณะการไหลในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบและประสิทธิภาพ

ในหัวข้อนี้จะทบทวนเอกสารเพื่อศึกษาการไหลของสนามความเร็วและแนวกระแสในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ

Januz et al. (2006) สังเกตสนามความเร็วและแนวกระแสนของการไหลของอนุภาคแอโรซอลในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบโดยสังเกตจากการใช้

เส้นลวดสแตนเลสเพียงเส้นเดียวซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างขั้วเก็บประจุ ภายใต้การไหลแบบ electro hydrodynamic (EHD) และเหนี่ยวนำให้เส้นลวดเป็นขั้วบวก จากการสังเกตแบบจำลองโดยให้ค่าของความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 0 ถึง 1 m/s สนามความเร็วมีลักษณะการไหลแบบหมุนวนที่ก่อกวนถึงเส้นลวด ยิ่งความเร็วสูงขึ้นก็จะมีกรไหลแบบหมุนวนมากขึ้นและจะกระจายออกไปหลังจากผ่านเส้นลวด ในส่วนของการสังเกตเส้นทางของแนวกระแสจะเป็นลักษณะเส้นทางเป็นแบบหมุนวนเช่นเดียวกับสนามความเร็ว แต่เส้นทางกรไหลจะไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเส้นทางของแนวกระแสที่เกิดการหมุนวน ถัดออกมาจากเส้นลวดเป็นระยะทางประมาณ 120-130 mm. มีความเร็วลม 0 m/s

Podlinski et al. (2001) ใช้วิธีการของ PIV (particle image velocimetry) วัดการไหลของอนุภาคสนามความเร็ว และบันทึกภาพการไหลของควันทูบหรือในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ สำหรับการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบซึ่งประกอบขึ้นมาด้วย เส้นลวดที่ทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ยาว 200 mm ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วเก็บประจุ ส่วนขั้วเก็บประจุทำจากสแตนเลส เช่นกัน ความยาว 60 cm ความกว้าง 20 cm ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบเท่ากับ 10 cm ผลปรากฏว่า ที่ความเร็วเฉลี่ย 0.2 m/s และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 V การไหลจะเป็นแบบราบเรียบเกือบทั้งหมด ที่ความเร็วเฉลี่ย 0.2 m/s เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 24 และ 30 kV เกิดความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

Kocik et al. (2005) ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการตกตะกอนในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่มีเส้นลวด 7 เส้น และใช้ควันทูบหรือเป็นอนุภาคที่ไหลผ่าน ผลการวัดการกระจายของอนุภาคพบว่าอยู่ในช่วงขนาด 0.5 ถึง 8 micron ที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 0.2 และ 0.8 m/s หลังจากการตกตะกอนลงบนขั้วเก็บประจุเรียบร้อยแล้ว ซึ่งในการทดลองที่ความเร็วลมต่าง ๆ นั้นจะทำการสลับขั้วบวกและขั้วลบเข้ากับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบผลปรากฏว่า ถ้าใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วลบเป็นตัวเหนี่ยวนำจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าจากขั้วบวกที่ความเร็วลมเฉลี่ย 0.2 และ 0.8 m/s

จากการทบทวนเอกสารลักษณะการไหลในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ สนามความเร็วมีลักษณะการไหลแบบหมุนวนก่อกวนถึงเส้นลวด เมื่อความเร็วสูงขึ้นก็จะมีกรไหลแบบหมุนวนมากขึ้นและจะกระจายออกไปหลังจากผ่านเส้นลวด เส้นทางของแนว

กระแสจะเป็นลักษณะเส้นทางเป็นแบบหมุนวนเช่นเดียวกับสนามความเร็ว แต่เส้นทางการไหลจะไม่เป็นระเบียบ เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสนามความเร็วจะเกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

- เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเครื่องดักเขม่าไม่พินด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตในสภาวะและเงื่อนไขต่างๆ
- เพื่อพัฒนาเครื่องดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม่พินด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตให้มีสมรรถนะเหมาะสมกับการใช้งาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- ออกแบบและสร้างชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับอนุภาคเขม่าจากไม่พินโดยยึดรูปแบบเส้นลวดและแผ่นเรียบ

- ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเครื่องดักเขม่าไม่พินด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ความยาวของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประมาณ 1.3 m

ความสูงของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประมาณ 0.64 m

ความเร็วที่ปล่องควันประมาณ 0.2 m/s

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 22 kV

และภายใต้ตัวแปรดังนี้

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (7.5 และ 5 cm)

ระยะห่างระหว่างเส้นลวดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (8.5 และ 6.4 cm)

- ออกแบบและติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ

- จัดสร้างต้นแบบที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ

1.4.ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ชุดทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับเขม่าควันของเครื่องดกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ สามารถนำไปใช้ในการศึกษาสำหรับผู้สนใจและนำผลการทดลองไปใช้จริงในการดักเขม่าควัน
- ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเครื่องดกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ
- ได้ต้นแบบเครื่องดกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ รู้จักวางแผนการทำงาน และมีกระบวนการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างเป็นระบบและมีเหตุผล

บทที่ 2

ทฤษฎี

การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation process) เป็นวิธีการควบคุมมลพิษทางอากาศที่ใช้กำจัดอนุภาคฝุ่นหรือแอโรโซล (aerosol) ออกจากการไหลของก๊าซ โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าสถิต เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายงานอุตสาหกรรม เช่น การแยกขี้เถ้าจากก๊าซที่ปล่อยออกมาจากปล่องควัน การใช้กำจัดอนุภาคและละอองกรดในอุตสาหกรรมสารเคมีและโลหะ เช่น โรงไฟฟ้า โรงโม่หิน อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดอากาศภายในบ้านสำนักงาน โรงพยาบาล และโรงงานผลิตอาหาร โรงไฟฟ้า เป็นต้น (พานิช อินต๊ะ, 2548)

เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิตจะกระทำต่อตัวอนุภาคเพียงอย่างเดียวจึงไม่มีผลต่อกระแสการไหลของก๊าซ ดังนั้นข้อดีของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้คือทำให้ความดันสูญเสียของก๊าซ (pressure drop) มีค่าต่ำ โดยปกติจะต่ำกว่า 100 Pa และมีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และข้อดีที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้ก็คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ (พานิช อินต๊ะ, 2548)

2.1 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิด เส้นลวด-แผ่นเรียบ

สำหรับความเข้าใจพื้นฐานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนคือ

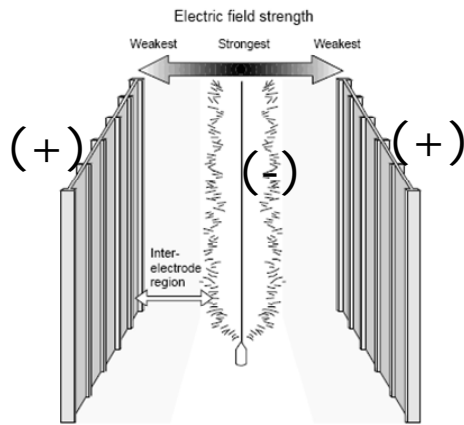
- การใส่ประจุให้กับอนุภาค (particle charging)
- การเก็บอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบนแผ่นเก็บที่มีศักย์ไฟฟ้าตรงข้ามกับประจุ
- การกำจัดอนุภาคที่ทับถมบนขั้วเก็บประจุ (rapping)

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตประกอบด้วยขั้วปล่อยประจุซึ่งโดยทั่วไปใช้เส้นลวดและขั้วเก็บประจุ ส่วนพื้นที่ระหว่างขั้วปล่อยประจุและขั้วเก็บประจุ เรียกว่า inter-electrode region ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) ที่บริเวณใกล้ขั้วเก็บประจุ จะมีสนามไฟฟ้าที่อ่อน แต่ในบริเวณใกล้ขั้ว

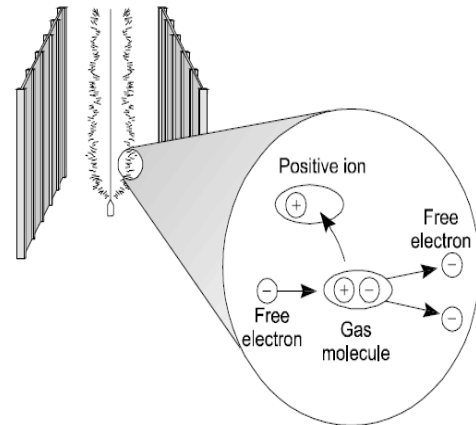
ให้เส้นลวดเป็นขั้วลบและให้ขั้วเก็บประจุเป็นขั้วบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) เส้นลวดจะสร้างอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นมา ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระนี้จะทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ไหลผ่านมาเปลี่ยนเป็นไอออนบวกดังแสดงในรูปที่ 2.1 (b) และทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นมาอีกเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c) เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์โคโรนาซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ ขั้วปล่อยประจุและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไปรวมตัวกับอนุภาคที่ไหลผ่านมาทำให้ตัวอนุภาคมีประจุลบเกินมาดังนั้นจึงเคลื่อนตัวไปเกาะติดบนขั้วเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 2.1 (d) ซึ่งทำให้เกิดการเกาะติดอยู่บนขั้วเก็บประจุ การกำจัดอนุภาคที่เกาะติดบนขั้วเก็บประจุสำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสามารถทำได้โดยการฉีดน้ำล้างอนุภาคที่เกาะติดหรือถ้าอนุภาคที่เกาะติดมีเล็กน้อยควรใช้การเคาะบริเวณขั้วเก็บประจุ (White, 1963)

2.2 ประเภทและโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

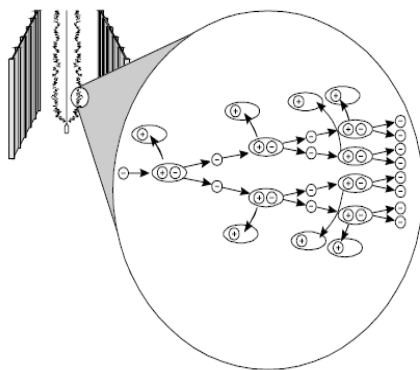
เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรมมีอยู่หลายรูปแบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับการใช้งานโดยจะสามารถแบ่งตามรูปแบบของขั้วการตกตะกอนได้เป็น 2 แบบ คือ แบบทรงกระบอก (cylinder type) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(a) และแบบเส้นลวด-แผ่นเรียบ (wire-plate type) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) แบ่งตามทิศทางการไหลของก๊าซได้ 2 แบบ คือ แบบการไหลของก๊าซในแนวนอน (horizontal gas flow) และการไหลของก๊าซในแนวตั้ง (vertical gas flow) และแบ่งตามการใช้น้ำได้ 2 แบบ คือ แบบแห้ง (dry type) และแบบเปียก (wet type) นอกจากนี้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตยังสามารถแบ่งตามรูปแบบของการใส่ประจุให้อนุภาคฝุ่นได้เป็น 2 แบบ คือ แบบขั้วเดี่ยว (single-stage type) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) และแบบสองขั้น (two-stage type) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(c) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



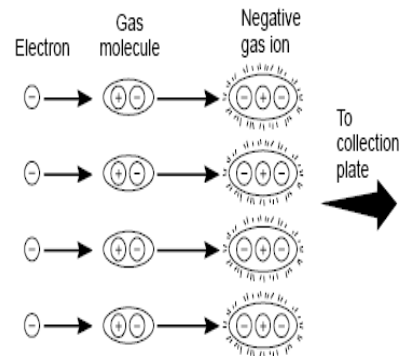
(a)



(b)

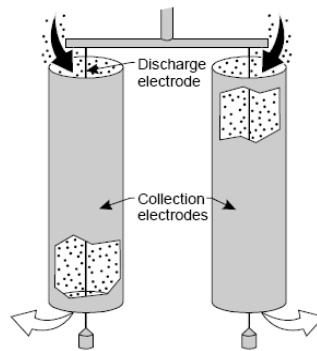


(c)

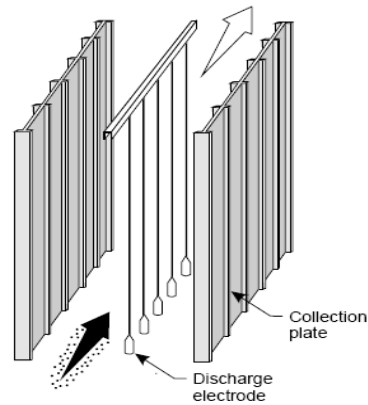


(d)

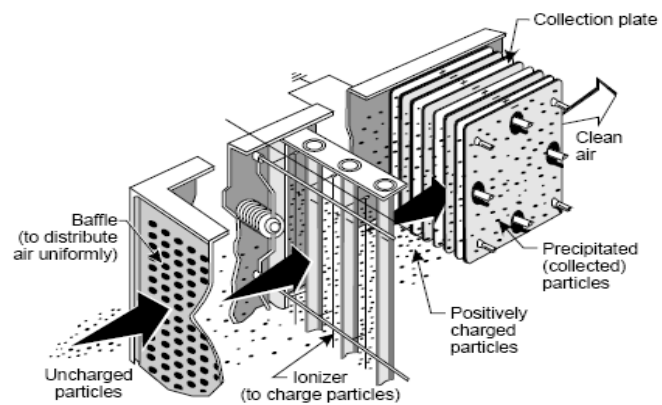
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ (a) การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (b) อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น (c) อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นอย่างทวีคูณ (d) การเคลื่อนของอนุภาคไปเกาะติดที่ขั้วเก็บประจุ (White, 1963)



รูปที่ 2.2 (a) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก (White, 1963)



รูปที่ 2.2 (b) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบขั้วเดี่ยว (White, 1963)



รูปที่ 2.2 (c) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสองชั้น (White, 1963)

1) แบบขั้วเดี่ยว เครื่องตกตะกอนแบบนี้ การอัดประจุให้กับอนุภาคฝุ่นและการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ได้รับประจุกระทำในสนามไฟฟ้าเดียวกัน เครื่องตกตะกอนแบบนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมต่างๆ และขั้วโคโรนาดีสชาร์จ์มักจะเป็นขั้วลบ

2) แบบสองชั้น การอัดประจุให้กับอนุภาคฝุ่นและการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ได้รับประจุในเครื่องตกตะกอนแบบนี้จะกระทำในสนามไฟฟ้าที่แยกจากกัน โดยทั่วไปแล้ว เครื่องตกตะกอนแบบนี้จะใช้เป็นเครื่องทำความสะอาดอากาศ เพื่อทำความสะอาดอากาศที่มีความเข้มข้นอนุภาคต่ำหรือใช้เป็นเครื่องก่อดัชนีไฟฟ้าสถิต

2.3 ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคเขม่าตามสัดส่วนการดักจับเขม่า (Fractional Collection Efficiency)

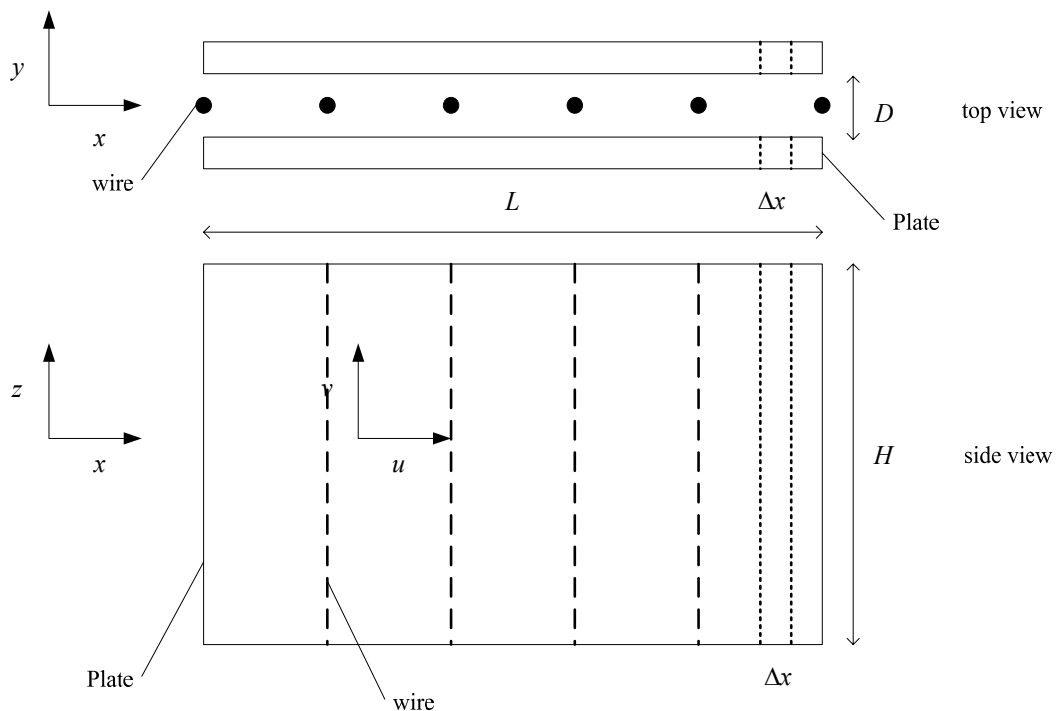
การคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคเขม่าตามสัดส่วนการดักจับเขม่า ซึ่งได้จากการทดลองสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta = 1 - \frac{C_{exit}}{C_{inlet}} \quad (2.1)$$

โดยที่ C_{exit} และ C_{inlet} คือความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าที่ทางออกและทางเข้าตามลำดับ

การคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคเขม่าจะใช้สมการของ Deutsch-Anderson (Nóbrega, 2004) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายโดยสมการนี้ใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1922 ซึ่งการอ้างอิงตามการตกตะกอนของเส้นลวดและแผ่นเรียบอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตามสมมุติฐานดังนี้

- ก๊าซและอนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน x ที่ความเร็วคงที่ u
- อนุภาคมีการแพร่กระจายในทิศทาง x และ y ที่ทุก ๆ จุดของ x
- การใส่ประจุและการเก็บอนุภาคเป็นแบบคงที่และอนุภาคมีความเร็วของการเคลื่อนย้ายอนุภาค (u_e) ในทิศทาง y อย่างรวดเร็วมาก
- เมื่ออนุภาควิ่งชนแผ่นเก็บอนุภาคจะถูกดักเก็บทั้งหมด



รูปที่ 2.3 ภาพมองด้านบนและด้านข้างของช่องการไหลของการตกตะกอนของเส้นลวดและแผ่น
เรียบ

สมการ Deutsch–Anderson ซึ่งใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่อง
ตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (collection efficiency) มีดังนี้ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.)

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-u_e A_c}{Q}\right) \quad (2.2)$$

โดยที่ η คือประสิทธิภาพการเก็บ A_c คือพื้นที่ผิวของขั้วเก็บ (m^2) Q คือปริมาตร
การไหลของก๊าซที่เข้าเครื่อง (m^3/s) และ u_e คือความเร็วของการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (m/s) ซึ่ง
แสดงในหัวข้อถัดไป

2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle Motion)

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะต้องพิจารณาแรงทั้งหมดที่กระทำบนอนุภาคคั้งนี้ แรงคูลอมบ์หรือแรงทางไฟฟ้า (coulomb force) และแรงต้าน (drag force)

แรงคูลอมบ์หรือแรงทางไฟฟ้า (coulomb force) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้น (E) อนุภาคที่มีประจุจะได้รับแรงคูลอมบ์ (F_e) ที่กระทำต่ออนุภาคซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$F_e = n(t)eE \quad (2.3)$$

โดยที่ $n(t)$ คือจำนวนการประจุบนอนุภาค e คือประจุของอิเล็กตรอน (coulomb/electron) (1.6×10^{-19}) และ E คือความแรงของสนามไฟฟ้า (V/m)

แรงต้าน (drag force) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์กับก๊าซ (carrier gas) ที่อนุภาคแขวนลอยอยู่อนุภาคแขวนลอยจะอยู่ภายใต้แรงต้านเชิงอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic drag force) (F_d) แรงต้านนี้หาได้จากกฎของ สโตกส์ (Stoke's law) ดังนี้

$$F_d = 3\pi\mu_e d_p \quad (2.4)$$

โดยที่ μ คือความหนืดของก๊าซ ($N \cdot s/m^2$) และ d_p คือขนาดของอนุภาค (m)

กฎของสโตกส์เป็นวิธีการจำเพาะของ Navier-Stokes Equation โดยการสมมติให้แรงเนื่องจากความเฉื่อยมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงหนืด เกิดขึ้นเมื่อการไหลมีค่าเลขเรย์โนลด์ของอนุภาคน้อยกว่า 1.0 การเคลื่อนที่คั้งที่ของอนุภาคแข็งไม่ยืดหยุ่นไม่มีผนังกั้นหรืออนุภาคอื่น ๆ ไกล่เคียงเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ และความเร็วของของไหลเป็นศูนย์ที่พื้นผิวของอนุภาค ซึ่งกฎของสโตกส์สัมพันธ์กับความเร็วของก๊าซ เมื่ออนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับระยะการเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของก๊าซ (gas mean free path) หรือประมาณ 0.066 micron ที่สภาวะอนุภาคปะปนอยู่ในก๊าซ

แรงต้านทานของก๊าซจะกระทำต่ออนุภาคอย่างไม่ต่อเนื่อง และอนุภาคจะลื่นไถล (slip) ที่พื้นผิวระหว่างโมเลกุลของก๊าซ (ได้แก่ความเร็วของของไหลที่ล้อมรอบพื้นผิวอนุภาคจะไม่ใช่ศูนย์) เพื่อทำการนับรวมสำหรับค่าลื่นไถลของพื้นผิวนี้นี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้ตัวชดเชย กับสมการของสโตกส์ เพื่ออธิบายความเร็วของอนุภาคที่ตกเร็วขึ้น ตัวชดเชยนี้เรียกว่า ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (Cunningham slip correction factor) แรงต้านสำหรับการไหลแบบลื่นไถลสามารถคำนวณได้จาก

$$F_d = \frac{3\pi\mu_e d_p}{C_c} \quad (2.5)$$

โดยที่ C_c คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม (-) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$C_c = 1 + \frac{2.25\lambda}{d_p} ; \text{for } d_p > 0.1 \text{ micron} \quad (2.6)$$

ในที่นี้ λ คือระยะทางอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล (0.066 micron)

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's law of motion) ของอนุภาคจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ

$$F_e + F_d = ma \quad (2.7)$$

$$m \frac{du_e}{dt} = n_p e E - 3\pi\mu d_p u_e \quad (2.8)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.8) จะได้ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (electrical drift velocity of particles) ดังนี้ (พานิช อินต๊ะ, 2548)

$$u_e = \frac{n(t)eEC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.9)$$

โดยที่ $n(t)$ คือจำนวนการประจุบนอนุภาค (#) E คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (V/m) และ C_c คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม (-)

2.5 ความแรงของสนามไฟฟ้า (Electrical Field Strength)

ความแรงสนามไฟฟ้า (E) ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคำนวณได้จาก

$$E = \frac{V_w}{s} \quad (2.10)$$

โดยที่ E คือความแรงสนามไฟฟ้า (V/m) V_w คือแรงดันไฟฟ้าที่ใส่ (V) และ s คือระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเรียบ (m)

2.6 การให้ประจุอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดีซชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าหรือการแพร่เชิงความร้อน (thermal diffusion) ดังนั้นการคำนวณจำนวนประจุบนอนุภาคคำนวณได้จากการใช้ประจุแบบแพร่เชิงความร้อน (diffusion charging) และ จำนวนประจุบนอนุภาคจากการให้ประจุสนามไฟฟ้า (field charging) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

การแพร่เชิงความร้อนเป็นวิธีการให้ประจุที่อนุภาคได้รับประจุจากการสัมผัสและเกาะติดของไอออนซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนไร้ระเบียบ (Brownian random motion) การให้ประจุวิธีนี้มีความสำคัญกว่าวิธีการอื่นๆ ในกรณีของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า 2 micron การแพร่เชิงความร้อนจะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้า เพราะการเคลื่อนไหวของไอออนยอมขึ้นอยู่กับทั้งแรงเชิงไฟฟ้าสถิตและแรงของการแพร่กระจาย จำนวนประจุบนอนุภาคคำนวณได้จากการให้ประจุแบบแพร่เชิงความร้อนได้จากสมการ (Hind, 1999)

$$n_d(t) = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_p C_i e^2 N_i t}{2kT} \right] \quad (2.11)$$

โดยที่ $n_d(t)$ คือจำนวนประจุจากการให้ประจุแบบแพร่เชิงความร้อน (#) k คือค่าคงที่ของโบลตซ์มานน์ (1.38×10^{-23} J/K) K_E คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมบ์ (9×10^9 Nm²/C²)

C_i คือความเร็วอุณหภูมิลึ้นของไอออน (240 m/s ที่สภาวะมาตรฐาน) N_i คือค่าความเข้มข้นของไอออน (ions/m³) t คือเวลาที่เริ่มนับจากการใส่ประจุ (sec) T คืออุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน (K) และ e คือประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} coulomb/electron)

การให้ประจุแบบสนามเป็นการให้ประจุนอกภาคโดยสนามไฟฟ้า อนุภาคที่รับประจุจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนโมมเฉพาะถิ่น (local deformation) ของสนามไฟฟ้าในลักษณะที่เส้นสนามไฟฟ้าจะวิ่งตัดกับอนุภาค ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายไปตามเส้นของสนามไฟฟ้า กระแทกกับอนุภาค และถูกยึดจับโดยแรงของประจุจินตภาพ (image charge force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับอนุภาคเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จำนวนประจุนอกภาคจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเฉพาะถิ่นที่เกิดจากประจุนอกภาคก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าเดิมจนเส้นเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป ซึ่งการให้ประจุด้วยวิธีนี้มีความสำคัญกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 2 ไมครอนการคำนวณจำนวนประจุนอกภาคจากการให้ประจุแบบสนามคำนวณได้จาก (Hind, 1999)

$$n_f(t) = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่ $n_f(t)$ คือจำนวนประจุนอกภาคจากการให้ประจุแบบสนาม (#) ε คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (dielectric constant) (-) และ Z_i คือการเคลื่อนย้ายไฟฟ้าของไอออน (ion electrical mobility) (2.1×10^{-4})

ค่าความเข้มข้นของไอออน (N_i) คำนวณได้จาก

$$N_i = \frac{I_c d}{Z_i e u V_w h t} \quad (2.13)$$

โดยที่ I_c คือกระแสโคโรนาเฉลี่ย (A) d คือรัศมีทรงกระบอกเทียบเท่า (equivalent cylindrical radius) (m) u คือความเร็วของของไหล (m/s) และ h คือความสูงของแผ่นตกตะกอน (m)

ส่วนจำนวนประจุโดยรวม ($n(t)$) คำนวณได้จาก

$$n(t) = n_f(t) + n_d(t) \quad (2.14)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดัน สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell ที่ครอบคลุมสมการ Poisson ของสนามไฟฟ้า (E) สำหรับก๊าซภายใต้สภาวะปกติ สมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของประจุค้างของไอออน (ion space charge) ในเครื่องตกตะกอนเชิงฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบมีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (average corona current) ที่เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรดของเครื่องตกตะกอนเชิงฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ คำนวณได้จาก

$$I_c = \frac{\pi \epsilon_0 Z_i h L}{c s^2 \ln\left(\frac{d}{r_0}\right)} V_w (V_w - V_c) \quad (2.15)$$

โดยที่ I_c คือกระแสโคโรนาเฉลี่ย (A) ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) (8.854×10^{-12} F/m) และ d คือรัศมีทรงกระบอกเทียบเท่าหาได้จาก

$$d = \left\{ \begin{array}{ll} 4 \frac{s}{\pi} & ; \frac{s}{c} \leq 0.6 \\ 2c 0.18 \exp\left(2.96 \frac{s}{2c}\right) & ; 0.3 \leq \frac{s}{2c} \leq 1.0 \\ 2c \frac{1}{2\pi} \exp\left(\frac{\pi s}{2c}\right) & ; 1.0 \leq \frac{s}{2c} \end{array} \right.$$

โดยที่ r_0 คือรัศมีของขั้วปล่อยประจุ (m) s คือระยะครึ่งหนึ่งระหว่างแผ่นเรียบ (m) c คือระยะครึ่งหนึ่งระหว่างเส้นลวด (m) h คือความสูงของแผ่นตกตะกอน (m) L คือความยาวของแผ่นตกตะกอน (m) และ V_c คือแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset voltage) (V) เพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ยคำนวณได้จาก

$$V_c = r_0 E_c \ln \left(\frac{d_p}{r_0} \right) \quad (2.16)$$

การคำนวณสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset field) สำหรับโคโรนาลบ ในอากาศเพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาคำนวณจาก

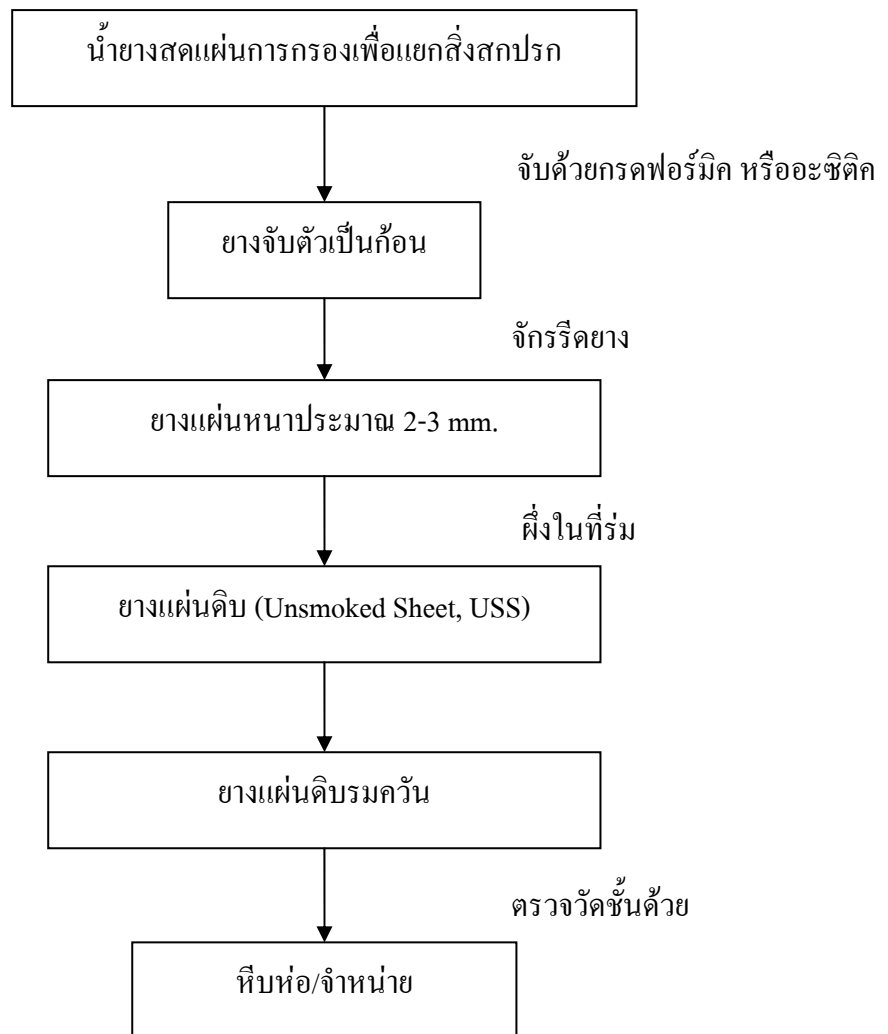
$$E_c = \delta \left(32.2 + \frac{0.864 \times 10^5}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \quad (2.17)$$

โดยที่ E_c คือสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (V/m) และ δ คือความหนาแน่นของ ก๊าซ (Gas Density) (kg/m^3)

2.7 การผลิตยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet rubber production)

ขั้นตอนการทำยางแผ่นรมควัน

การรมควันยางแผ่น หมายถึง การอบแห้งยางแผ่น โดยใช้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ ไม้ฟืน ไหลเข้าสัมผัสแผ่นยางโดยตรง เป็นวิธีที่ใช้ป้องกันการเกิดราและทำให้ยางแผ่นแห้งและสุก เพื่อรักษาคุณภาพของยาง การแห้งของยางแผ่นสังเกตได้จากการที่ไม่มีส่วนชุ่มมัวในแผ่นยาง ยางแผ่นที่มีคุณภาพจะต้องไม่มีสิ่งสกปรก และฟองอากาศในเนื้อยางแผ่น การรมควันยางแผ่นเป็น ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งของการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของยางแผ่นรมควันและต้นทุน การผลิต ขั้นตอนในการผลิตแผ่นยางจนกระทั่งได้ยางแผ่นรมควันดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการทำยางแผ่นรมควัน

ขั้นที่ 1 การทำให้น้ำยางจับตัว

นำน้ำยางมาผ่านการกรองแยกสิ่งสกปรกและนำมาผสมรวมกันในบ่อรับน้ำยาง จากนั้นนำมาผสมกับน้ำสะอาด และกรดฟอร์มิกในอัตราส่วนที่เหมาะสมในตะกุง ยางจะจับตัวในตะกุง มีลักษณะเป็นแผ่นนิ่มคล้ายก้อนเต้าหู้ จากนั้นนำแผ่นยางเข้าเครื่องรีด

ขั้นที่ 2 การรีดยาง

แผ่นยางจะถูกรีดด้วยเครื่องรีดยาง โดยที่แผ่นยางที่ผ่านการรีดจะมีความหนาประมาณ 2-3 mm. ยางที่ผ่านการรีดแล้วจะมีความชื้นประมาณ 60% ฐานแห้ง จากนั้นจะนำมาผึ่งบน

ราวเพื่อให้ น้ำบางส่วนระเหยออกจนมีความชื้นประมาณ 40% ฐานแห้ง แล้วจึงนำเข้าห้องรม เพื่อทำการรมควันในขั้นตอนต่อไป

ขั้นที่ 3 การรมยาง

การแห้งของยางแผ่นประกอบด้วย 2 กลไก คือ การดึงน้ำออกจากยางแผ่นมาให้ อากาศ และการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศให้ยางแผ่น โดยอาจแบ่งกระบวนการแห้งออกได้ 2 ช่วง คือ ช่วงแรกผิวยางยังเปียกอยู่หรือช่วงอัตราการแห้งคงที่ และช่วงหลังผิวยางแห้งแล้วหรือช่วง อัตราการแห้งลดลง ในแต่ละช่วงของการแห้ง จะมีปัจจัยจำกัดต่อการระเหยน้ำออกจากยางแผ่นที่ ต่างกัน ในช่วงแรก อุณหภูมิ ความชื้น อากาศ ความเร็วอากาศ จะมีผลต่อการระเหยน้ำออกจากผิว ของยางแผ่น ส่วนในช่วงหลัง อัตราการแห้งขึ้นกับการเคลื่อนที่ของน้ำในเนื้อยางมาที่ผิว ดังนั้นการ แห้งในช่วงหลังต้องการใช้เวลามากกว่าช่วงแรก

ในปัจจุบัน การรมควันยางแผ่นของสหกรณ์เป็นการทำให้ยางแผ่นแห้งจากที่ ความชื้น 40% เหลือ 0.3-0.4% โดยการใช้ความร้อนจากการเผาไม้ฟืนยางพารา ก๊าซร้อนที่ได้จาก การเผาไหม้น้ำไปกระจายในห้องรม โดยให้ก๊าซร้อนไหลไปสัมผัสและคายความร้อนให้แก่ยาง แผ่น

อุณหภูมิในห้องรมขึ้นกับอัตราการเผาไหม้ไม้ฟืน การใส่ไม้ฟืนอย่างสม่ำเสมอ ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ต่อครั้งจะสามารถควบคุมอุณหภูมิในห้องรมให้คงที่ได้ โดยทั่วไปในการ รมควันยางแผ่นจะควบคุมความร้อนให้ห้องรมควันร้อนมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 50-70 °C และ สำหรับยางแผ่นดิบหนา 3 มิลลิเมตร อุณหภูมิสูงสุดต้องไม่เกิน 70 °C มิฉะนั้นยางแผ่นจะเยิ้มและ ยึดตัว

อุณหภูมิห้องรมที่เหมาะสมเป็นดังนี้

วันที่ 1 อุณหภูมิ 49-52 °C

วันที่ 2 อุณหภูมิ 52-57 °C

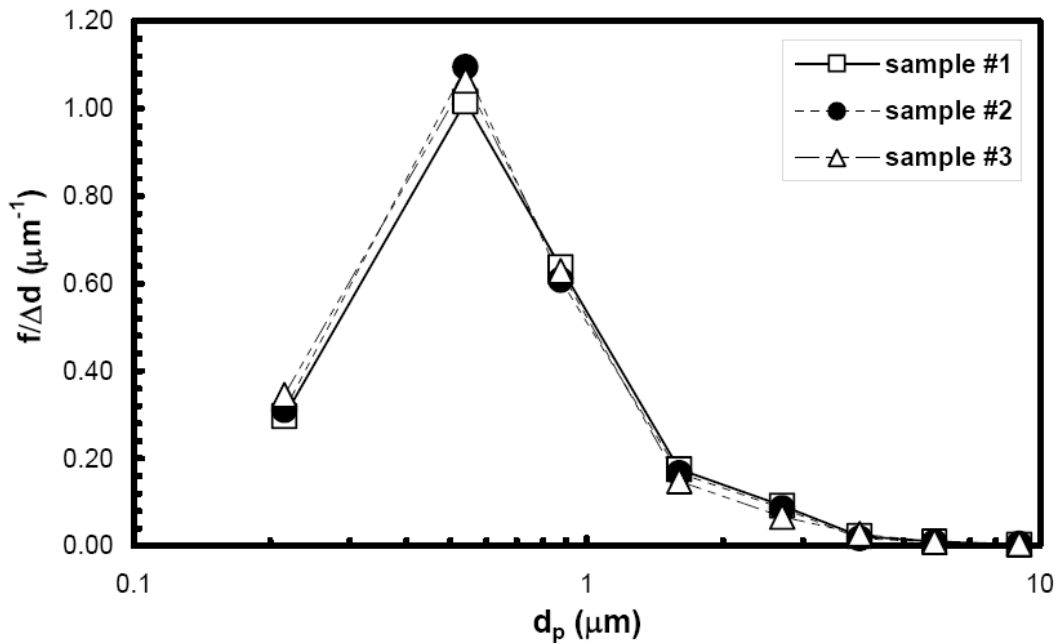
วันที่ 3 อุณหภูมิ 57-60 °C

วันที่ 4 อุณหภูมิ 60-63 °C

ในวันแรกของการรมควัน ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปผิวยางแผ่นจะแห้งเร็วทำให้เนื้อ ยางหดตัวปิดปากรูซึม น้ำที่เหลือซึมออกมาไม่ได้ถูกกักอยู่ในเนื้อยาง เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยน สถานะเป็นไอและกลายเป็นฟองอากาศค้างอยู่ในเนื้อยางแผ่น และห้องรมมีอุณหภูมิที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน จะช่วยให้ยางแผ่นแห้งเร็วขึ้น ในวันสุดท้าย ปล่อยให้อุณหภูมิห้องรมลดลงเหลือ ประมาณ 40-50 °C แล้วจึงนำยางออกจากห้อง (กฤษิต จงเดิม และอนันต์ เครือทอง, 2550)

อุตสาหกรรมการผลิตยางแผ่นรมควันเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานชีวมวลเป็นจำนวนมากในขั้นตอนของการรมควันยาง ไม้พินจากไม้ยางพาราจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาในการผลิตแก๊สร้อนเข้าสู่ห้องรมควันยางเพื่อให้ยางแห้งและสุก เชื้อเพลิงที่ใช้จะต้องเป็นเชื้อเพลิงจากไม้พินเท่านั้นเนื่องจากในควันมีกรดฟีนอลิก (phenolic acid) ที่จะไปเคลือบบนแผ่นยางเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อรา ไม้ยางพาราที่ใช้เป็นไม้ยางที่ยังสดมีค่าความชื้นสูง การเผาไหม้เชื้อเพลิงดังกล่าวจึงให้อนุภาคควันจำนวนมาก พบว่าอนุภาคควันที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของไม้พินมีองค์ประกอบของสารเคมีที่ก่อเกิดมลภาวะที่อันตรายหลายชนิด โดยเฉพาะสารประกอบ polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งโดยทั่วไป PAHs จัดเป็นสารก่อเกิดการกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็ง International Agency for Research on Cancer (IARC) จัดให้ PAHs เป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งปอด กระเพาะปัสสาวะ และผิวหนัง (IARC, 1982) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของ PAHs จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค โดยความเข้มข้นของ PAHs สูงขึ้นที่อนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.5 micron (Chomanee et al., 2009)

อุตสาหกรรมการผลิตยางแผ่นรมควันของไทยมีสหกรณ์กองทุนสวนยาง (สทย.) เป็นฐานหลักในการผลิตที่สำคัญ ปัจจุบันมีอยู่ประมาณ 695 แห่งทั่วประเทศ (สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2546) ซึ่งแต่ละแห่งมีจำนวนห้องรมถึง 4 ห้องจากงานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของอนุภาคควันจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราพบว่าให้กำเนิดอนุภาคเขม่าควันได้มากถึง 4.33 กิโลกรัม/ห้อง/เดือน การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม้ยางในโรงรมควันโดยขนาดของอนุภาควัดได้โดยการใช้การเก็บตัวอย่างแบบลำดับส่วน (cascade andersen sampler) (Dylec, AN200) ซึ่งประกอบไปด้วย 8 ลำดับส่วน เก็บตัวอย่างของก๊าซที่ทางเข้าของห้องรมควันยาง ขนาดของอนุภาคเขม่าควันมีการกระจายตัวแบบโหมดเคียวมี mass median aerodynamic diameter (MMAD) เท่ากับ 0.68 micron และมี geometric standard deviation (GSD) เท่ากับ 3.04 micron ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (Chomanee et al., 2009) และ 60% ของสารประกอบ PAHs ที่พบในอนุภาคควันเป็นชนิด 4-6 วงแหวน (Furuuchi et al., 2006, Tekasakul, 2006, Chomanee et al., 2009)

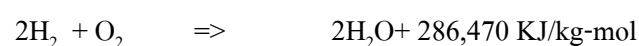
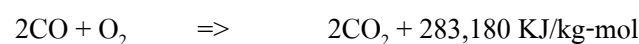


รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม้ยาง

2.8 ละอองลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ไม้พื้น (Wood Combustion Aerosol)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ แต่จะใช้ อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาตร หรือ 23% โดยน้ำหนัก

เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน (C) ออกซิเจน(O) ไฮโดรเจน (H) และธาตุอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เนื่องจากจะทำให้เกิด ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้จะมี ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

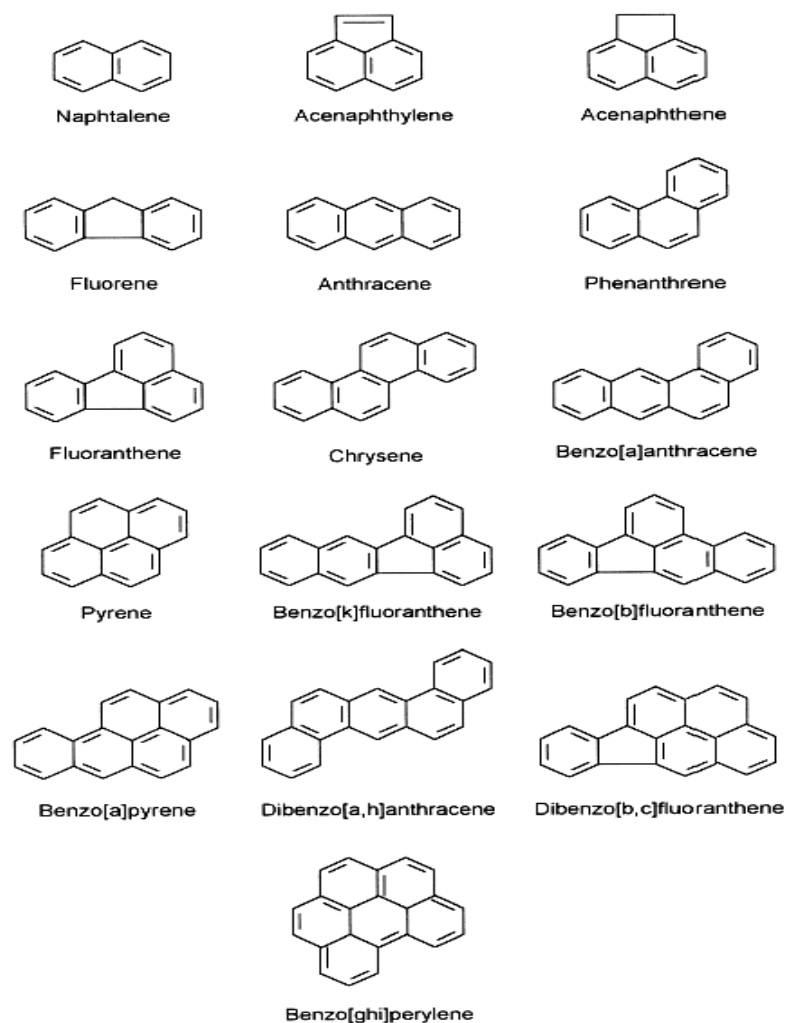


ปัญหาหลักในการเผาไหม้ไม้พื้นคือจะเกิดอนุภาคมามากวันซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น CO, NO_x, SO_x และอนุภาคละอองลอยที่เป็นของแข็ง (solid particulate matter) จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Zimmerman et al., 2000) ยิ่งไปกว่าจะก่อให้เกิดสารพิษจำพวก PAHs ด้วย จึงได้มีการตรวจหาอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ไม้พื้นในรูปแบบของก๊าซ (ควัน, อนุภาคเล็กๆ ที่ฟุ้งกระจาย) ของแข็ง (เขม่า, ฝุ่น, ขี้เถ้า, ขางไม้, สารน้ำมันที่ได้จากถ่านหิน) และของเหลวที่กลั่นแล้ว

2.9 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) เป็นสารประกอบวงแหวนของไฮโดรคาร์บอน ในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่มาจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) ของสารประกอบคาร์บอน เช่น น้ำมัน (oil) ไม้พื้น (wood) ขยะ (garbage) และถ่าน (coal) กระบวนการเผาไหม้ดังกล่าวจะให้อนุภาคของเขม่าควันที่มี PAHs ซึ่งมีองค์ประกอบมากมายดังแสดงเป็นตัวอย่าง 16 องค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดย PAHs ที่อยู่ในอนุภาคจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะไกลโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอากาศ PAHs บางชนิดสามารถละลายน้ำได้ บางชนิดสามารถอยู่ในพื้นดินซึ่งมาจากพวกถ่าน น้ำมันดิน ขางมะตอย หรือสารรักษาเนื้อไม้ เนื่องจากการกำจัดที่ไม่ถูกต้องเช่นการฝังกลบขยะไว้ใต้ดิน ผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์บางชนิด เช่น ลูกเหม็น (mothballs) ขางมะตอย (blacktop) และสารรักษาเนื้อไม้ (creosote wood preservatives) มีส่วนผสมของสาร PAHs และยังพบว่าเครื่องสำอางบางชนิด ได้แก่ ครีมทาผิว และแชมพูจัดรังแคมีส่วนผสมของน้ำมันดิน (coal tars) ซึ่งเป็นสาร PAHs (Chomanee et al., 2009) นั้นเป็นได้ทั้ง procarcinogen หมายถึง สารที่เกิดก่อนสารก่อมะเร็ง และ potent carcinogen หมายถึงสารก่อมะเร็งชนิดที่มีความรุนแรงและเป็นสารเริ่มต้นการก่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (promutagenicity) แต่อย่างไรก็ตามอันตรายจากสาร PAHs ยังขึ้นอยู่กับปริมาณที่ร่างกายมนุษย์ได้รับ ซึ่งในปัจจุบันนั้นพบว่าสาร PAHs ได้ปนเปื้อนเข้าไปในน้ำ พืชผัก และผลิตภัณฑ์อาหารที่มนุษย์ใช้เป็นอาหารในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อย ๆ ถึงแม้ว่าสาร PAHs หลายชนิดจะเป็นสารก่อมะเร็งที่เป็น procarcinogen ซึ่งหมายความว่าตัวของสารเองไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมโดยตรง แต่หลังจากที่มีมนุษย์ได้รับสาร PAHs นี้เข้าไปแล้วในขบวนการกำจัดของร่างกายอาจจะเปลี่ยนแปลงให้เป็นสารที่มีลักษณะเป็นสารก่อมะเร็งที่รุนแรงได้ สาร PAHs สามารถผ่านเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางจากการหายใจ สูดดม (breathing) การกินหรือการสัมผัสและการสัมผัส (touching) (US-EPA, 1987) PAHs ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ทั้ง โดยตรง เช่น จากอากาศที่หายใจเข้าไป จากการสัมผัส

วัตถุที่มี PAHs ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง หรือโดยอ้อม เช่น ผ่านทางอาหารหรือน้ำ PAHs ในอากาศอยู่ทั้งในสถานะที่เป็นก๊าซและที่เป็นอนุภาค โดย PAHs จะรวมกับอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน และสามารถผ่านเข้าสู่ปอดได้เนื่องจาก PAHs เป็นสารพวกไม่มีขั้ว (nonpolar) จึงละลายได้ดี ในไขมัน แต่ละลายได้น้อยในน้ำ ดังนั้นจึงสะสมในชั้นไขมันของร่างกายได้นาน และPAHs ยังอาจสะสมได้ในชั้นเมมเบรนของเซลล์ซึ่งเป็นฟอสโฟลิปิด (phospholipids) (US-EPA, 1987)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ PAHs 16 ชนิดหลัก ที่กำหนดโดย US - EPA

2.10 Toxic equivalency factor (TEFs) ของ PAHs

Toxic equivalency factor (TEFs) คือค่าบ่งบอกความเป็นพิษซึ่งมาตรฐานตาม USEPA (1984) สามารถแบ่งแยกออกได้ 2 ชนิดคือ 1. สารประกอบที่ก่อให้เกิดมะเร็ง 2. สารประกอบที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง โดยใช้ Benzo(a)pyrene (BaP) เป็นสารประกอบอ้างอิงที่มีค่า TEF เท่ากับ 1 เพื่อบ่งบอกว่า PAHs เป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดมะเร็ง และค่า TEF เท่ากับ 0 เพื่อบ่งบอกว่า PAHs เป็นสารประกอบที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง Nisbet และ Lagoy (1992) ได้มีการเสนอค่าบ่งบอกความเป็นพิษของแต่ละ PAHs ขึ้นมาดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยใช้ Benzo(a)pyrene (BaP) เป็นสารประกอบอ้างอิงที่มีค่า TEF เท่ากับ 1 ถ้า PAHs ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากนั้นแสดงว่ามี PAHs มีค่าความเสี่ยงที่จะเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งสูง (Fang et al., 2004)

ตารางที่ 2.1 Toxic equivalency factor (TEFs) ของ PAHs

Compound	CAS-Nr.	USEPA (1984)	Nisbet and LaGoy (1992)
Nap	91-20-3	0	0.001
AcPy	208-96-8	0	0.001
Acp	83-32-9	0	0.001
Flu	86-73-7	0	0.001
PA	5801-8	0	0.001
Ant	120-12-7	0	0.01
FL	206-44-0	0	0.001
Pyr	129-00-0	0	0.001
BaA	56-55-3	1	0.1
CHR	219-01-9	1	0.01
BbF	205-99-2	1	0.1
BkF	207-08-9	1	0.1
BaP	50-32-8	1	1
IND	193-39-5	1	0.1
DBA	53-70-3	1	1
BghiP	191-24-2	0	0.01

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสามารถปรับระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบและระยะห่างระหว่างเส้นลวดซึ่งเป็นเงื่อนไขการทดลองและศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้เหมาะกับการดักจับเขม่าโดยมีวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) และทำการสร้างชุดเก็บตัวอย่างประกอบด้วย อุปกรณ์ยึดกระดาศกรอง (filter holder) อุปกรณ์ควบคุมการไหล (orifice meter) เครื่องดูดฝุ่น (vacuum cleaner) และสร้างเตาสำหรับเผาไม้ฟืนเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคเขม่าควัน ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพที่เหมาะสม รวมทั้งสร้างระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เริ่มศึกษาหลักการและทฤษฎีของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบและวัสดุที่จะนำมาสร้าง หลังจากนั้นทำการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตและคำนวณช่วงของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดและขนาดของเส้นลวดทองแดงที่มีประสิทธิภาพตามต้องการเพื่อการทดลอง หลังจากนั้นจัดสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนดจากนั้นได้สร้างระบบทำความสะอาด และทำการทดลองเฉพาะเงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้วจึงสร้างต้นแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ ดังแสดงในขั้นตอนการวิจัยในรูปที่ 3.1

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ

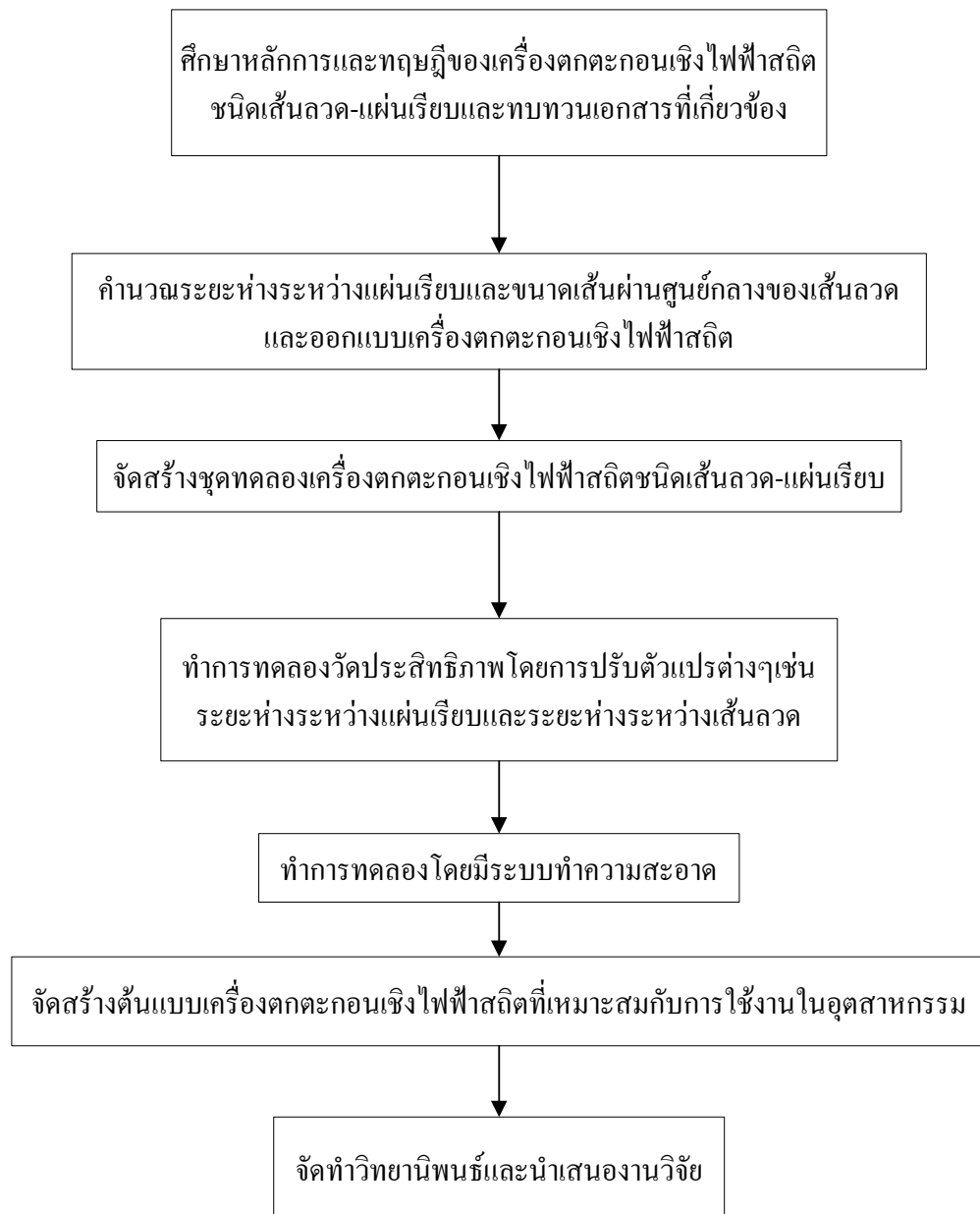
เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบออกแบบโดยการคำนวณตามสมการที่ 2.6, 2.10, 2.13-2.21 ในบทที่ 2 มีจุดมุ่งหมายให้มีประสิทธิภาพในขณะเริ่มต้น

การดักจับอนุภาคเขม่าสูงสุดเท่ากับ 93% เพื่อให้อนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ไม่ยังพาราบางส่วนไปเกาะติดบนแผ่นยางพาราเพื่อป้องกันเชื้อรา ซึ่งได้ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบเท่ากับ 7.5 cm ระยะห่างระหว่างเส้นลวดเท่ากับ 8.5 cm มีจำนวนแผ่นเรียบ 10 แผ่น มีจำนวนเส้นลวดต่อ 1 แถว 15 เส้น เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดเท่ากับ 1.0 mm (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข.) เนื่องจากประสิทธิภาพจากการทดลองจะแตกต่างจากค่าทางทฤษฎีจึงเพิ่มเงื่อนไขการทดลองให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบแคบลงและระยะห่างระหว่างเส้นลวดน้อยลงเพื่อต้องการให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานจริง ชุดอุปกรณ์การทดลองทั้งหมดที่เข้าร่วมในการทดลองประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) โดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V(AC) ผ่านหม้อแปลงหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V(AC) เป็น 15 kV(AC) และผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 22 kV (DC) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีเส้นลวดและแผ่นเรียบสลับกัน และชุดเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างอากาศปริมาณสูงโดยเก็บตัวอย่างผ่านอุปกรณ์ยึดกระดาษกรองซึ่งบรรจุแผ่นกรองประสิทธิภาพสูงชนิด HEPA ทำการชักตัวอย่างโดยเครื่องดูดฝุ่นและควบคุมการไหลในการเก็บตัวอย่าง โดยบอวลวลค่าอัตราการไหลตาม orifice meter เก็บตัวอย่างเพื่อหาประสิทธิภาพจากปริมาณอนุภาคเขม่าควันก่อนเข้าและหลังออกจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 ขนาดของเครื่องออกแบบให้มีขนาดความกว้าง×ยาว×สูงเท่ากับ 0.767×1.3×0.645 m ดังแสดงในรูปที่ 3.3

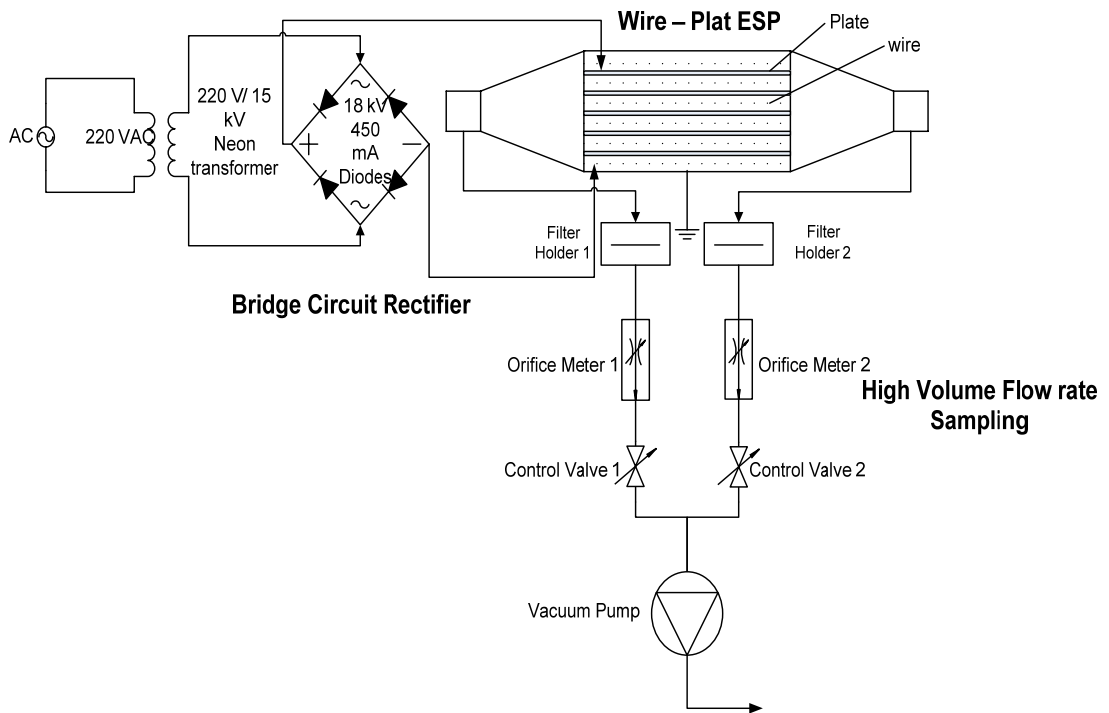
3.2.2 วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์

วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage transformer) ไดโอดแรงดันสูง (high voltage diode) และวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ โดยที่ขั้วบวกต่อกับแผ่นเรียบและขั้วลบต่อกับเส้นลวดดังแสดงในรูปที่ 3.4 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V(AC) เป็น 15 kV(AC) โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA หม้อแปลงชนิดที่ใช้เป็นแบบที่ใช้จ่ายไฟฟ้าให้กับป้ายโฆษณาเนียนอน (Lecip, EX230A15) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a) และเลือกไดโอดแรงดันสูง (high voltage diode) No. ESJC13 9kV/450 mA เป็นไดโอดที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟ (รายละเอียดไดโอดแสดงในภาคผนวก ง.) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (b) นำมาต่อเป็นวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ โดยในส่วนของไดโอดต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ไดโอดของวงจรบรรจุในน้ำมันหม้อแปลงเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟดังแสดงในรูปที่ 3.5 (c)

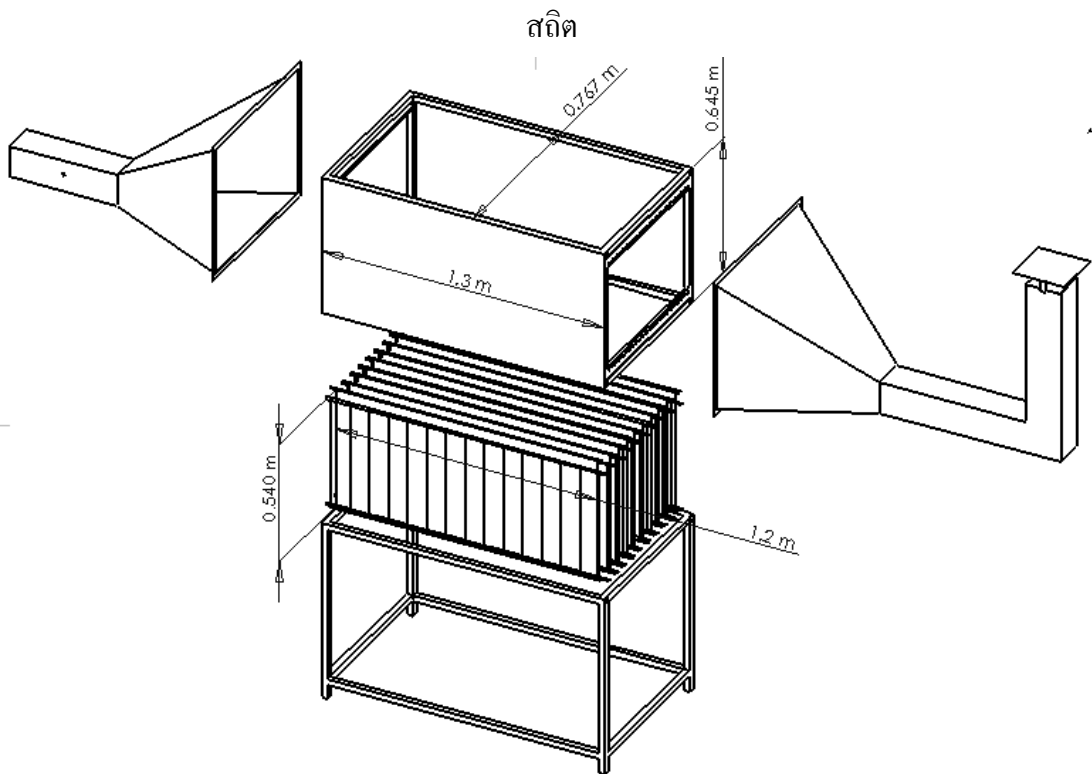
และอุปกรณ์วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (d) เพื่อให้สัญญาณที่ออกมาเป็นรูป full wave แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะต่อเข้ากับมุมของวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกนำออกที่สองมุมที่เหลือ



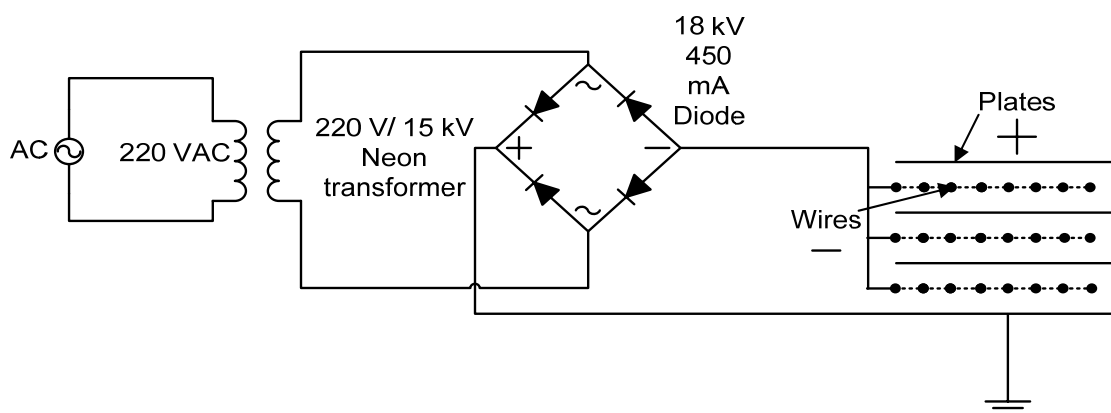
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย



รูปที่ 3.2 ไลอะแกรมชุดการทดลองทั้งหมดที่ใช้ร่วมในการทดลองของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 แบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแสดงวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า



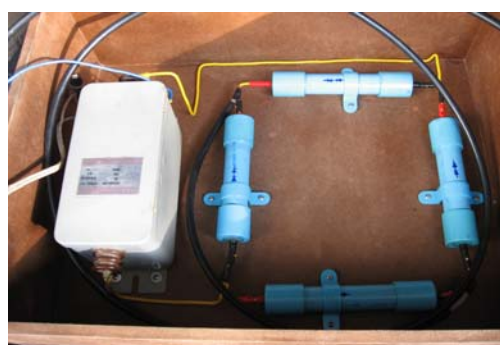
(a)



(b)



(c)

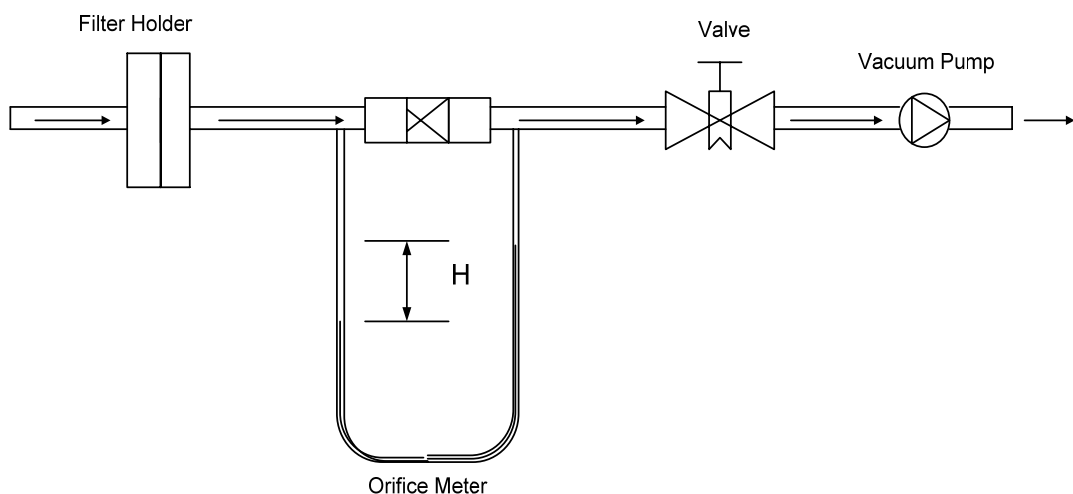


(d)

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วงจรสำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (a) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (b) ไดโอดแรงดันสูง (c) ไดโอดแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (d) วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์

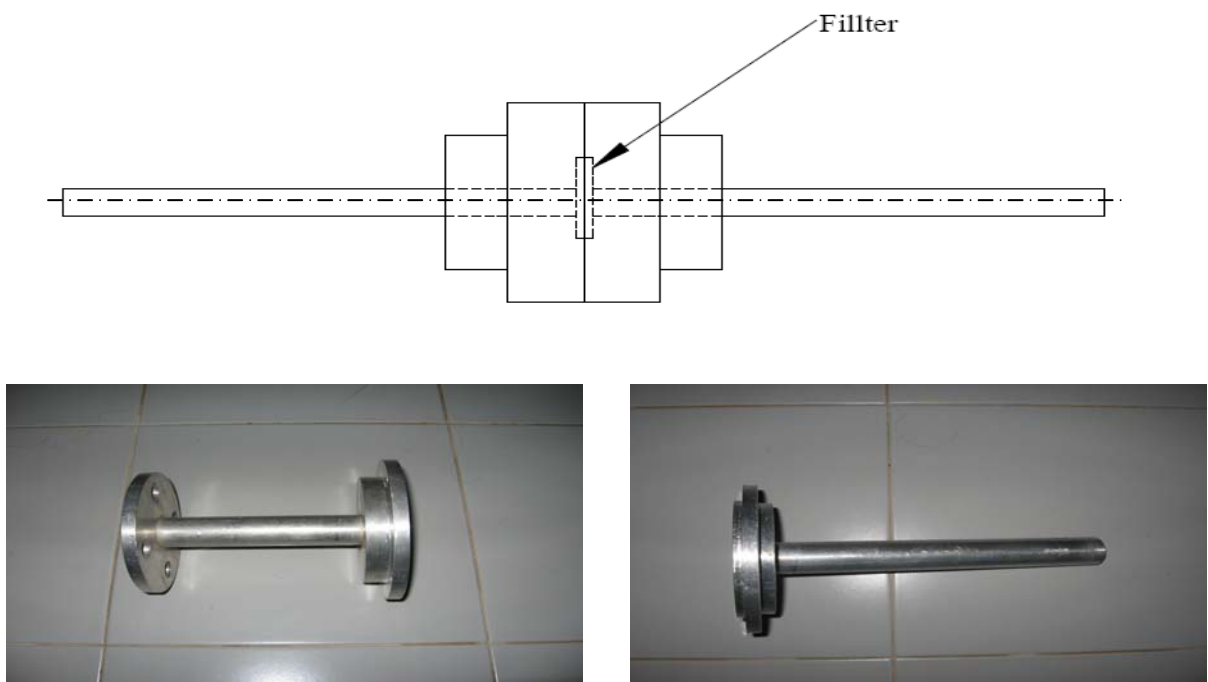
3.2.3 ชุดเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูง

ชุดเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูงประกอบด้วย 3 ส่วนคืออุปกรณ์ยึดกระดาษกรอง (filter holder) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (orifice meter) และเครื่องดูดฝุ่น (vacuum cleaner) โดยใช้บอลวาล์ว (ball valve) ในการควบคุมการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ชุดเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูงใช้เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นโดยรวมไม่ได้แยกตามขนาด โดยที่หลักการทำงานคือใช้แผ่นกรอง บรรจุในอุปกรณ์ยึดกระดาษกรองเพื่อดักฝุ่นทุกขนาดเอาไว้โดยใช้เครื่องดูดฝุ่นทำหน้าที่สร้างแรงดูดขึ้น อัตราการไหลสามารถวัดได้โดยหลักการของ orifice meter ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลต่างของความดันตกคร่อมอุปกรณ์ โดยในการทดลองจะอ่านจากผลต่างของความสูงของระดับน้ำทั้งสองด้านของมานอมิเตอร์รูปตัว U (U-tube manometer) เทียบกับกราฟความสัมพันธ์ความแตกต่างระดับน้ำกับอัตราการไหลซึ่งได้ปรับเทียบไว้แล้วก็จะทราบอัตราการไหล



รูปที่ 3.6 แสดงลำดับการติดตั้งชุดเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูง

อุปกรณ์ยึดกระดาษกรอง (filter holder) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเก็บตัวอย่างอนุภาคโดยภายในอุปกรณ์ยึดกระดาษกรอง มีตระแกรงเพื่อป้องกันกระดาษกรองถูกดูดเข้าไปในท่อเก็บตัวอย่างบรรจุกระดาษกรองชนิด HEPA (high efficiency particulate air filter) (Cambridge, glass fiber filter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm เพื่อดักเก็บอนุภาคตัวอย่างและนำกระดาษกรองซึ่งน้ำหนักอนุภาคเพื่อหาประสิทธิภาพ ซึ่งอุปกรณ์ยึดกระดาษกรอง เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดกระดาศกรอง

ในการวัดอัตราการไหลสามารถจำแนกออกได้เป็น การวัดโดยตรงและการวัดโดยทางอ้อม การวัดโดยตรงเป็นการวัดจากปริมาณการไหลจริง (เชิงปริมาตรหรือเชิงมวล) ในช่วงเวลาที่กำหนดให้ ส่วนการวัดโดยทางอ้อมเป็นการวัดจากการความแตกต่างความดันซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหลหรือเรียกว่าเครื่องมือวัดเสดสูญเสี่ย (head loss instrument) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดออริฟิซ (orifice meter) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลโดยอาศัยการวัดทางอ้อม สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมออริฟิซ กับอัตราการไหลได้ดังนี้

สมมติว่าการไหลอยู่ในแนวนอน ($z_1 = z_2$) เป็นแบบคงตัว (steady) ไม่มีความหนืด (inviscid) และอัดตัวไม่ได้ (incompressible) ระหว่างจุด 1 และจุด 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 สามารถเขียนสมการ Bernoulli ได้คือ

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_a V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_a V_2^2 \quad (3.1)$$

โดยที่ p_1 คือความดันของของไหลที่จุด 1 และ p_2 คือความดันของของไหลที่จุด 2 ส่วน V_1 คือความเร็วของของไหลที่จุด 1 และ V_2 คือความเร็วของของไหลที่จุด 2 และ ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศ

สมมติให้การกระจายความเร็วเป็นแบบสม่ำเสมอทั้งพื้นที่หน้าตัด 1 และ 2 สามารถเขียนสมการ Continuity ได้คือ

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2 \quad (3.2)$$

โดยที่ A_1 คือพื้นที่หน้าตัดการไหลที่จุด 1 และ A_2 คือพื้นที่หน้าตัดการไหลที่จุด 2 เมื่อ $A_2 < A_1$ นำสมการที่ 3.1 และ 3.2 รวมกันจะได้สมการอัตราการไหลทางทฤษฎี คือ

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_a [1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (3.3)$$

สามารถคำนวณอัตราการไหลทางทฤษฎีได้ โดยที่ Q คืออัตราการไหลทางทฤษฎี

ส่วนความดันตกคร่อมสามารถอ่านได้จากมานอมิเตอร์โดยใช้ความสัมพันธ์

$$P_1 - P_2 = \rho_w gH \quad (3.4)$$

โดยที่ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำที่บรรจุในมานอมิเตอร์และ H คือความแตกต่างระดับน้ำในมานอมิเตอร์

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการไหล (Q) จะสัมพันธ์กับความแตกต่างระดับน้ำ (H)

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2\rho_w gH}{\rho_a [1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (3.5)$$

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองใช้วัดอัตราการไหลในท่อเก็บตัวอย่าง โดยอ่านผลต่างความดันสูญเสีย (pressure drop) ระหว่างแผ่น orifice ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหล และทำการสอบเทียบกับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบมาตรฐานชนิด wet gas meter (SHINAGAWA, W-NK Da-10B) ซึ่งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเอง โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว หน้าแปลน PVC ประเก็นยาง แผ่นพลาสติกใสซึ่งเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm เป็น orifice ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และทำเป็นเทเปอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในส่วนของมานอมิเตอร์ (manometer) ซึ่งใช้อ่านความดันสูญเสีย มีลักษณะเป็นรูปตัว Y ทำจากหลอดแก้วขนาดเล็กและใช้สายยางเพื่อเชื่อมต่อหลอดแก้วทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 3.10



(a)

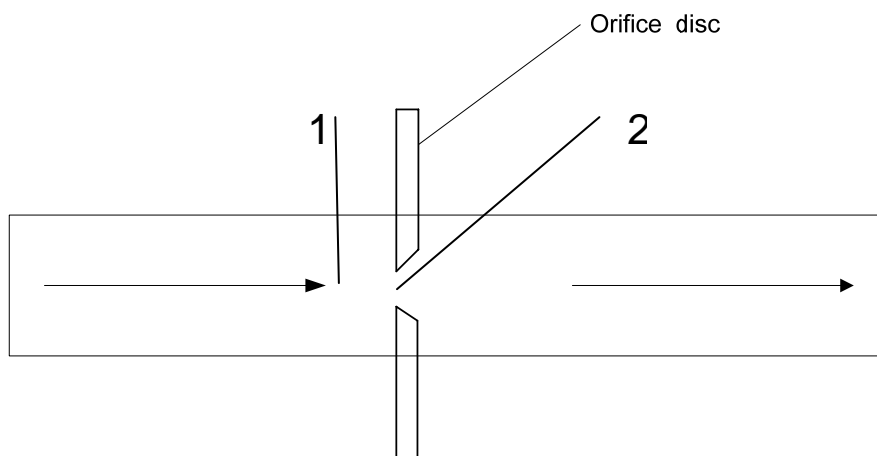


(b)



(c)

รูปที่ 3.8 (a) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่สร้างขึ้น (b) ประเก็นยาง (c) แผ่น orifice ซึ่งทำจากแผ่นพลาสติกใส



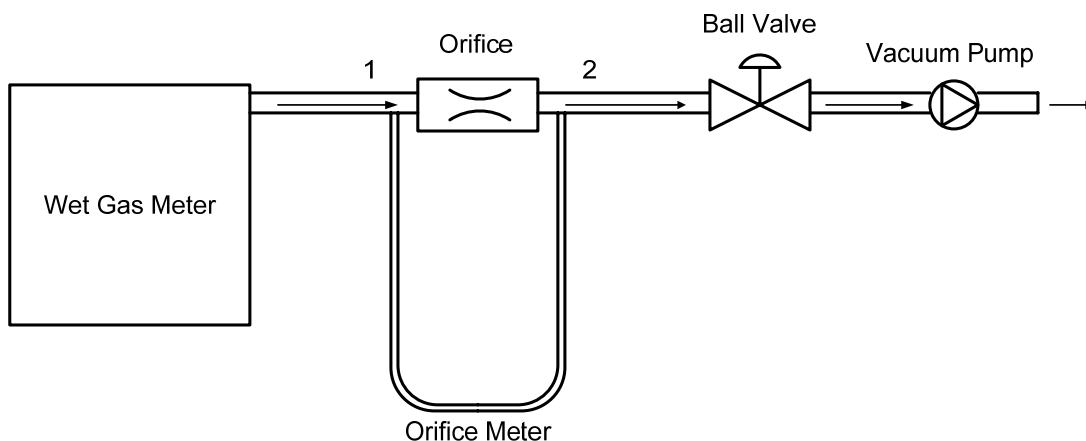
รูปที่ 3.9 ลักษณะแผ่น orifice ที่ใช้ในการทดลองนี้



รูปที่ 3.10 หลอดแก้วทำมานอมิเตอร์

การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลมีขั้นตอนดังนี้

1. นำชุด orifice meter ต่อกับเครื่องปรับเทียบมาตรฐานวัดการไหลมาตรฐานชนิด wet gas meter โดยที่ด้าน 1 ต่อเข้ากับเครื่องปรับเทียบมาตรฐานวัดการไหลมาตรฐาน ด้าน 2 ต่อเข้ากับ ball valve และต่อเข้ากับเครื่องดูดฝุ่น (vacuum cleaner) ดังแสดงในรูปที่ 3.11
2. เปิดเครื่องดูดฝุ่นจากนั้นปรับบอลวาล์ว โดยให้ระดับน้ำในมานอมิเตอร์มีระดับความสูงต่างกัน 1 cm จับเวลาจนเมื่อเข็มบนหน้าปัดของเครื่องปรับเทียบมาตรฐานวัดอัตราการไหลมาตรฐานหมุนครบ 3 รอบหรือ 30 L จับเวลา 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเวลาแล้วบันทึกผล
3. ปรับบอลวาล์วให้ระดับน้ำในมานอมิเตอร์มีความสูงเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 cm และทำการทดลองซ้ำจนกระทั่งได้ระดับความสูงของระดับน้ำต่างกัน 25 cm



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมการสอบเทียบอุปกรณ์วัดการไหล

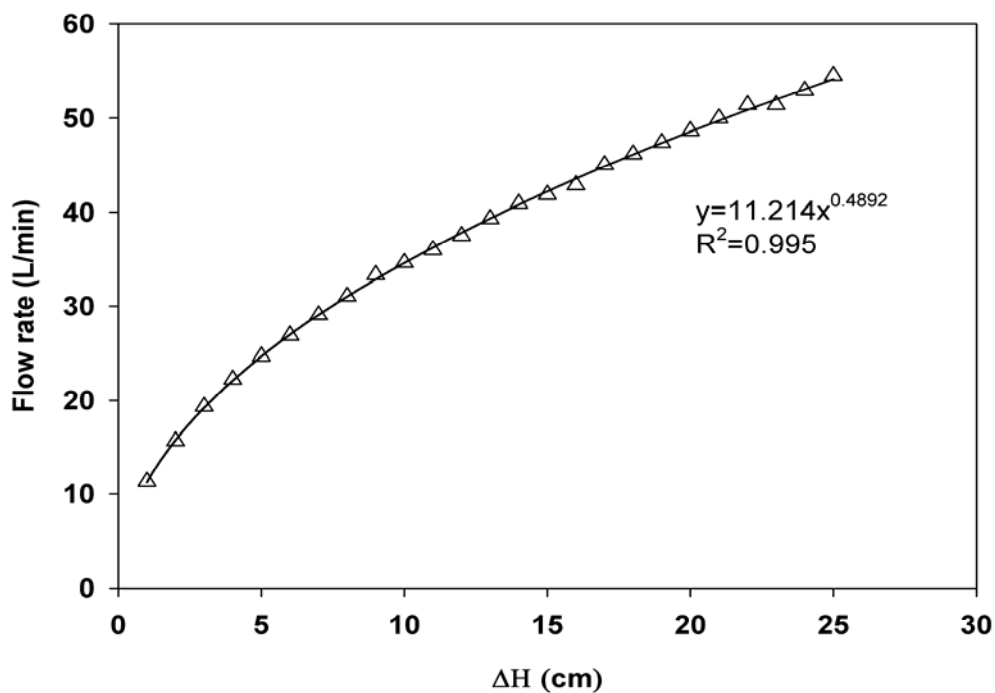
จากการสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลทั้ง 2 ตัว พบว่าอัตราการไหลแปรผันกับผลต่างความสูงของระดับน้ำดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Orifice 1:} \quad Q = 11.214H^{0.4892} \quad (3.6)$$

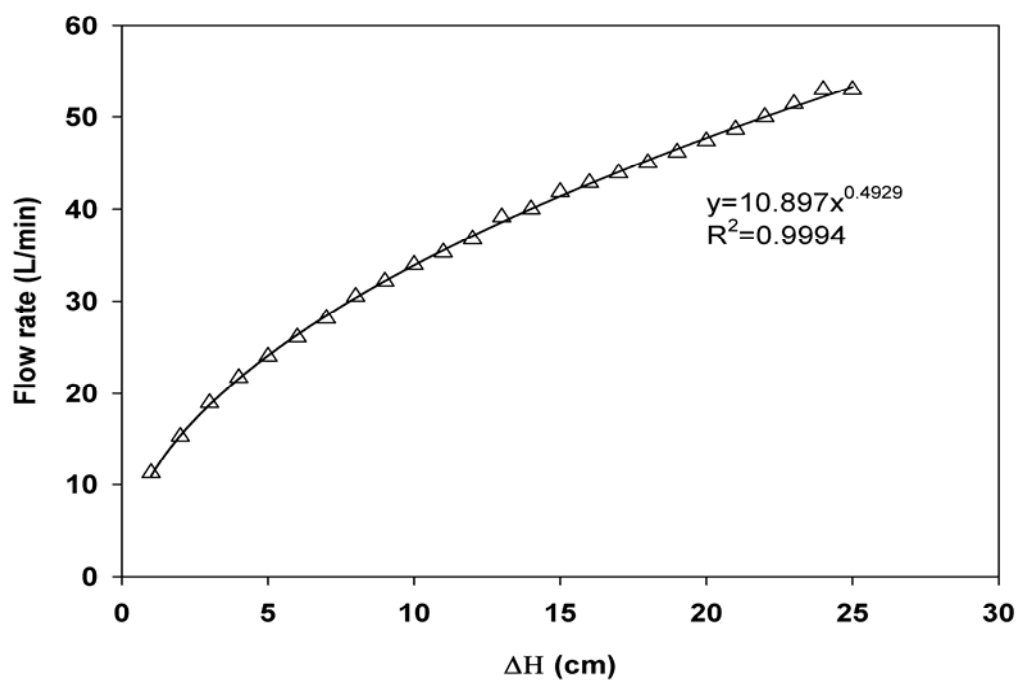
$$\text{Orifice 2:} \quad Q = 10.897H^{0.4929} \quad (3.7)$$

เมื่อ H คือผลต่างความสูงของระดับน้ำ (cm H_2O) และ Q คืออัตราการไหลของอากาศ (L/min)

กราฟระหว่างผลต่างความสูงของระดับน้ำกับอัตราการไหลของมาตรวัดอัตราการไหลมาตรฐาน แสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13 สำหรับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



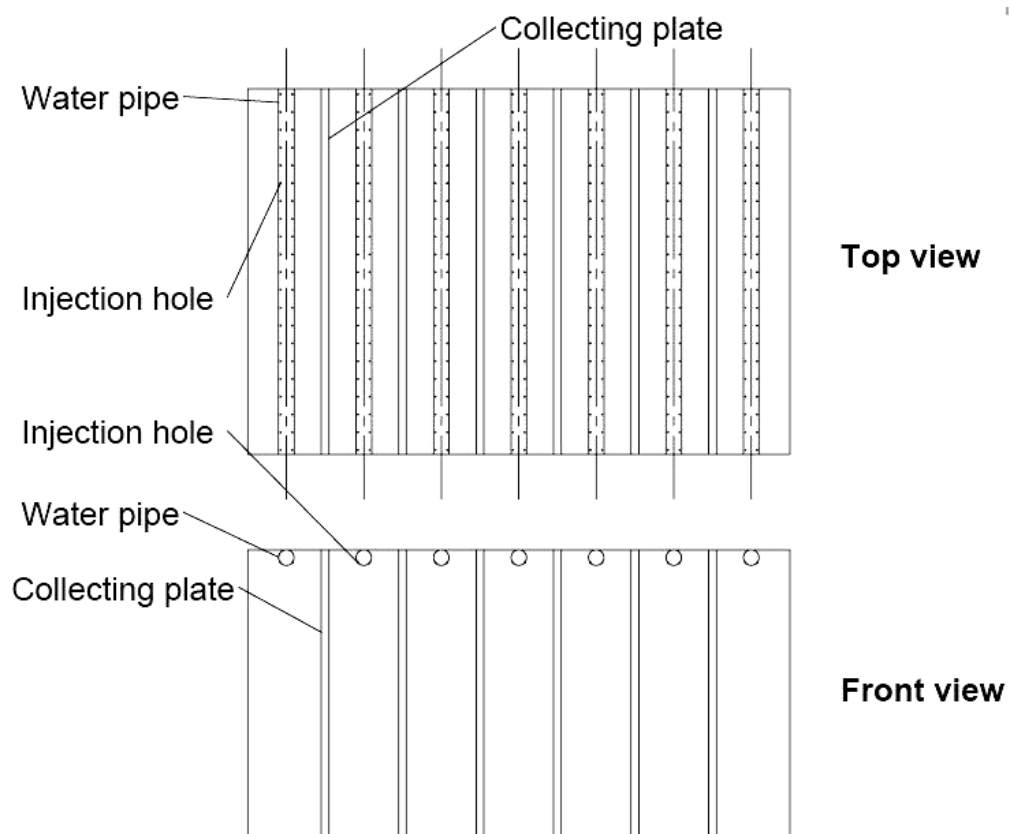
รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความสูงของระดับน้ำกับอัตราการไหลของมาตรวัดการไหลมาตรฐานของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลตัวที่ 1



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความสูงของระดับน้ำกับอัตราการไหลของมาตรวัดอัตราการไหลมาตรฐานของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลตัวที่ 2

3.2.4 ระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

ระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบแห้งดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยการใช้ น้ำฉีดบนขั้วแผ่นเรียบเพื่อทำความสะอาดอนุภาคเขม่าควันที่เกาะติดบนแผ่นเรียบ อุปกรณ์ระบบทำความสะอาดประกอบด้วยท่อ PVC ขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 16 ท่อ เจาะรูเฉียงขนาด 2 mm จำนวน 46 รู ต่อ 1 ท่อ เพื่อให้ฉีดน้ำล้างอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบและมีท่อสแตนเลสใหญ่ซึ่งเป็นท่อรวมท่อ PVC แต่ละท่อเอาไว้ การฉีดพ่นน้ำนั้นได้ใช้ปั๊มน้ำชนิดขนาด 0.5 hp อัตราการไหล 200 L/min มีเฮดเท่ากับ 10 m โดยภาพถ่ายของชุดทำความสะอาดแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 3.15 ระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

3.3 การทดลอง

3.3.1 เงื่อนไขการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ

เงื่อนไขการทดลองมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 เนื่องจากมีจุดมุ่งหมายให้ประสิทธิภาพในขณะเริ่มต้นการดักจับอนุภาคเขม่าสูงสุดเท่ากับ 93% ซึ่งได้ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบเท่ากับ 7.5 cm ระยะห่างระหว่างเส้นลวดเท่ากับ 8.5 cm มีจำนวนแผ่นเรียบ 10 แผ่น มีจำนวนเส้นลวดต่อ 1 แถว 15 เส้น เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดเท่ากับ 1 mm และได้เพิ่มเงื่อนไขการทดลองขึ้นมาอีก 3 เงื่อนไขการทดลองให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบแคบลง และระยะห่างระหว่างเส้นลวดน้อยลงโดยเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) เท่ากับ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) เท่ากับ 6.4 cm เพื่อต้องการให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานจริง ตัวแปรในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) (cm)	ระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) (cm)	จำนวนเส้นลวดต่อ 1 แถว	จำนวนแผ่นเรียบทั้งหมด
7.5	8.5	15	10
7.5	6.4	20	10
5	8.5	15	15
5	6.4	20	15

3.3.2 วิธีการทดลอง

1. การเตรียมแผ่นกระดาษกรอง นำกระดาษกรองเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น (อุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อนำกระดาษกรองออกจากตู้ควบคุมความชื้นทำการชั่งน้ำหนักของกระดาษกรองในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50 %

2. หาค่าความชื้นฐานแห้งไม้ยางพาราที่ใช้ในการเผาไหม้โดยการนำตัวอย่างไม้ยางพาราโดยตัดตามขวางของไม้ยางพาราความหนา 3 mm ชั่งน้ำหนักแล้วอบแห้งให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C โดยการชั่งน้ำหนักเป็นระยะ ๆ จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง นำน้ำหนักตัวอย่างไม้ยางพาราก่อนอบและหลังอบมาคำนวณหาความชื้นฐานแห้งจาก

$$\%MC (db) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3.8)$$

โดยที่ %MC (db) คือเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง m_1 คือน้ำหนักตัวอย่างไม้ยางพาราก่อนอบแห้งและ m_2 คือน้ำหนักตัวอย่างไม้ยางพาราหลังอบแห้ง

3. การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างในสถานะที่ไม่มีการฉีดน้ำทำความสะอาด

- นำกระดาษกรองต่อเข้ากับอุปกรณ์ยึดกระดาษกรองที่ชุดเก็บตัวอย่างของอนุภาคเขม่าควันที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องตตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต
- เผาไม้พินในเตาเผาในขณะเดียวกันจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 22 kV(DC) ให้กับเครื่องตตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตดังแสดงในรูปที่ 3.4 ติดตั้งเครื่องดูดฝุ่น (vacuum cleaner) เพื่อเก็บตัวอย่าง
 - ปล่อยให้อนุภาคเขม่าควันไหลผ่านเครื่องตตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยความเร็วประมาณ 0.2 m/s โดยไม่ได้ควบคุมความเร็วเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างโดยตั้งอัตราการไหลให้สอดคล้องกับการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคนetik (isokinetic sampling) (ศิริกัลยาและคณะ, 2542) คือการเก็บตัวอย่างที่ความเร็วของเขม่าควันในเครื่องตตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตต้องเท่ากับความเร็วในการเก็บตัวอย่าง จึงได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้การเก็บตัวอย่างที่มีอัตราการไหล 24 L/min (รายละเอียดการคำนวณการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคนetikดูในภาคผนวก ข.)
 - ปรับอัตราการไหลของเขม่าควันที่ไหลผ่านกระดาษกรองด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ 24 l/min ที่ทางเข้าและทางออกต้องมีอัตราการไหลเท่ากันในเวลาเดียวกันเป็นเวลา 15 นาที
 - ปิดป้อนสุญญากาศและนำกระดาษกรองออกจากอุปกรณ์ยึดกระดาษกรองเก็บตัวอย่างอนุภาคที่ติดบนกระดาษกรองในถุงป้องกันความชื้น และใช้เวลาอีก 15 นาทีในการเตรียมอุปกรณ์เพื่อเก็บตัวอย่างครั้งต่อไป
 - ทำการเก็บตัวอย่างซ้ำในขั้นตอนที่ 3.4 และ 3.5 จนครบจนครบ 5 ชั่วโมงเป็นจำนวน 10 ครั้งการเก็บตัวอย่าง
- การเก็บตัวอย่างในสถานะที่มีการฉีดน้ำทำความสะอาด
 - ทำเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.1-3.3 ของการเก็บตัวอย่างในสถานะที่ไม่มี การฉีดน้ำทำความสะอาด
 - ปรับอัตราการไหลของเขม่าควันที่ไหลผ่านกระดาษกรองด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ 24 l/min ที่ทางเข้าและทางออกต้องมีอัตราการไหลเท่ากันในเวลาเดียวกันเป็นเวลา 15 นาที
 - ปิดป้อนสุญญากาศและนำกระดาษกรองออกจากอุปกรณ์ยึดกระดาษกรองเก็บตัวอย่างอนุภาคที่ติดบนกระดาษกรองในถุงป้องกันความชื้น ปิดสวิทซ์ไฟฟ้าแล้วเปิดน้ำเพื่อฉีดทำความสะอาดทำความสะอาด (ฉีดน้ำทำความสะอาดทุก ๆ 1 ชั่วโมง) และในขณะเดียวกัน

เตรียมอุปกรณ์เพื่อเก็บตัวอย่างครั้งต่อไปในการเตรียมอุปกรณ์เพื่อเก็บตัวอย่างครั้งต่อไปใช้เวลาอีก 15 นาที

- ทำการเก็บตัวอย่างซ้ำในขั้นตอนที่ 4.2 และ 4.3 จนครบจนครบ 5 ชั่วโมงเป็นจำนวน 10 ครั้งการเก็บตัวอย่าง

4. นำกระดาษกรองที่มีตัวอย่างของอนุภาคเขม่าเกาะติดเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นในเงื่อนไขเดียวกับข้อ 1 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อนำกระดาษกรองออกจากตู้อบความชื้นทำการชั่งน้ำหนักของกระดาษกรองในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50%

5. คำนวณหาประสิทธิภาพในการดักเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเมื่อทราบมวลของกระดาษกรองก่อนการทดลองและมวลของกระดาษกรองหลังการทดลองโดยการคำนวณมวลของอนุภาคที่ได้จากการเก็บตัวอย่างหาได้จาก

$$M_{collect} = M_f - M_i \quad (3.9)$$

และคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลได้จาก

$$C = \frac{M_{collect}}{V} \quad (3.10)$$

โดยที่ M_f คือมวลของกระดาษกรองหลังการทดลอง (mg) M_i คือมวลของกระดาษกรองก่อนการทดลอง (mg) C_{dust} คือความเข้มข้นของอนุภาคเขม่า (mg/m^3) และ V คือปริมาตรที่ไหลผ่านกระดาษกรอง (m^3) หาได้จาก

$$V = Qt \quad (3.11)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลที่ผ่านกระดาษกรอง (m^3/sec) t คือเวลาในการเก็บตัวอย่าง (sec)

การคำนวณประสิทธิภาพในการดักเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคำนวณได้จาก

$$\eta = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (3.12)$$

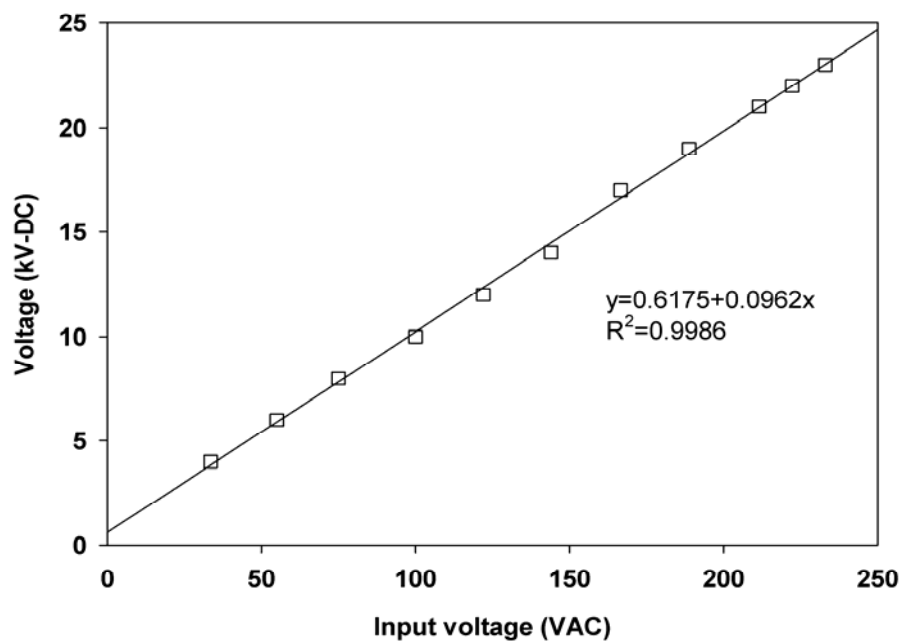
โดยที่ η คือประสิทธิภาพการดักเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (%)
 C_i คือความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าทางเข้าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต C_f คือความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการทดลองวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (Bridge Rectifier)

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบและวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จากการทดลองวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) โดยการให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งปรับค่าจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ (adjustable transformer) ต่อกับวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์และต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแรงดันสูง (high voltage dc meter) (KAISE, SK-520 VOM-C) ผลการทดลองเมื่อปรับให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้เริ่มต้นจาก 34 V(AC) จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 4 kV(DC) จนกระทั่งถึง 233 V(AC) จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 23 kV(DC) และแปรผันเป็นเส้นตรงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tantichaowan et al. (2005) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยที่วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ให้แรงดันไฟฟ้า 22 kV(DC) เมื่อแรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 220 V(AC) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (Bridge Rectifier)

4.2 ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค

จากการทำการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ เก็บตัวอย่างอนุภาคที่อัตราการไหล 24 L/min โดยเงื่อนไขการทดลองที่ปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) ซึ่งแต่ละเงื่อนไขทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ทุกเงื่อนไขการทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดที่ใช้เป็นขั้วโคโรนามีค่าคงที่เท่ากับ 1.0 mm จากการคำนวณการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์ (Chi-square probability distribution) ทำการทดสอบแบบความเป็นเอกภาพ (test of homogeneity) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข.) โดยตั้งสมมติฐานว่า ประสิทธิภาพจากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้งเหมือนกัน (H_0) และประสิทธิภาพจากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้งไม่เหมือนกัน (H_1) เปรียบเทียบกับการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ที่องศาอิสระ (df) เท่ากับ 9 ซึ่งมีค่าวิกฤติจากตารางไคสแควร์ ($\chi^2_{Critical}$) เท่ากับ 16.9 ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าวิกฤติจากตารางไคสแควร์มีค่ามากกว่าค่าจากการคำนวณไคสแควร์ (χ^2) ทุกเงื่อนไขการทดลอง แสดงว่าค่าจากการคำนวณไคสแควร์แต่ละเงื่อนไขเป็นไปตามสมมติฐาน ประสิทธิภาพจากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้งเหมือนกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลของแต่ละเงื่อนไขการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขในการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบและค่าจากการคำนวณไคสแควร์

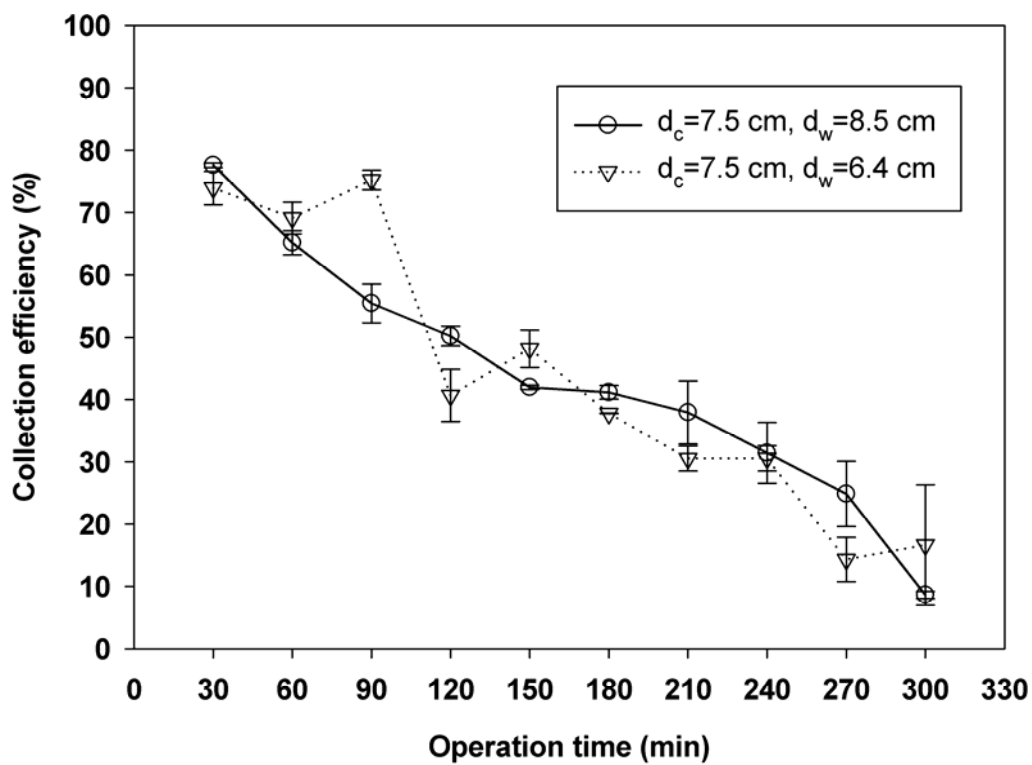
ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) (cm)	ระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) (cm)	การคำนวณไคสแควร์ (χ^2)
7.5	8.5	2.85
7.5	6.4	7.42
5	8.5	1.44
5	6.4	1.62

4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างเส้นลวด (ขั้วโคโรนาจ่ายประจุ)

จากผลการทดลองโดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) มีค่าคงที่เท่ากับ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) เท่ากับ 8.5 และ 6.4 cm มีช่วงความเชื่อมั่น พบว่าประสิทธิภาพการดักจับเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งระยะห่างระหว่างเส้นลวดเท่ากับ 8.5 และ 6.4 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เนื่องจากอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมีพฤติกรรมเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นมีผลต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วเก็บประจุและขั้วจ่ายประจุที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และสังเกตเห็นว่าประสิทธิภาพในทุกช่วงเวลาทั้ง 2 การทดลองใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นผลของระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่แตกต่างกันระหว่าง 8.5 และ 6.4 cm มีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่ลดลงนั้นแสดงให้เห็นถึงจำนวนเส้นลวดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละแถวเสมือนกับว่าเป็นการเพิ่มกระแสโคโรนาแต่การเพิ่มกระแสโคโรนานั้นยังจำกัดด้วยพื้นที่การเกาะติดบนขั้วเก็บประจุที่ยังมีเท่าเดิมจึงทำให้ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงมาก จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm ระยะเวลาผ่านไป 30 นาทีแรกประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 77.6% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณอนุภาคเขม่าควันที่เกาะติดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเวลา 300 นาที ประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 8.65% ซึ่งแถบผิดพลาดแนวแกน y แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

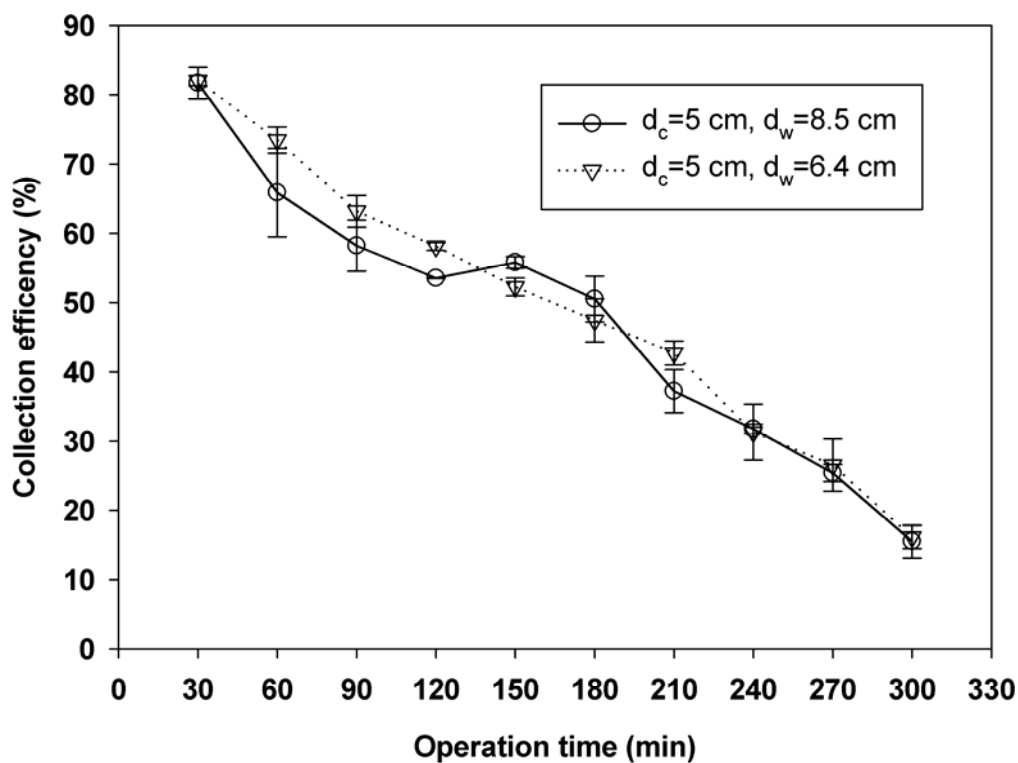
จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm ระยะเวลาผ่านไป 30 และ 60 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 73.9% และ 69.1% ตามลำดับ แต่ในช่วงเวลา 90, 120 และ 150 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 75.2%, 40.7% และ 48.2% ตามลำดับ สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเนื่องจากในการทดลองไม่สามารถควบคุมความเร็วและปริมาณอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ และหลังจากช่วงเวลา 150 นาที ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึง 300 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 9.7%



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) 8.5 และ 6.4 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน

ผลการทดลองโดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) เท่ากับ 8.5 และ 6.4 cm ประสิทธิภาพการดักจับเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น และผลของระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่แตกต่างกันเหมือนกับในกรณีของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) เท่ากับ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) เท่ากับ 8.5 และ 6.4 cm ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.3 จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm ขณะเวลาผ่านไป 30 นาทีแรกประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 81.7% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณอนุภาคเขม่าควันที่เกาะติดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 300 นาที ประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 15.5% ซึ่งแถบผิดพลาดแนวแกน y แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.3 จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm ขณะเวลาผ่านไป 30 นาทีแรกประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 82.1% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง

ตามปริมาณอนุภาคเขม่าควันที่เกาะติดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 300 นาที ประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 16.1%



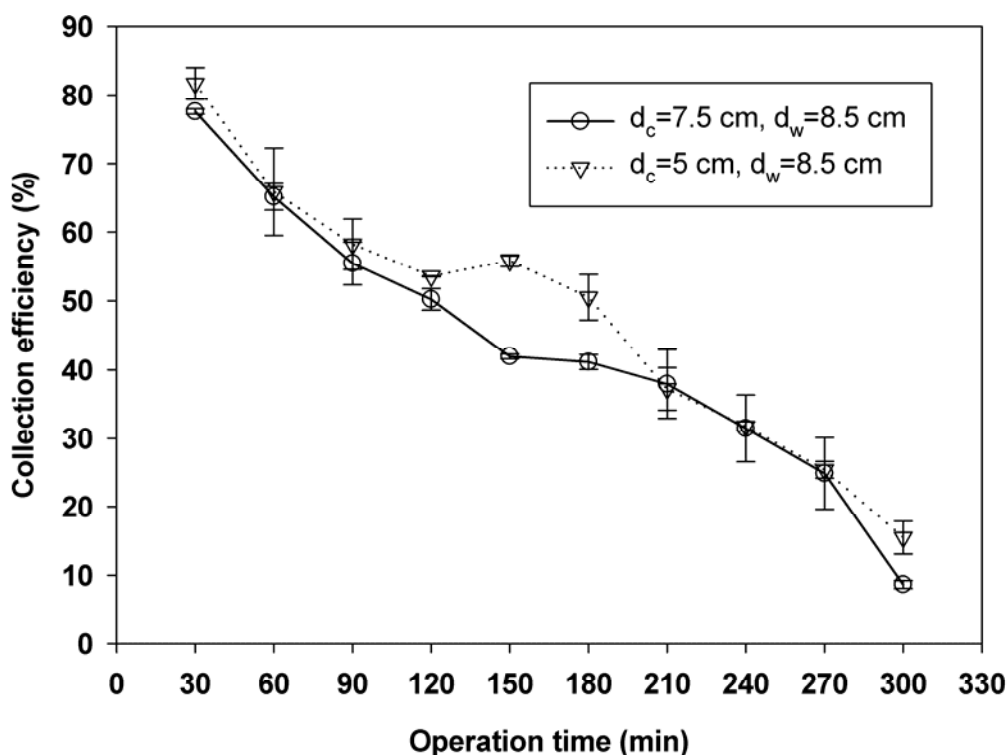
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) 8.5 และ 6.4 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน

4.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (जूँเก็บประจุ)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองโดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) เท่ากับ 7.5 และ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) มีค่าคงที่เท่ากับ 8.5 ประสิทธิภาพการดักจับเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบเท่ากับ 7.5 และ 5 cm เนื่องจากอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมีพฤติกรรมเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นมีผลต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างजूँเก็บประจุและजूँจ่ายประจุที่ลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4 และสังเกตเห็นว่าประสิทธิภาพในทุกช่วงเวลาที่ทั้ง 2 การทดลองจะแตกต่างกันซึ่งการทดลองที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบซึ่งระยะห่างเท่ากับ 5 cm มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm ในช่วง 3 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเมื่อ

อนุภาคเกาะติดเต็มพื้นที่ขั้วเก็บประจุประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่แตกต่างกันระหว่าง 7.5 และ 5 cm มีผลต่อประสิทธิภาพเนื่องจากระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่ลดลงนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบน้อยลง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4

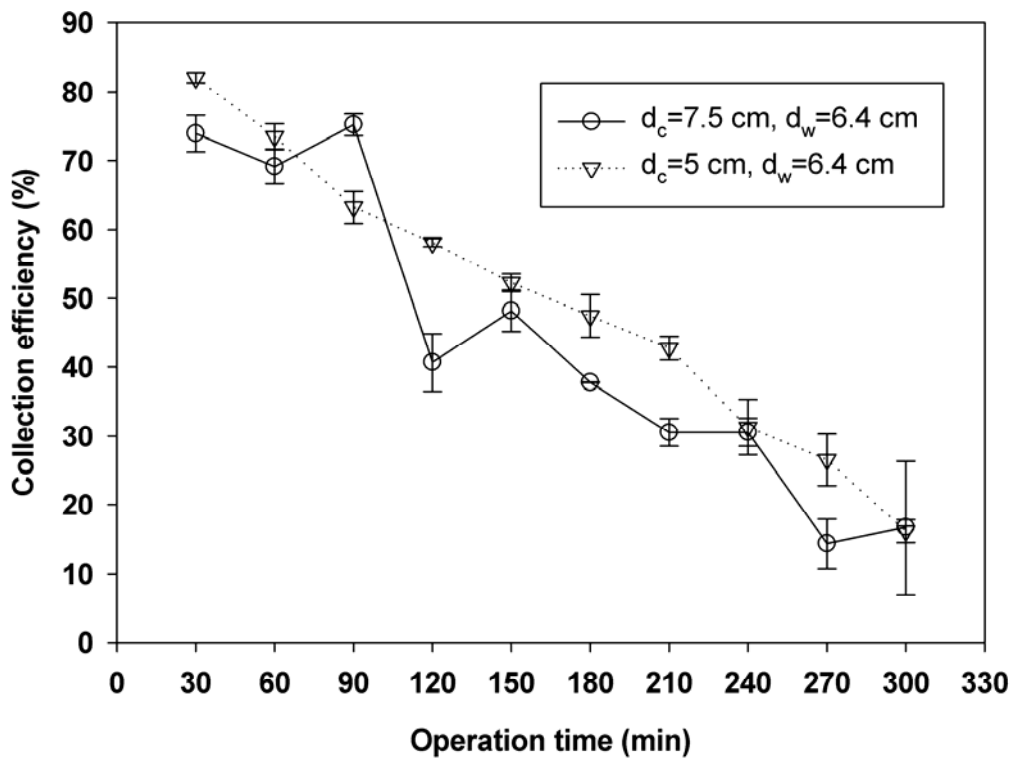
จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm ขณะเวลาผ่านไป 30 นาทีแรกประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 77.6% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณอนุภาคเข้ามาวันที่เกาะติดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 300 นาที ประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 8.7% ซึ่งแถบผิดพลาดแนวแกน y แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4 จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm ขณะเวลาผ่านไป 30 นาทีแรกประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 81.7% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณอนุภาคเข้ามาวันที่เกาะติดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 300 นาที ประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 15.5%



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) 7.5 และ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) 8.5 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเข้ามาวัน

ผลการทดลองโดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) เท่ากับ 7.5 และ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) มีค่าคงที่เท่ากับ 6.4 ประสิทธิภาพการดักจับเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคที่สะสมบนขั้วเก็บประจุเช่นเดียวกับกรณีที่แล้ว และระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพเนื่องจากระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่ลดลงนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะไม่คงที่ของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.5

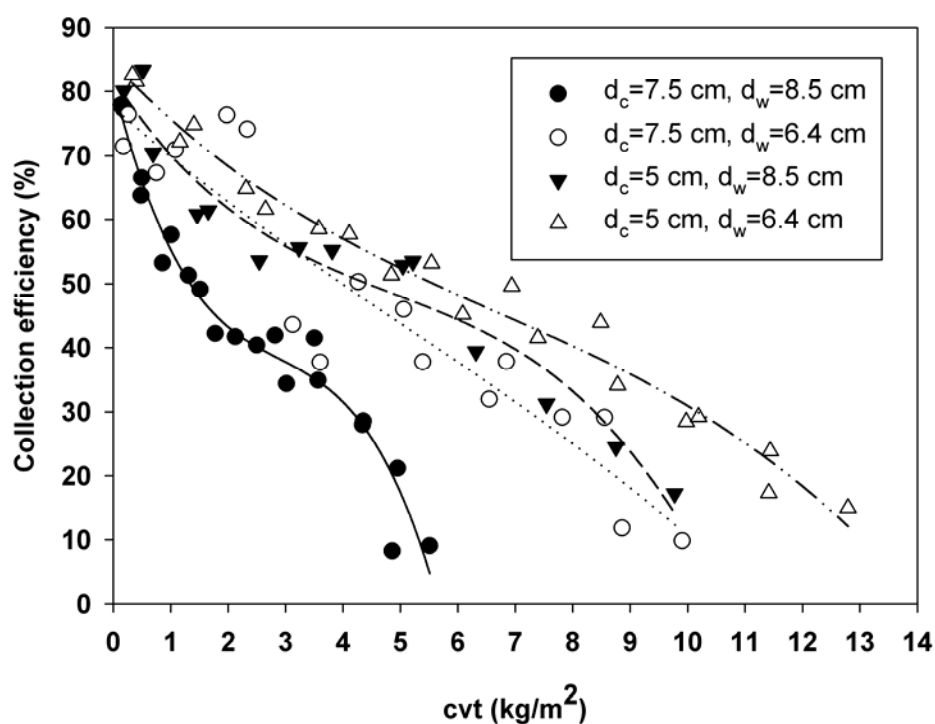
จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm ระยะเวลาผ่านไป 30 และ 60 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 73.9% และ 69.1% ตามลำดับ แต่ในช่วงเวลา 90, 120 และ 150 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 75.2%, 40.7% และ 48.2% ตามลำดับ สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและลดลงไม่คงที่เนื่องจากการทดลองไม่สามารถควบคุมความเร็วและปริมาณอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ และหลังจากช่วงเวลา 150 นาที ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึง 300 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 9.7% ซึ่งแถบผิดพลาดแนวแกน y แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.5 จากการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm ระยะเวลาผ่านไป 30 นาทีแรกประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 82.1% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณอนุภาคเขม่าควันที่เกาะติดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 300 นาที ประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 16.1%



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองประสิทธิภาพระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) 7.5 และ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) 6.4 cm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดักจับเขม่าควัน

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (cvt) โดยที่ c คือความเข้มข้นของอนุภาค v คือความเร็วของอนุภาคที่ไหลผ่านอุปกรณ์การเกาะติดและ t คือเวลาในการเกาะติด จากทดลอง 5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการเกาะติดมากที่สุดในช่วงเวลาเริ่มต้น ประสิทธิภาพการเกาะติดลดลงตามน้ำหนักอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบและเส้นลวดมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบและเส้นลวดที่มีพฤติกรรมเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นมีผลต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ในกรณีของระยะห่างระหว่างเส้นลวดคงที่แต่เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ ประสิทธิภาพการดักจับจะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบลดลง ในกรณีของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบคงที่แต่เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเส้นลวด ประสิทธิภาพการดักจับจะไม่แตกต่างกันมากเมื่อระยะห่างระหว่างเส้นลวดลดลง สามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่น้อยลงจะมีผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่น้อยลง จากการทดลองระยะที่น้อยที่สุด

ของแผ่นเรียบ (5 cm) และเส้นลวด (6.4 cm) จะให้ประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุดแต่ประสิทธิภาพลดลงจากประมาณ 83 % ถึง 70 % เมื่อ cvt มีค่าประมาณ 2 kg/m^2 ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง เพื่อที่จะให้เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมจริงจึงได้มีการออกแบบระบบการทำความสะอาดในทุกๆ 1 ชั่วโมงเพื่อที่จะให้ได้ประสิทธิภาพที่พอเพียงสำหรับดักจับอนุภาคโดยเลือกเงื่อนไขการทดลองระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดทองแดง 6.4 cm เป็นต้นแบบ

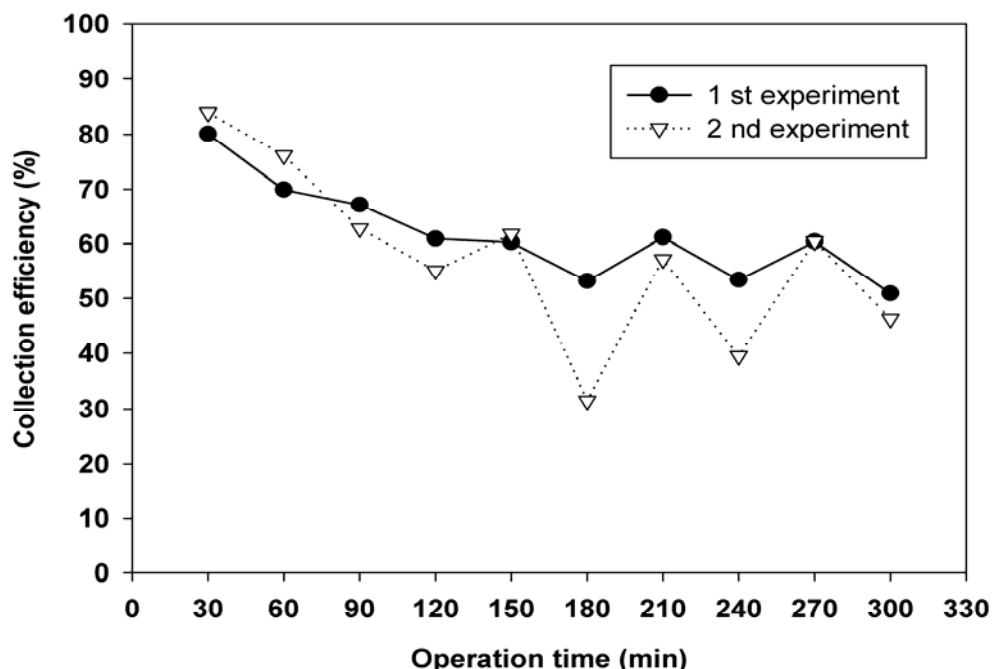


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับ cvt

4.3 ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค

จากการทดลองการทำความสะอาด โดยการฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นเรียบเลือกเงื่อนไขการทดลองที่ 4 ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดทองแดง 6.4 cm ทำความสะอาดทุกๆ 60 นาที ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.7 การทดลองในช่วง 60 และ 120 นาที โดยการฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นเรียบและเส้นลวดไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ทั้ง 2 ครั้งการทดลอง เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 82%

จนกระทั่งถึง 120 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 58% เนื่องจากการเผาไหม้ไม้พินตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึง 120 นาที มีน้ำมันจากการเผาไหม้ยางพารา (tar) เกาะติดบนแผ่นเรียบและเส้นลวดซึ่งการฉีดน้ำเพื่อทำความสะอาดไม่สามารถกำจัดยางพาราได้ การกำจัดน้ำมันจากไม้ยางพาราที่เกาะติดบนแผ่นเรียบจะต้องใช้ผงซักฟอกและขัดถูด้วยแปรงลวดแต่ละระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบน้อยมาก จึงควรออกแบบให้สามารถถอดแผ่นเรียบออกจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้ เพื่อสะดวกในการทำความสะอาด การทำความสะอาดในช่วง 180 และ 240 นาที โดยการฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นเรียบและเส้นลวดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ทั้ง 2 ครั้งการทดลอง เนื่องจากปริมาณน้ำมันจากไม้ยางพาราลดลงการทำความสะอาดโดยการฉีดน้ำสามารถกำจัดอนุภาคเขม่าควันที่เกาะติดบนแผ่นเรียบและเส้นลวดได้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมีค่าเฉลี่ย 60.2% หลังจากทำความสะอาดแผ่นเรียบและเส้นลวด ในช่วงเวลา 150 ถึง 300 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7 การทดลอง 2 ครั้ง ประสิทธิภาพลดลงจากการเกาะติดของอนุภาคเขม่าควันที่เพิ่มขึ้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฉพาะในช่วงเวลา 180 นาที เนื่องจากในการทดลองไม่สามารถควบคุมความเร็วและปริมาณอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไหม้ แต่เมื่อทำความสะอาดแล้วประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะสามารถล้างคราบเขม่าออกในปริมาณที่ใกล้เคียงกันดังนั้น โดยสรุปประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของอุปกรณ์นี้สามารถควบคุมให้มีค่าประสิทธิภาพประมาณ 60.2%



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองประสิทธิภาพระบบทำความสะอาดระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดทองแดง 6.4 cm เทียบกับเวลา

จากการทดลองเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 22 kV(DC) ให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ยังไม่ติดตั้งระบบทำความสะอาด ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่ลดลงมีผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแต่ผลของระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่ลดลงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ และที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดทองแดง 6.4 cm มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 4 เงื่อนไขการทดลอง เมื่อนำเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ติดตั้งระบบทำความสะอาดที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดทองแดง 6.4 cm ในช่วงเวลา 120 นาทีแรกนั้นไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้แต่ช่วงเวลาหลังจากนั้นจนกระทั่งถึง 300 นาที สามารถควบคุมให้มีค่าประสิทธิภาพประมาณ 60.2 % ซึ่งสามารถนำไปใช้ในโรงรมควันยางแผ่นของเกษตรกรเนื่องจากการลงทุนที่ต่ำ และสามารถลดมลภาวะได้ถึง 60.2% สำหรับต้นทุนคงที่ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบเท่ากับ 37,000 บาท (ไม่รวมค่าเสื่อมราคาและค่าดอกเบี้ย) ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.7 kW-h สำหรับวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ซึ่งต่อกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตวัดค่าโดยใช้ digital power meter (Fluke, Model 39) และน้ำประปา 0.6 m³/h (อัตราค่าไฟฟ้า 5 Baht/kW-h และ อัตราค่าน้ำประปา 12 Baht/m³) คิดเป็นค่าใช้จ่ายแปรผันต่อเดือนเมื่อแต่ละวันใช้งาน 10 ชั่วโมง เท่ากับ 2,310 Baht/month

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผล

การทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ 4 เงื่อนไขโดยแต่ละเงื่อนไขทำการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้ง ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 22 kV(DC) จากวงจรวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) และเก็บตัวอย่างด้วยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 24 L/min เพื่อคำนวณประสิทธิภาพ ผลปรากฏว่าทุกเงื่อนไขการทดลองประสิทธิภาพการเกาะติดมากที่สุดในช่วงเวลาเริ่มต้น ประสิทธิภาพการเกาะติดลดลงตามน้ำหนักอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบที่มีพฤติกรรมเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นมีผลต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ในกรณีของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) มีค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) ประสิทธิภาพการดักจับจะไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเส้นลวดเป็นการเพิ่มหรือลดจำนวนเส้นลวดดังนั้นเสมือนกับการเพิ่มหรือลดกระแสโคโรนาแต่การเพิ่มหรือลดกระแสโคโรนานั้นยังจำกัดด้วยพื้นที่การเกาะติดบนขั้วเก็บประจุที่ยังมีเท่าเดิมจึงทำให้ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงมาก ในกรณีของระยะห่างระหว่างเส้นลวด (d_w) มีค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ (d_c) ประสิทธิภาพการดักจับจะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อลดจากระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบที่ลดลงนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบน้อยลง จากการทดลองระยะที่น้อยที่สุดของแผ่นเรียบ (5 cm) และเส้นลวด (6.4 cm) จะให้ประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 83% ในช่วงเวลาเริ่มต้น

จากการทดลองประสิทธิภาพการเกาะติดลดลงตามปริมาณอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมาก เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงจึงออกแบบและสร้างระบบทำความสะอาดโดยการฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นเรียบในทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำการทดลอง 2 ครั้ง โดยเลือกเงื่อนไขระยะที่น้อยที่สุดของแผ่นเรียบ (5 cm) และเส้นลวด (6.4 cm) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพมากที่สุด ผลปรากฏว่าในช่วงเวลา 30 ถึง 120 นาทีไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดได้เนื่องจากมียาง

จากการเผาไม้ยางพารา (tar) เกาะติดบนแผ่นเรียบซึ่งการฉีดน้ำเพื่อทำความสะอาดไม่สามารถกำจัด
 ยาง

จากไม้ยางพาราได้ แต่ในช่วงเวลาหลังจาก 150 นาทีเป็นต้นไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการ
 เกาะติดได้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 60.2% ต้นทุนในการสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต
 ชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบประมาณ 37,000 บาท ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.7 kW-h สำหรับวงจรเรียงกระแส
 ชนิดบริดจ์ซึ่งต่อกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต และน้ำประปา 0.6 m³/h คิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อ
 เดือนเมื่อแต่ละวันใช้งาน 10 ชั่วโมง เท่ากับ 2,310 Baht/month

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่น
 เรียบโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงรมควันยางพาราเพื่อลดปริมาณอนุภาคเขม่าควัน
 ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคนงานแต่อย่างไรก็ตามอนุภาคเขม่าควันบางส่วนก็ยังมี
 ก็ยังมีความจำเป็นเพื่อไปเกาะติดบนแผ่นยางพาราเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ดังนั้นการทดลองบาง
 ตัวแปร เช่น ความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่าน แรงดันไฟฟ้า ขนาดอนุภาคที่เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า
 สถิตสามารถดักจับได้ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะมีผลกับประสิทธิภาพยังไม่ได้ทำการทดลองใน
 งานวิจัยนี้ เพื่อที่ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจึงควรที่จะศึกษาตัว
 แปรดังกล่าวด้วย

สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบหลังจากมี
 การทำความสะอาดโดยการฉีดน้ำประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 60.2% ในช่วงเวลา 150 นาทีเป็นต้นไป
 เนื่องจากในช่วงเวลาเริ่มต้นมีน้ำมันจากไม้ยางพารา (tar) เกาะติดบนแผ่นเรียบทำให้ประสิทธิภาพ
 การดักจับอนุภาคลดลงและไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการฉีดน้ำทำความสะอาดจึงจำเป็นต้องออกแบบให้
 สามารถถอดแผ่นเรียบออกจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้เพื่อสะดวกในการจัดทำความสะอาด

เอกสารอ้างอิง

- นฤบดี ศรีสังข์, จรัสชัย เย็นพยับ, พีระพงษ์ ทิมสกุล และวชร กาลาสีม, 2549, “ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องดักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ 2 ผลกระทบของความต่างศักย์”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 จังหวัดนครราชสีมา.
- พานิช อินต๊ะ, 2548, “เครื่องดักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการควบคุมมลภาวะทางอากาศจากอุตสาหกรรม”, เทคนิค เครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 252, หน้า 109-122.
- พานิช อินต๊ะ และณัฐวุฒิ คุชฎี, 2550, “วิธีการทำนายประสิทธิภาพการดักตะกอนรวมของเครื่องดักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย - แผ่นสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวล”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 จังหวัดชลบุรี, หน้า 152-158.
- เพ็ญริรัตน์ อัครผลสุวรรณ, 2550, “พลังงานชีวมวล...จากวัสดุเหลือใช้”, กลุ่มพัฒนาเทคโนโลยีการเผยแพร่ สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร, ปีที่ 3, ฉบับที่ 7, หน้า 2.
- ภูริทัต จองเดิม และอนันต์ เครือทอง, 2550, “การพัฒนาระบบให้ความร้อนสำหรับการรมควันแผ่นยาง”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ME 31/2549
- วชร กาลาสี, นฤบดี ศรีสังข์, ภัทร สุพพัตกุล และพีระพงษ์ ทิมสกุล, 2549, “ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องดักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ 1 อนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้ง”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 จังหวัดนครราชสีมา.
- วงกต วงศ์อภัย, 2547, “ชีวมวลอีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานไทย”, มติชนสุดสัปดาห์, ปีที่ 24, ฉบับที่ 1238, หน้า 31.
- วงพันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอต, 2543, “การควบคุมมลสาร”, ใน มลภาวะอากาศ, พิมพ์ครั้งที่ 6, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 213.
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, ชิกาโอะ คานาโอกะ และจุฑามาศ เกตุทัต, 2542, “การเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคนดิก”, ใน มลภาวะอากาศ, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 96.

- Bai, Y., Furuuchi, M., Tekasakul, P., Tekasakul, S., Choosong, T., Aizawa, M., Hata, M. and Otani, Y., 2007, "Application of Soft X-Rays in The Decomposition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Smoke Particles from Biomass Fuel Burning", *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 7, pp. 79-94.
- Chomanee, J., Tekasakul, S., Tekasakul, P., Furuuchi, M. and Otani, Y., 2009, "Effects of Moisture Content and Burning Period on Concentration of Smoke Particles and Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Rubber-Wood Combustion", *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 9, pp. 404-411.
- Fang, G.C., Chang K.F., Lu C., Bai C., 2004, "Estimation of PAHs dry deposition and BaP toxic equivalency factors (TEFs) study at Urban, Industry Park and rural sampling sites in central Taiwan, Taichung", *Chemosphere* vol. 55, pp. 787-796
- Furuuchi, M., Tekasakul, P., Murase, T., Otani, Y., Tekasakul, S. and Bai, Y., 2006, "Characteristics of Particulates Emitted from Rubber-Wood Burning", *Journal of Ecotechnology Research*, Vol. 12, pp. 135-139.
- Hedberg, E., Kristensson, A., Ohlsson, C., Johnsson, P., Swietlicki, E., Vesely, V., Wideqvist, U. and Westerholm, R., 2002, "Chemical and Physical Characterization of Emission from Birch Wood Combustion in a Wood Stove", *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 4823-4837.
- Hinds, W.C., 1999, "Charging Mechanisms", in *Aerosol Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, pp. 323-326.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), 1982, *Monographs, the rubber Industry* 28.
- Jerzy, M., Kocik M., Dekowski, J., Dors, M., Podlinski J., Ohkubo, T., Kanazawa, S. and Kawasaki, T., 2001, "Measurements of the Velocity Field of the Fuel Gas Flow in an Electrostatic Precipitator Model Using PIV Method", *Journal of Electrostatics*, Vol. 51-52, pp. 272-277.
- Kalasee, W., Tekasakul, S., Otani, Y. and Tekasakul, P., 2003, "Characteristic of Soot Particles Produced from Rubber-Wood Combustion", *Proceeding of the 2nd Asian Particle Technol. Penang, Malaysia*, pp. 103-108.
- Kalasee, W., 2009, "Improvement Soot Particles Separation Equipments for Rubber Smoking Chamber", *Aerosol and Air Quality Research*, pp. 333-341.

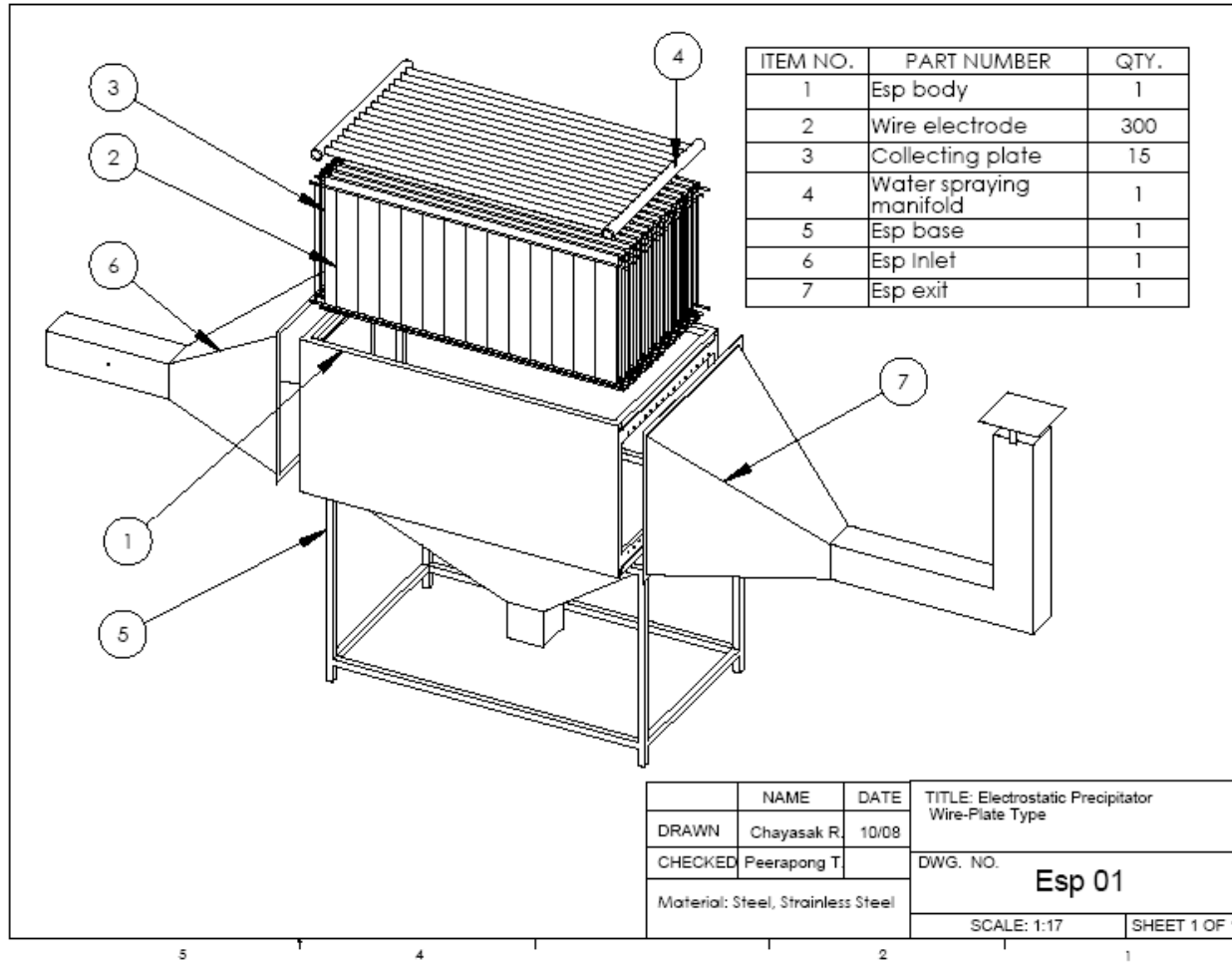
- Kim, S.H. and Lee, K-W., 1999, "Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models", *Journal of Electrostatics*, Vol. 48, pp. 3-25.
- Kocik, M., Dekowski, J. and Jerzy M., 2005, "Particle Precipitation Efficiency in an Electrostatic Precipitator", *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, pp. 761–766.
- Nóbrega, S.W., Falaguasta, M.C.R. and Coury, J-R., 2004, "a Study of Wire-Plate Electrostatic Precipitator Operating in the Removal of Polydispersed Particles", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2, pp. 275 – 284.
- Podlinski, J., Dekowska, J., Mizeraczyka, J., Brocilob, D. and Changb J., 2006, "Electrohydrodynamic Gas Flow in a Positive Polarity Wire-Plate Electrostatic Precipitator and the Related Dust Particle Collection Efficiency", *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, pp. 259–262.
- Saez, F., Cabanas, A., Gonzalez, A., Murillo, J.M., Martinez, J.M., Rodriguez, J.J. and Dorronsoró, J.L., 2003, "Cascade Impactor Sampling to Measure Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Biomass Combustion Processes", *Biosystems Engineering*, Vol. 86, pp. 103-111.
- Tantichaowan, M., Tekasakul, S., Otani, Y., Kuruhongsa, P. and Tekasakul, P., 2006, "Removal of Soot Particles in Rubber Smoking Chamber by Electrostatic Precipitator to Improve Rubber Sheet Color", *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 6, pp. 1-14.
- Tekasakul, P., Furuuchi, M., Tekasakul, S., Chomanee, J. and Otani, Y., 2008, "Characteristics of PAHs in Particulates in Atmospheric Environment of the City of Hat Yai, Thailand and Relation with Rubber-Wood Burning in Rubber Sheet Production," *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 8(3), pp. 265-278.
- Venkataraman, C., Thomas, S. and Kullkarni, P., 1999, "Size Distributions of Polycyclic Hydrocarbons-gas/particle Partitioning to Urban Aerosols", *Aerosol Science*, Vol. 30 pp. 759-770.
- White, H. J., 1963, "Industrial Electrostatic Precipitation", in Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, pp 3-4 – 3-5

- Zukeran, A., Chang, J.S., Berezin, A.A. and Ito, T., 1997, “Control of ultrafine particles from incense smoke by air cleaning electrostatic precipitators”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 28, pp. 289-290.
- Zhang, X., Wang, L. and Zhu K., 2005 “Particle Tracking and Particle-Wall Collision in a Wire-Plate Electrostatic Precipitator”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, pp. 1057–1071.
- Zhang, X., Wang L. and Zhu K., “a Simple Criterion for Particle-Wall Adhesion in a Wire-Plate Electrostatic Precipitator”, *Aerosol Science*, vol. 36, pp. 411–417.

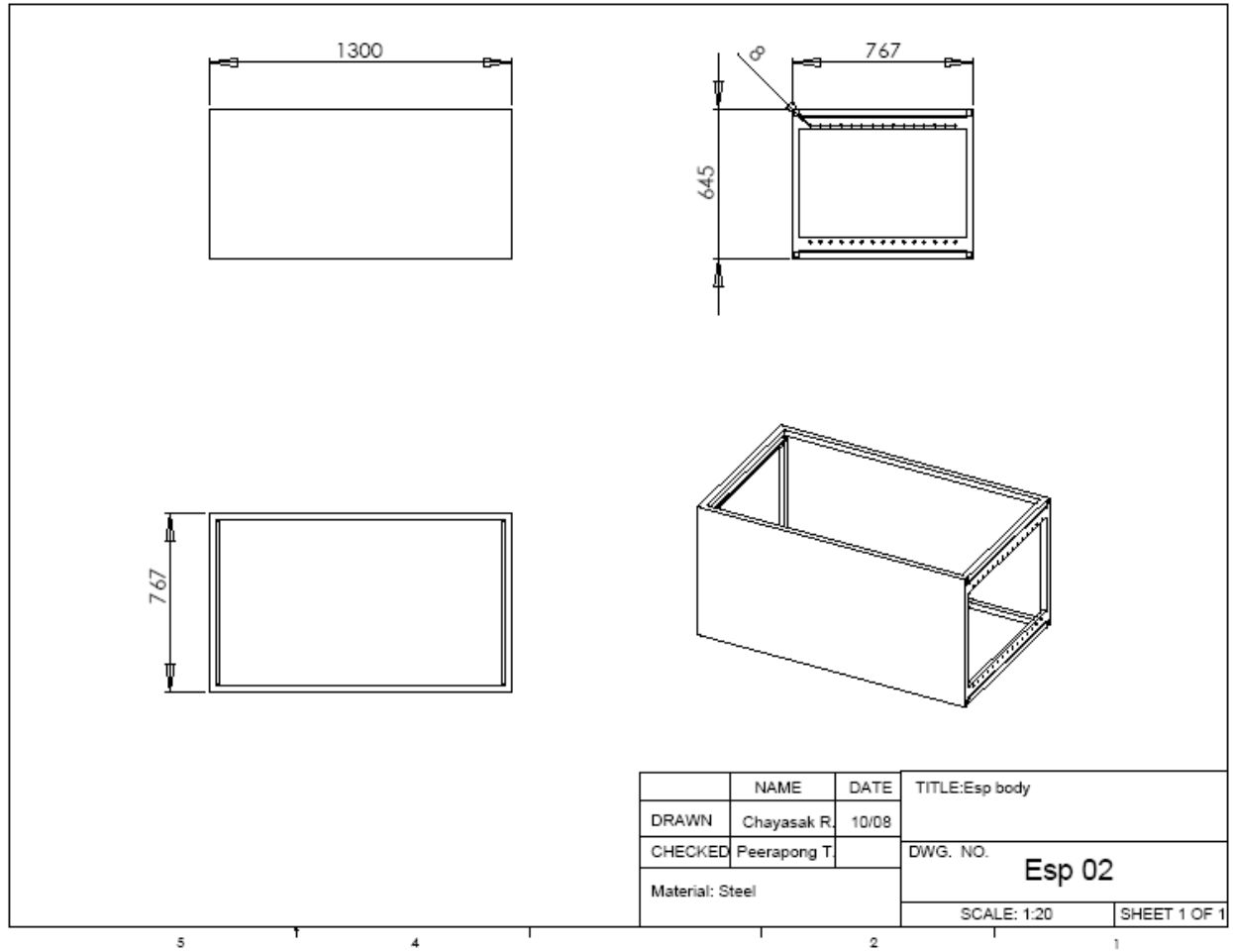
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

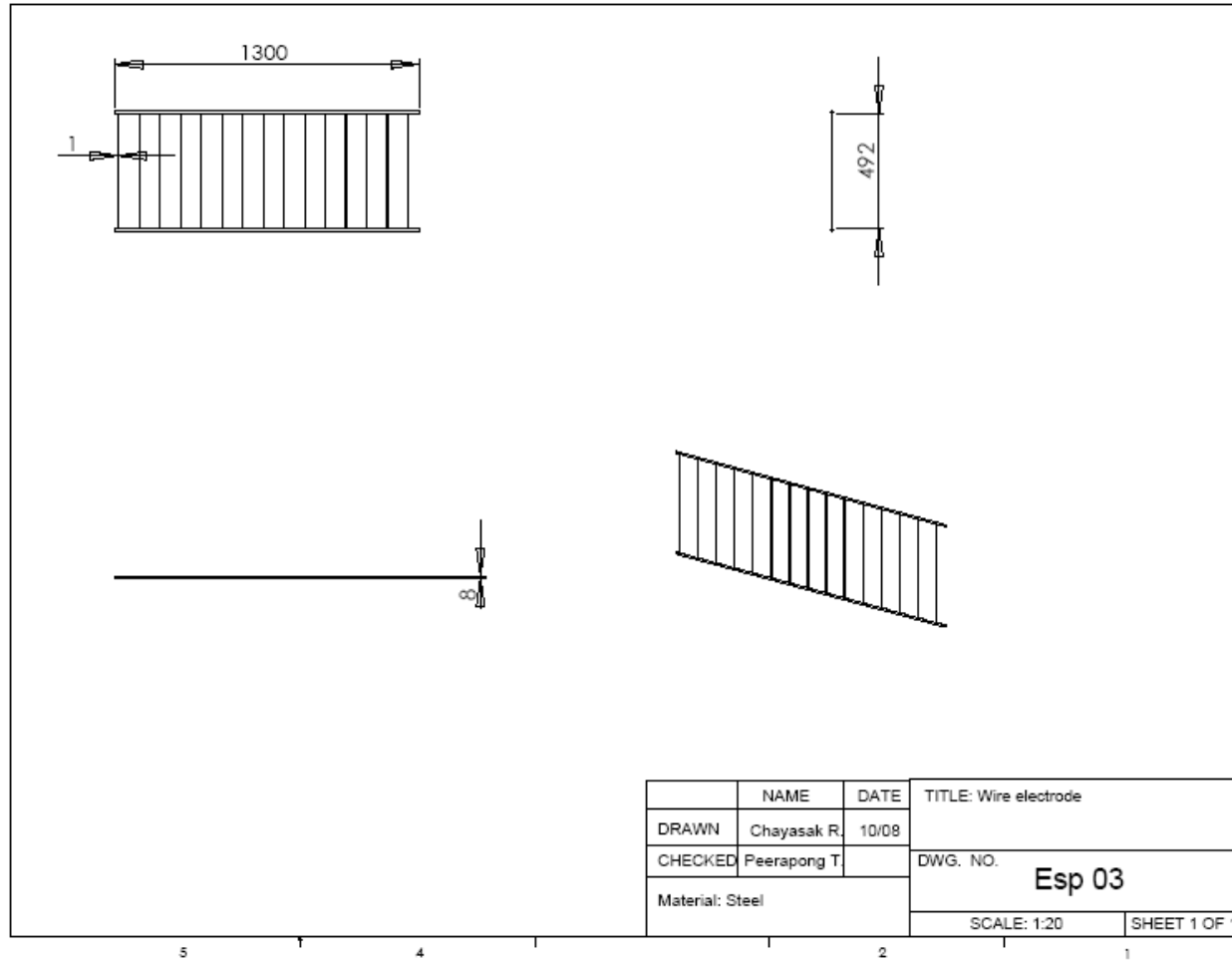
แบบของส่วนประกอบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ



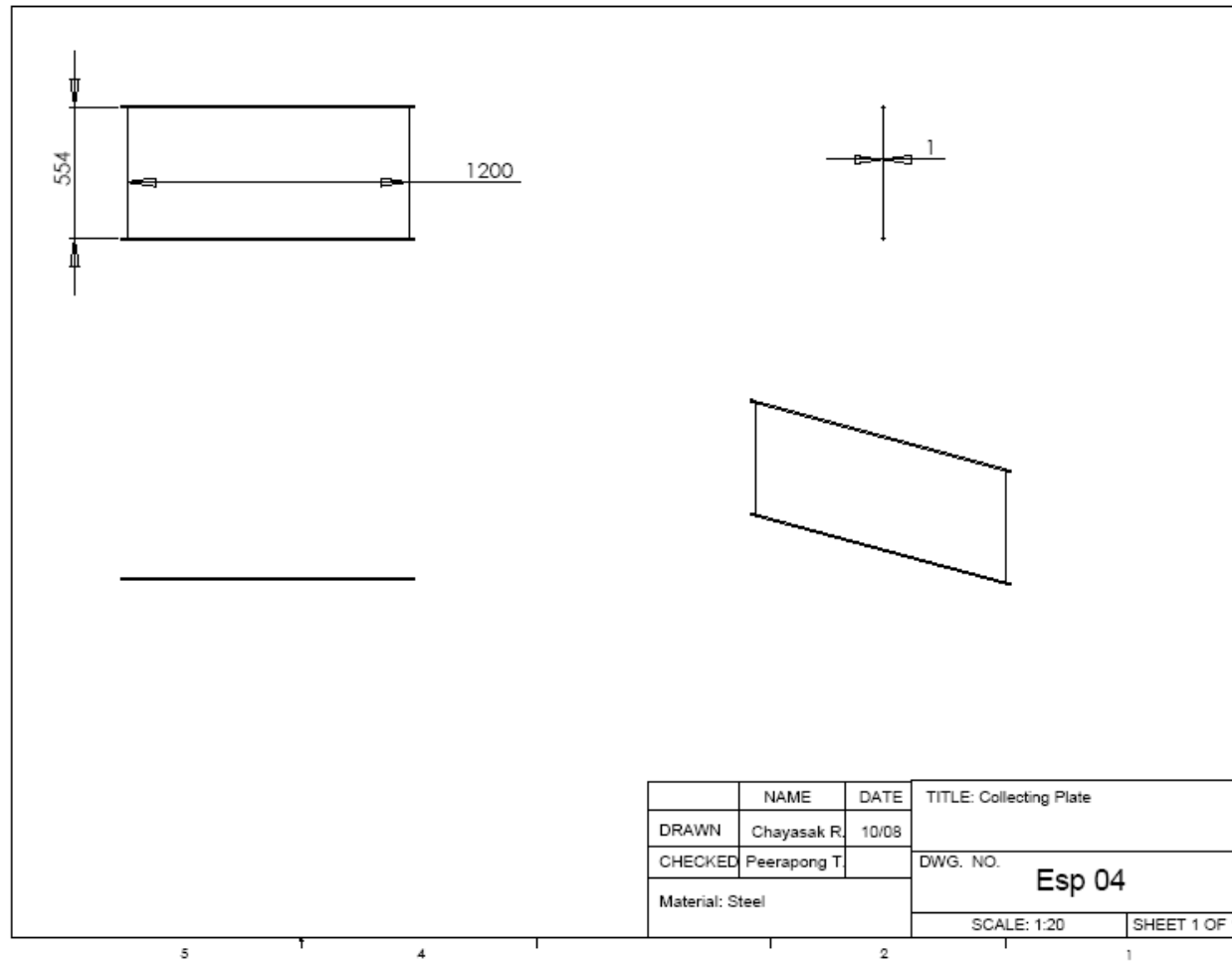
รูปที่ 1 แบบของส่วนประกอบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ



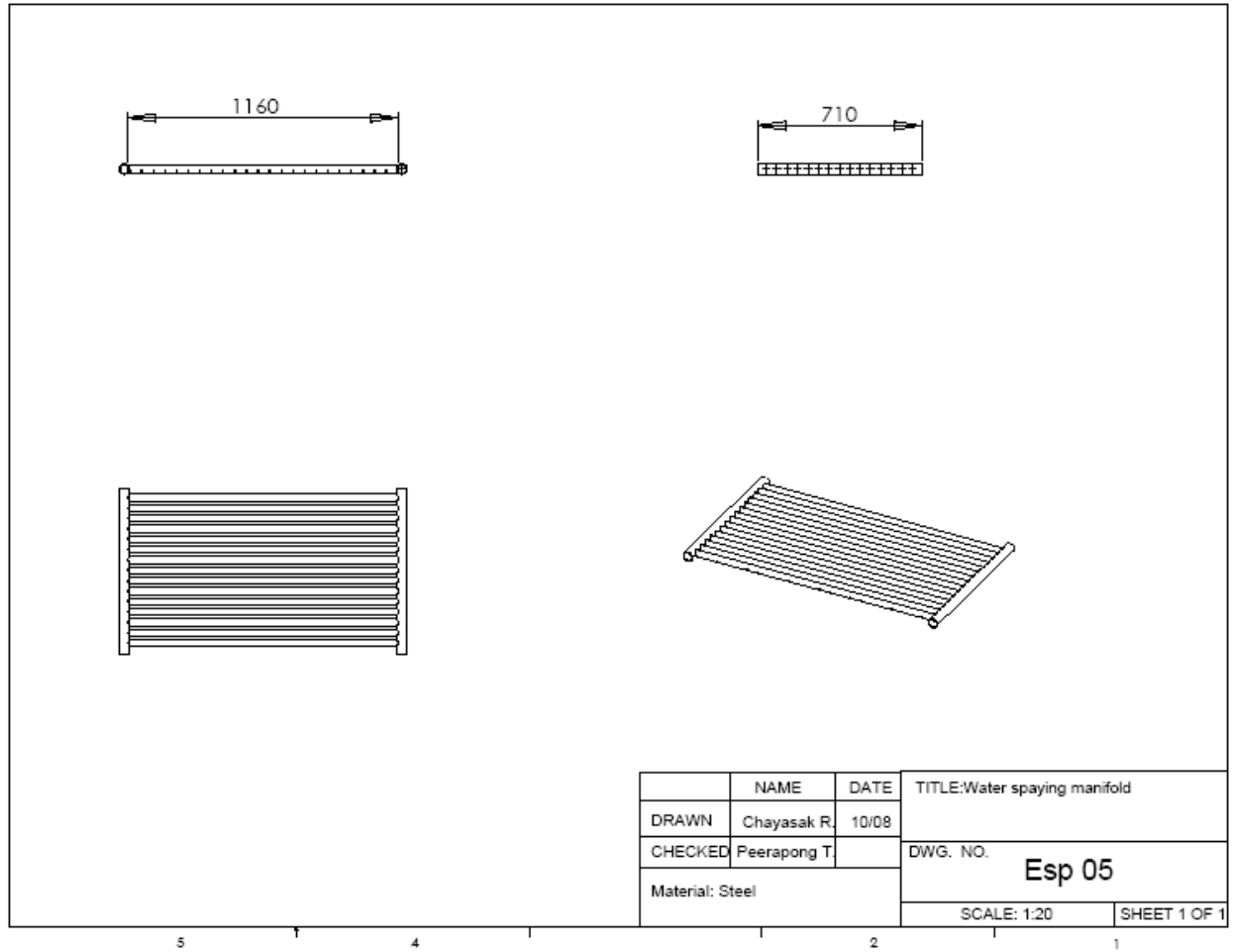
รูปที่ 2 แบบของตัวเครื่องตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับใส่แผ่นเรียบและเส้นลวด



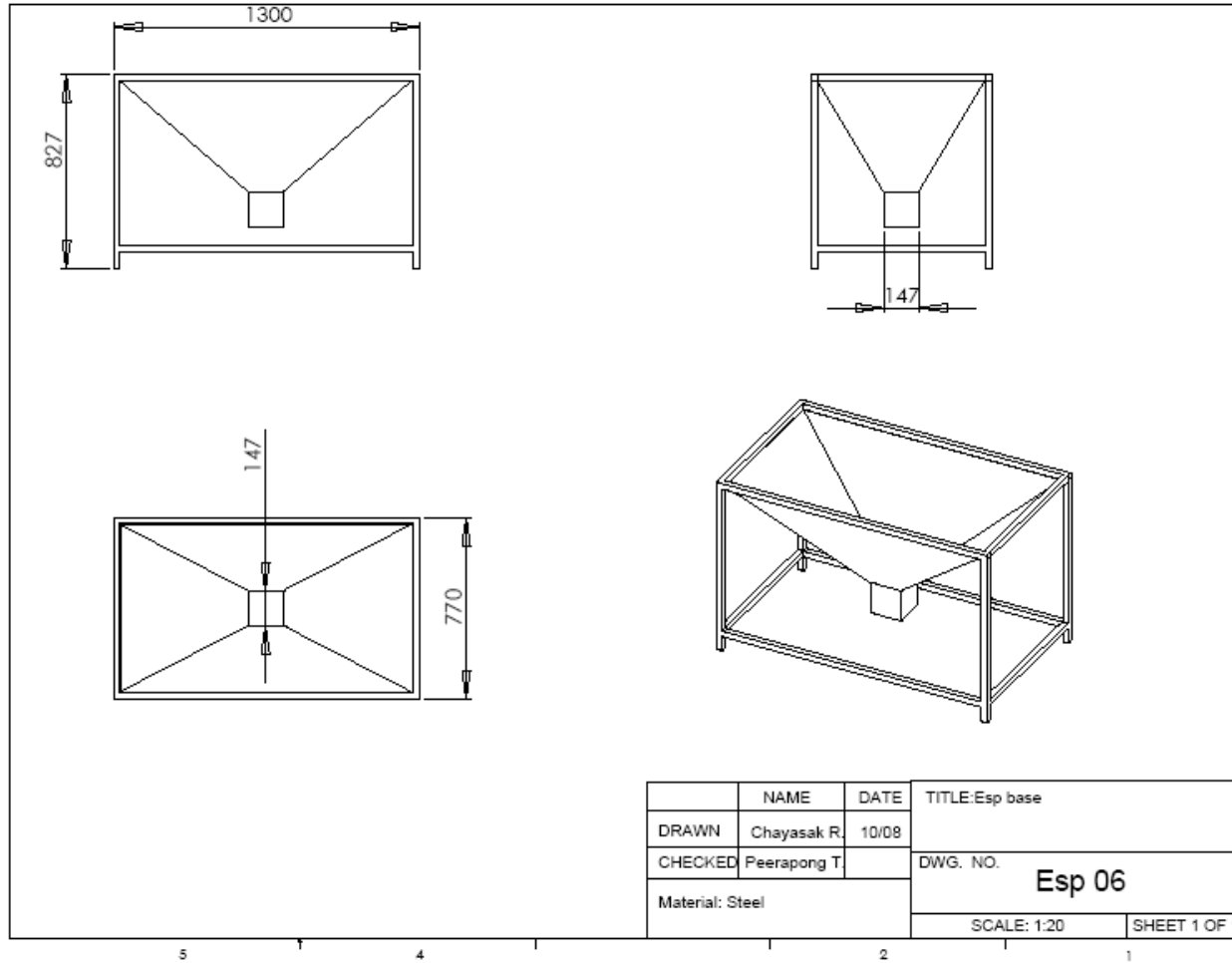
รูปที่ 3 แบบของเส้นลวดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



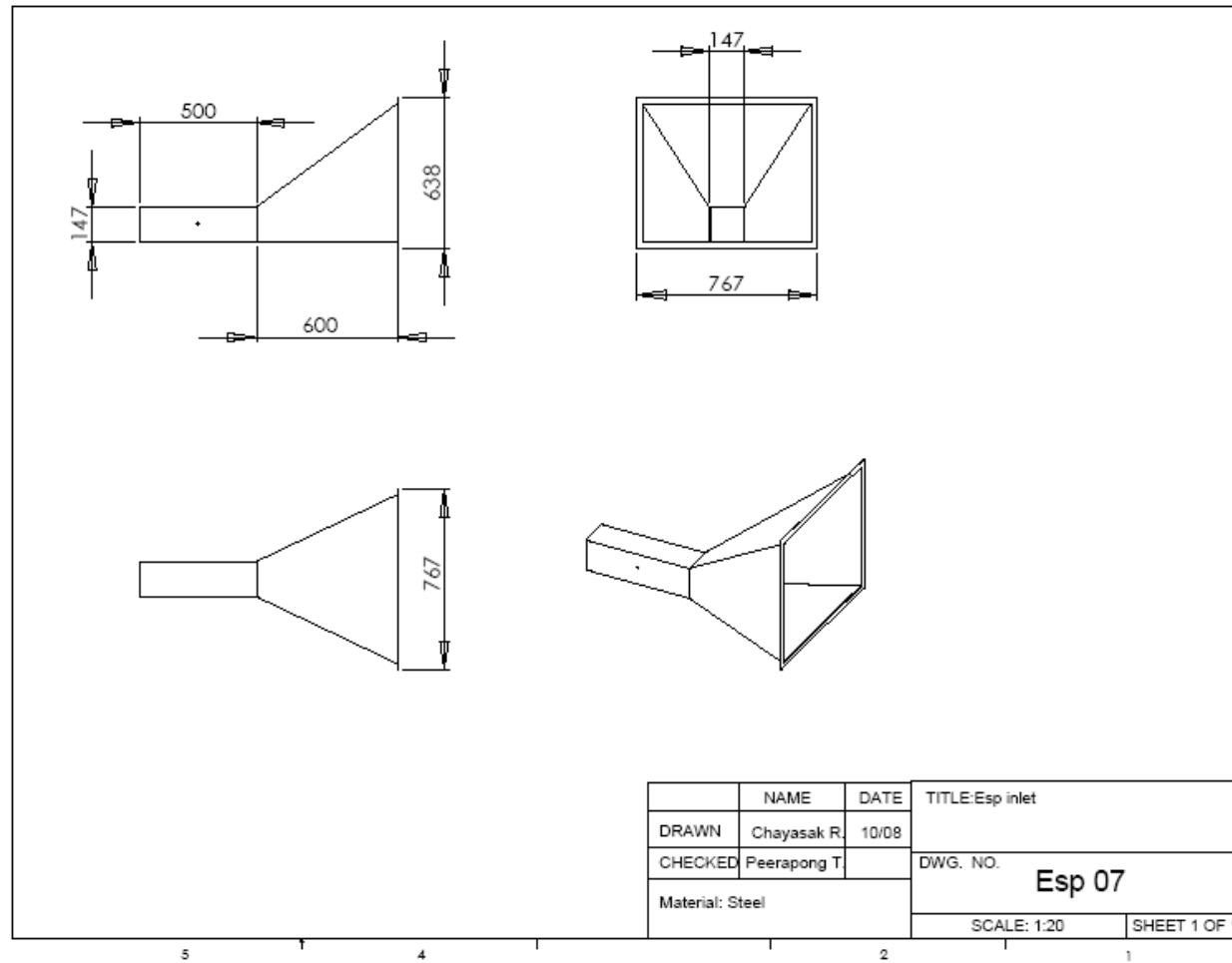
รูปที่ 4 แบบของแผ่นเรียบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



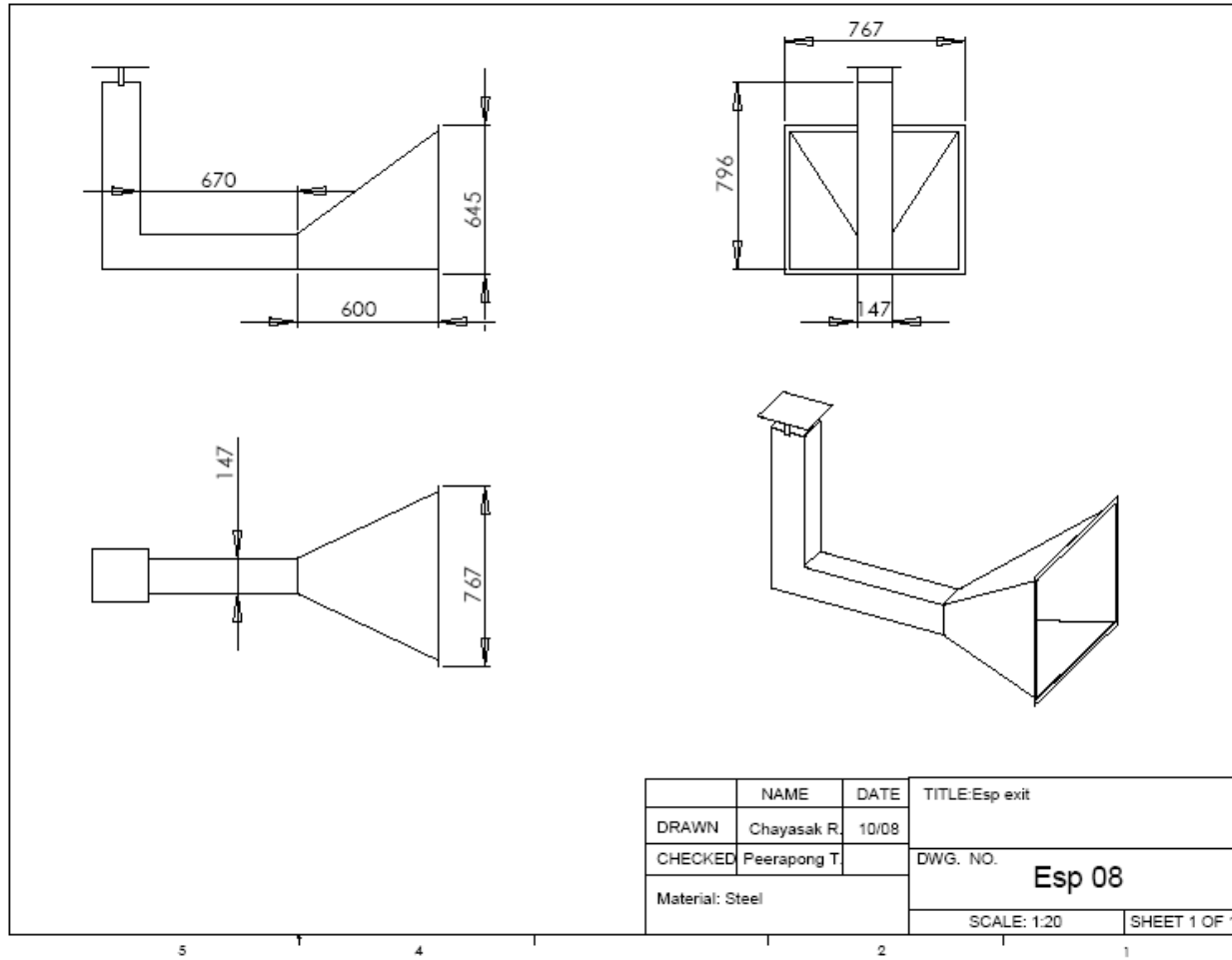
รูปที่ 5 แบบของระบบทำความสะอาดเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 6 แบบของฐานวางเครื่องตตะคอนเชิงไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 7 แบบของท่อทางเข้าเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



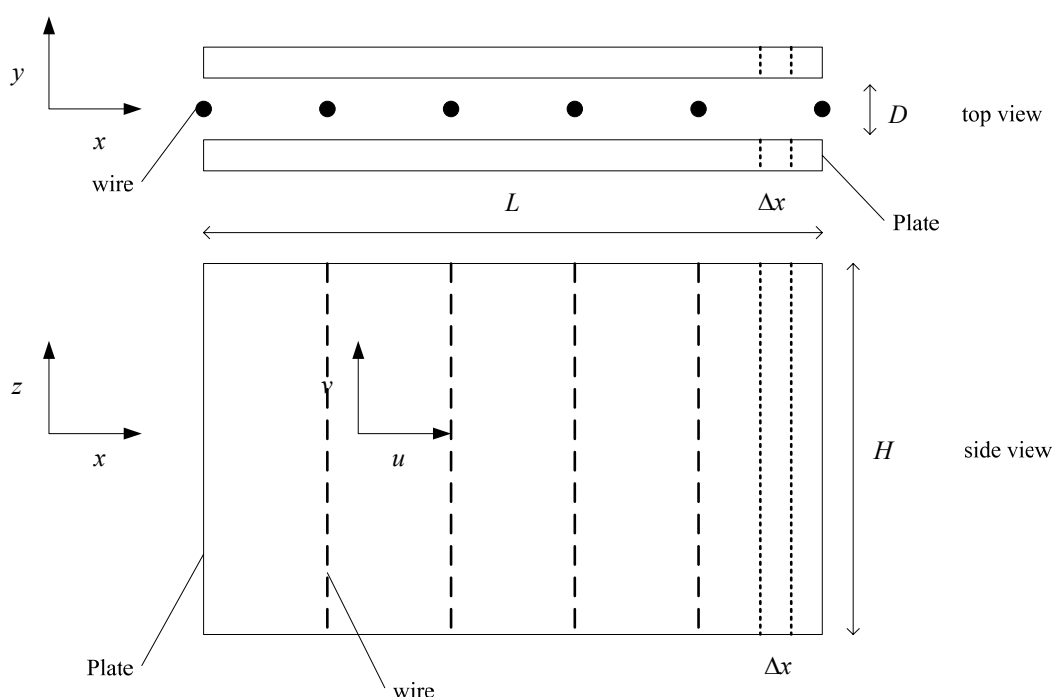
รูปที่ 8 แบบของท่อทางออกเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

ภาคผนวก ข.

สมการสมการ Deutsch – Anderson ซึ่งใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพ การคำนวณประสิทธิภาพ
เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต การคำนวณการคำนวณการเก็บตัวอย่างแบบไอโซโคเนติก
และการคำนวณการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์

ที่มาของสมการสมการ Deutsch – Anderson ซึ่งใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่อง
ตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (collection efficiency)

- ก๊าซและอนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน x ที่ความเร็วคงที่ u
- อนุภาคมีการแพร่กระจายในทิศทาง x และ y ที่ทุก ๆ จุดของ x
- การใส่ประจุและการเก็บอนุภาคเป็นแบบคงที่และอนุภาคมีความเร็วของการเคลื่อนย้ายอนุภาค (u_e) ในทิศทาง y อย่างรวดเร็วมาก
- เมื่ออนุภาควิ่งชนแผ่นเก็บอนุภาคจะถูกดักเก็บทั้งหมด



รูปที่ 1 ภาพมองด้านบนและด้านข้างของช่องการไหลของการตกตะกอนของเส้นลวดและแผ่นเรียบ

ความยาวของแผ่นเก็บอนุภาคในทิศทาง x คือ L และความสูงในทิศทาง z คือ H ตามสมมุติฐานการสมดุลอัตราการไหลเชิงมวลในองค์ประกอบ Δx และครึ่งหนึ่งของช่องการไหลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\left[u \frac{D}{2} H \right] C_x - \left[u \frac{D}{2} H \right] C_{x+\Delta x} = u_e C_{x+\frac{\Delta x}{2}} H \Delta x$$

โดยที่ D คือระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบในทิศทาง y

H คือความสูงของแผ่นเรียบในทิศทาง z

C_x คือความเข้มข้นของอนุภาคที่ระยะ x

$C_{x+\Delta x}$ คือความเข้มข้นของอนุภาคที่ระยะ $x + \Delta x$

$C_{x+\frac{\Delta x}{2}}$ คือความเข้มข้นของอนุภาคที่ระยะ $x + \frac{\Delta x}{2}$

เนื่องจากการไหลของอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่เข้าและออกผ่านแผ่นเรียบที่บางมากจึงสมมติให้อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่ไหลเข้าและไหลออกมีค่าเท่ากันในองค์ประกอบ Δx จากสมการการสมดุลอัตราการไหลเชิงมวล หาดด้วย Δx และให้ลิมิตของ Δx เข้าใกล้ศูนย์ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{-uHD}{2} \frac{dC}{dx} = u_e HC$$

อินทิเกรตแบบตัวแปรแยกกัน

$$\int_{C_0}^{C_L} \frac{dC}{C} = \int_0^L \frac{-u_e 2H}{uHD} dx$$

$$\ln C_L - \ln C_0 = \frac{-u_e 2HL}{uHD} + 0$$

$$\ln \frac{C_L}{C_0} = \frac{-u_e 2HL}{uHD}$$

$$\frac{C_L}{C_0} = \exp \frac{-u_e 2HL}{uHD}$$

หรือ

$$\frac{C_L}{C_0} = \exp \left[\frac{-u_e A_c}{Q} \right]$$

สมการ Deutsch – Anderson ซึ่งใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (collection efficiency) มีดังนี้

$$\eta = 1 - \frac{C_L}{C_0}$$

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{-u_e A_c}{Q}\right]$$

โดยที่ η คือประสิทธิภาพการเก็บ A_c คือพื้นที่ผิวของขั้วเก็บ (m^2) Q คือปริมาณการไหลของก๊าซที่เข้าเครื่อง (m^3/s) และ u_e คือความเร็วของการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (m/s)

การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ
ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm

ตัวแปรค่าคงที่

$$d_p = 0.65 \times 10^{-6} \text{ m (ขนาดของอนุภาค)}$$

$$\lambda = 0.0665 \times 10^{-6} \text{ m (ระยะทางอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล)}$$

$$\frac{d_c}{2} = s = 0.0375 \text{ m (ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเรียบ)}$$

$$\frac{d_w}{2} = c = 0.0425 \text{ m (ระยะครึ่งหนึ่งระหว่างเส้นลวด)}$$

$$h = 0.554 \text{ m (ความสูงของแผ่นตกตะกอน)}$$

$$L = 1.2 \text{ m (ความยาวของแผ่นตกตะกอน)}$$

$$r_0 = 0.0005 \text{ m (รัศมีของขั้วปล่อยประจุ)}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K (ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์)}$$

$$T = 383 \text{ K (อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน)}$$

$$\mu = 2.22 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 \text{ (ความหนืดของก๊าซ (อากาศ))}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomb/electron (ประจุของอิเล็กตรอน)}$$

$$\epsilon = 3 \text{ (ค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค)}$$

$$K_E = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C} \text{ (ค่าคงที่จากสมการของคูลอมบ์)}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m (เปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง)}$$

$$C_i = 240 \text{ m/s (ความเร็วอุณหภูมิเฉลี่ยของไอออนที่สภาวะมาตรฐาน)}$$

$$V_w = 21201 \text{ V (แรงดันไฟฟ้าที่ใส่)}$$

$$u = 1.4 \text{ m/s (ความเร็วของก๊าซ)}$$

$$Z_i = 2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s (การเคลื่อนย้ายไฟฟ้าของไอออน)}$$

$$\delta = 0.92584 \text{ kg/m}^3 \text{ (ความหนาแน่นของก๊าซ)}$$

พื้นที่แผ่นเรียบทั้งหมด (A_c)

$$A_c = h \times L$$

$$A_c = 0.554 \times 1.2$$

$$A_c = 0.6648 \text{ m}^2$$

อัตราการไหลของก๊าซ (Q)

$$Q = s \times h \times v_0$$

$$Q = 0.0375 \times 0.554 \times 1.4$$

$$Q = 0.0291 \text{ m}^3/\text{s}$$

ความแรงสนามไฟฟ้า (E)

$$E = \frac{V_w}{s}$$

$$E = \frac{21201}{0.0375}$$

$$E = 565360 \text{ V/m}$$

สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (E_c)

$$E_c = \delta \left(32.2 + \frac{0.864 \times 10^5}{\sqrt{r_0 \delta}} \right)$$

$$E_c = 0.92584 \left(32.2 + \frac{0.864 \times 10^5}{\sqrt{0.0005 \times 0.92584}} \right)$$

$$E_c = 3.717921 \times 10^6 \text{ V/m}$$

แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (V_c)

$$V_c = r_0 E_c \ln \left(\frac{d_p}{r_0} \right)$$

$$V_c = 0.0005 \times 3.717921 \times 10^6 \ln \left(\frac{0.65 \times 10^{-6}}{0.0005} \right)$$

$$V_c = -12353.52 \text{ V}$$

รัศมีทรงกระบอกสมมูล (d)

$$d = 2c0.18 \exp\left(2.96 \frac{s}{2c}\right); 0.3 \leq \frac{s}{2c} \leq 1.0$$

$$d = 2 \times 0.0425 \times 0.18 \exp\left(2.96 \frac{0.0375}{2 \times 0.0425}\right); 0.3 \leq \frac{0.0375}{2 \times 0.0425} \leq 1.0$$

$$d = 0.056471 \text{ m}; 0.3 \leq 0.4412 \leq 1.0$$

ค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (I_c)

$$I_c = \frac{\pi \epsilon_0 Z_i h L}{c s^2 \ln\left(\frac{d}{r_0}\right)} V_w (V_w - V_c)$$

$$I_c = \frac{\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 2.1 \times 10^{-4} \times 0.554 \times 1.2}{0.0425 \times 0.0375^2 \ln\left(\frac{0.056}{0.0005}\right)} \times 21201 (21201 + 12353.52)$$

$$I_c = 9.78 \times 10^{-3} \text{ A}$$

ตัวชดเชยของก้านนิ่งแฮม (C_c)

$$C_c = 1 + \frac{2.25 \lambda}{d_p}$$

$$C_c = 1 + \frac{2.25 \times 0.0065 \times 10^{-10}}{0.65 \times 10^{-6}}$$

$$C_c = 1.23$$

ค่าความเข้มข้นของไอออน (N_i)

$$N_i = \frac{I_c d}{Z_i e v_0 V_w h t}$$

$$N_i = \frac{9.78 \times 10^{-3} \times 0.056}{2.1 \times 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.4 \times 212201 \times 0.554 \times t}$$

$$N_i t = \frac{9.78 \times 10^{-3} \times 0.056}{2.1 \times 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.4 \times 212201 \times 0.554}$$

$$N_i t = 9.99 \times 10^{14}$$

การให้ประจุอนุภาคโดยสนามไฟฟ้า ($n_f(t)$)

$$n_f(t) = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right)$$

$$n_f(t) = \left(\frac{3 \times 3}{3 + 2} \right) \left(\frac{565360 \times (0.65 \times 10^{-6})^2}{4 \times 9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{\pi \times 9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2.1 \times 10^{-4} \times 9.99 \times 10^{14}}{1 + (\pi \times 9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2.1 \times 10^{-4} \times 9.99 \times 10^{14})} \right)$$

$$n_f(t) = 74.6$$

การแพร่เชิงความร้อน ($n_d(t)$)

$$n_d(t) = \frac{d_p k T}{2 K_E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_p C_i e^2 N_i t}{2 k T} \right]$$

$$n_d(t) = \frac{0.65 \times 10^{-6} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 383}{2 \times 9 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19})^2} \ln \left[1 + \frac{\pi \times 9 \times 10^9 \times 0.65 \times 10^{-6} \times 240 \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times 9.99 \times 10^{14}}{2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 383} \right]$$

$$n_d(t) = 69.2$$

จำนวนประจุโดยรวม ($n(t)$)

$$n(t) = n_f(t) + n_d(t)$$

$$n(t) = 74.6 + 69.2$$

$$n(t) = 144$$

ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (u_e)

$$u_e = \frac{n(t) e E C_c}{3 \pi \mu d_p}$$

$$u_e = \frac{144 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 565360 \times 1.23}{3 \times \pi \times 2.22 \times 10^{-5} \times 0.65 \times 10^{-6}}$$

$$u_e = 0.118 \text{ m/s}$$

ประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า (collection efficiency)

$$\eta = \left[1 - \exp \left(\frac{-u_e A_c}{Q} \right) \right] \times 100$$

$$\eta = \left[1 - \exp \left(\frac{-0.118 \times 0.6648}{0.029085} \right) \right] \times 100$$

$$\eta = 93.21 \%$$

คำนวณอัตราการไหลในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตและอัตราการไหลในท่อชักตัวอย่างเพื่อให้
อัตราการไหลเท่ากันซึ่งจะสอดคล้องกับการชักตัวอย่างแบบไอโซไคนेटิก

โดยที่ความเร็วของก๊าซในเตาเผาเท่ากับ 0.2 m/s ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง
(D_q) ของท่อชักตัวอย่างเท่ากับ 0.0254 m อัตราการไหลในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Q_1)
อัตราการไหลในท่อชักตัวอย่าง (Q_2) ความของก๊าซในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (V_1) ความ
ของก๊าซในท่อชักตัวอย่าง (V_2) พื้นที่ก๊าซไหลผ่านในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (A_1) พื้นที่
ก๊าซไหลผ่านในท่อชักตัวอย่าง (A_2)

จากสมการคำนวณอัตราการไหล

$$Q = AV$$

กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V$

$$V = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2}$$

$$Q_2 = VA_2$$

$$Q_2 = 0.2 \times \pi(D)^2$$

$$Q_2 = 0.2 \times \pi(0.0254)^2$$

$$Q_2 = 4.05366 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 4.05366 \times 10^{-4} \times 60 \times 1000 = 24.322 \text{ L/min}$$

ดังนั้นจึงเลือกอัตราการไหลผ่านกระดาดกรองเท่ากับ 24 L/min

การคำนวณการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์ (Chi-square probability distribution) ทำ
การทดสอบแบบความเป็นเอกภาพ (Test of homogeneity)

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพจากการทดลอง 2 ครั้ง ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm และระยะห่าง
ระหว่างเส้นลวด 8.5 cm

ครั้งที่	ประสิทธิภาพ (%)	
	ทดลองครั้งที่ 1	ทดลองครั้งที่ 2
1	77.32	77.87
2	66.54	63.77
3	53.22	57.61
4	51.31	49.11
5	42.22	41.71
6	40.37	41.92
7	34.35	41.49
8	34.89	27.99
9	28.55	21.16
10	8.24	9.06

สมมติฐาน

H_0 : ประสิทธิภาพจากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้งเหมือนกัน

H_1 : ประสิทธิภาพจากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้งไม่เหมือนกัน

จากสูตรการคำนวณการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์

$$\chi^2 = \sum_{ij=1}^{ij=n} \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$$

χ^2 คือค่าการแจกแจงแบบแบบไคสแควร์

O_{ij} คือค่าที่ได้จากการศึกษา

E_{ij} คือค่าคาดหวังที่ควรจะเป็นคำนวณได้จาก (กลุ่มตัวแปรมากกว่า 2 กลุ่ม)

$$E_{ij} = \frac{(R_{Ti} \times C_{Tj})}{N}$$

R_{Ti} คือผลรวมของสมาชิกในแถว

C_{Tj} คือผลรวมของสมาชิกในคอลัมน์

N คือจำนวนสมาชิกทั้งหมด

แทนค่าสูตร

ครั้งที่	ประสิทธิภาพ (%)		รวม	E_{ij}		$\frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$	
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2					
1.00	77.32	77.87	155.19	78.07	77.12	0.01	0.01
2.00	66.54	63.77	130.31	65.55	64.76	0.01	0.01
3.00	53.22	57.61	110.83	55.76	55.08	0.11	0.12
4.00	51.31	49.11	100.42	50.52	49.90	0.01	0.01
5.00	42.22	41.71	83.93	42.22	41.70	0.00	0.00
6.00	40.37	41.92	82.29	41.40	40.89	0.03	0.03
7.00	34.35	41.49	75.84	38.15	37.69	0.38	0.38
8.00	34.89	27.99	62.88	31.63	31.25	0.34	0.34
9.00	28.55	21.16	49.71	25.01	24.70	0.50	0.51
10.00	8.24	9.06	17.30	8.70	8.59	0.02	0.02
รวม	437.01	431.68	868.70			1.42	1.43

$$\chi^2 = 2.85$$

การทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ที่องศาอิสระ ($df = (r-1)(k-1)$) เท่ากับ 9 เมื่อ $r =$ จำนวนกลุ่มของตัวแปรตัวที่หนึ่ง และ $k =$ จำนวนกลุ่มของตัวแปรตัวที่สอง ซึ่งมีค่าวิกฤติจากตารางไคสแควร์ ($\chi^2_{Critical}$) เท่ากับ 16.9 ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าวิกฤติจากตารางไคสแควร์มีค่ามากกว่าค่าจากการคำนวณไคสแควร์ (χ^2) เท่ากับ 2.85 แสดงว่าค่าจากการคำนวณไคสแควร์จึงยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1 เป็นไปตามสมมติฐานประสิทธิภาพจากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้งเหมือนกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภาคผนวก ค.

ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค
และประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค

ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm (ทดลองครั้งที่ 1)

การทดลองครั้งที่ 1 (10/12/51)

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

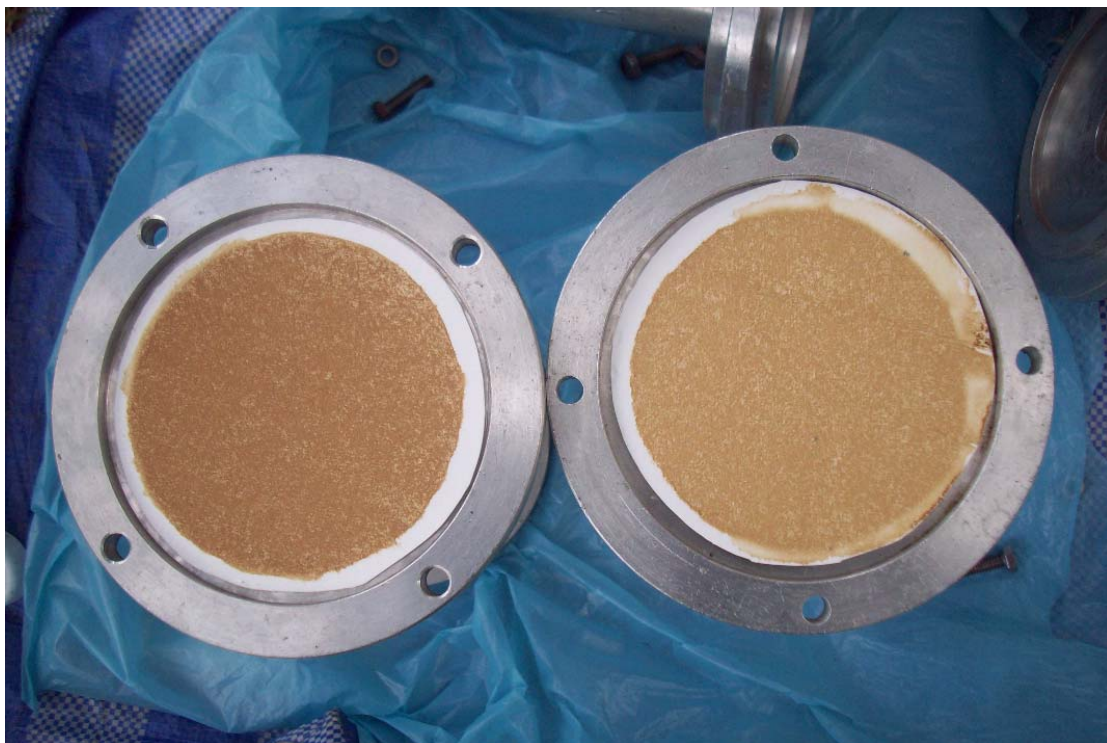
ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
718.65	941.56	721.73	772.29	222.91	50.56	77.32

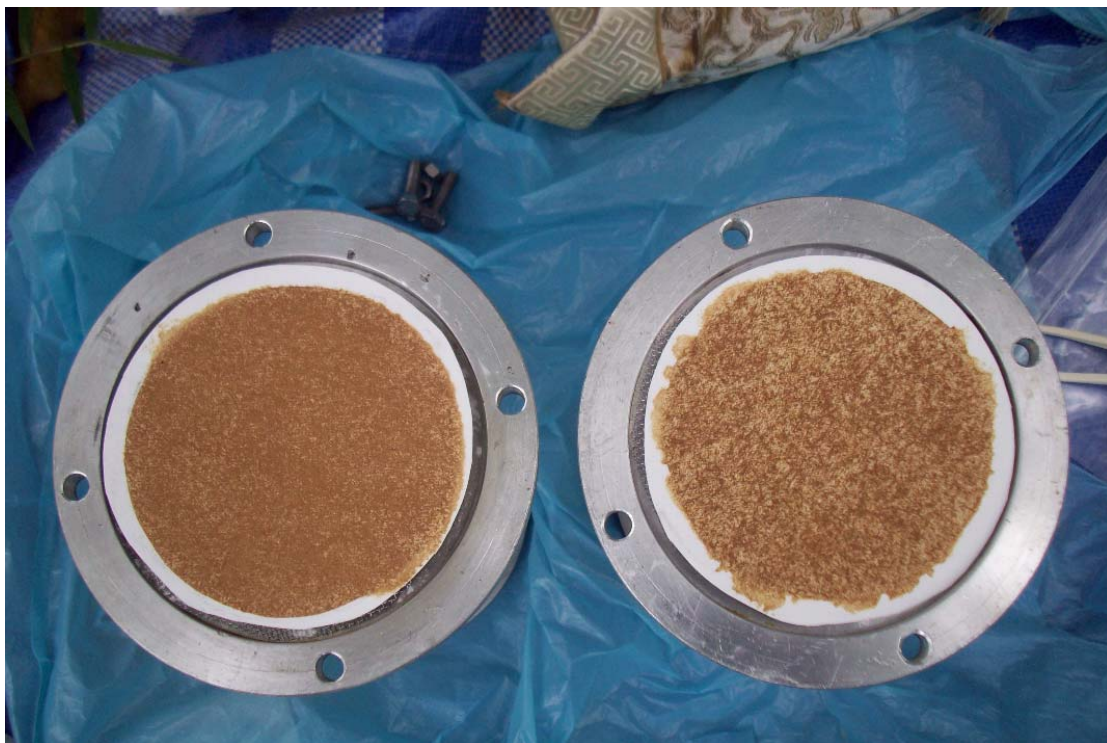
การทดลองครั้งที่ 2 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
714.07	827.57	724.13	762.11	113.5	37.98	66.54

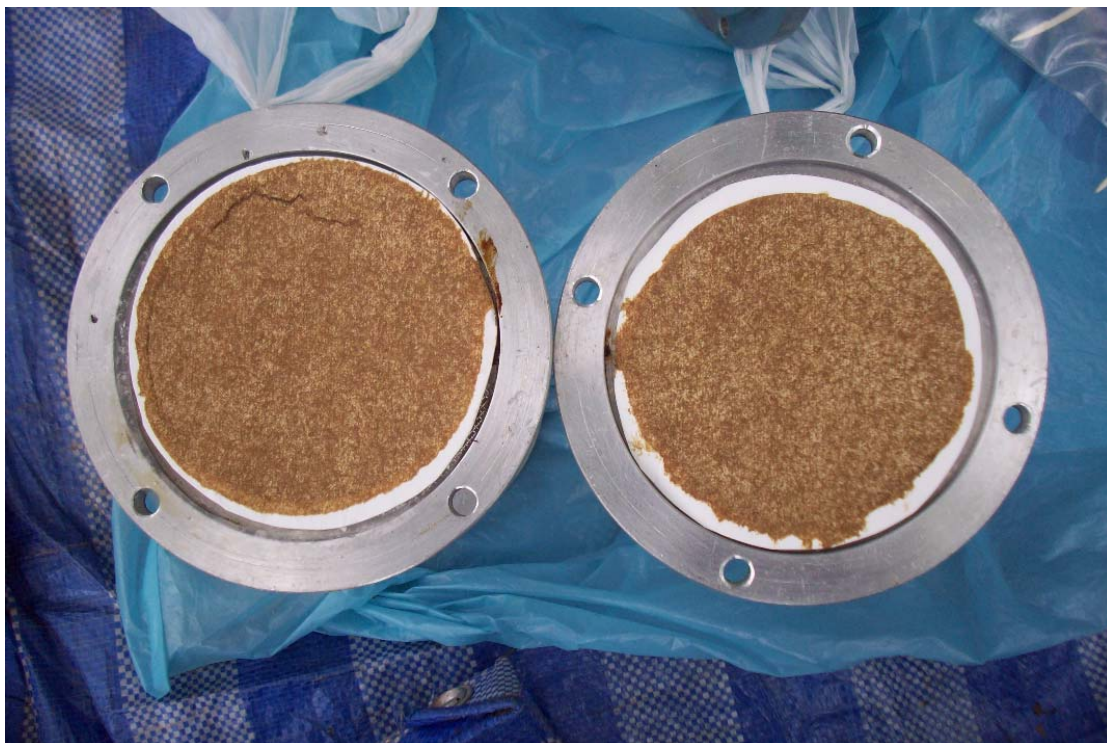
การทดลองครั้งที่ 3 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
705.98	778.24	708.30	742.10	72.26	033.8	53.22

การทดลองครั้งที่ 4 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
705.31	785.82	719.47	758.67	80.51	039.2	51.31

การทดลองครั้งที่ 5 (10/12/51)

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.44	769.41	728.39	766.51	65.97	38.12	42.22

การทดลองครั้งที่ 6 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
710.02	861.55	700.96	791.31	151.53	90.35	40.37

การทดลองครั้งที่ 7 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
726	767.31	702.49	729.61	41.31	27.12	34.35

การทดลองครั้งที่ 8 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
725.05	767.58	710.72	738.41	42.53	27.69	34.89

การทดลองครั้งที่ 9 (10/12/51)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

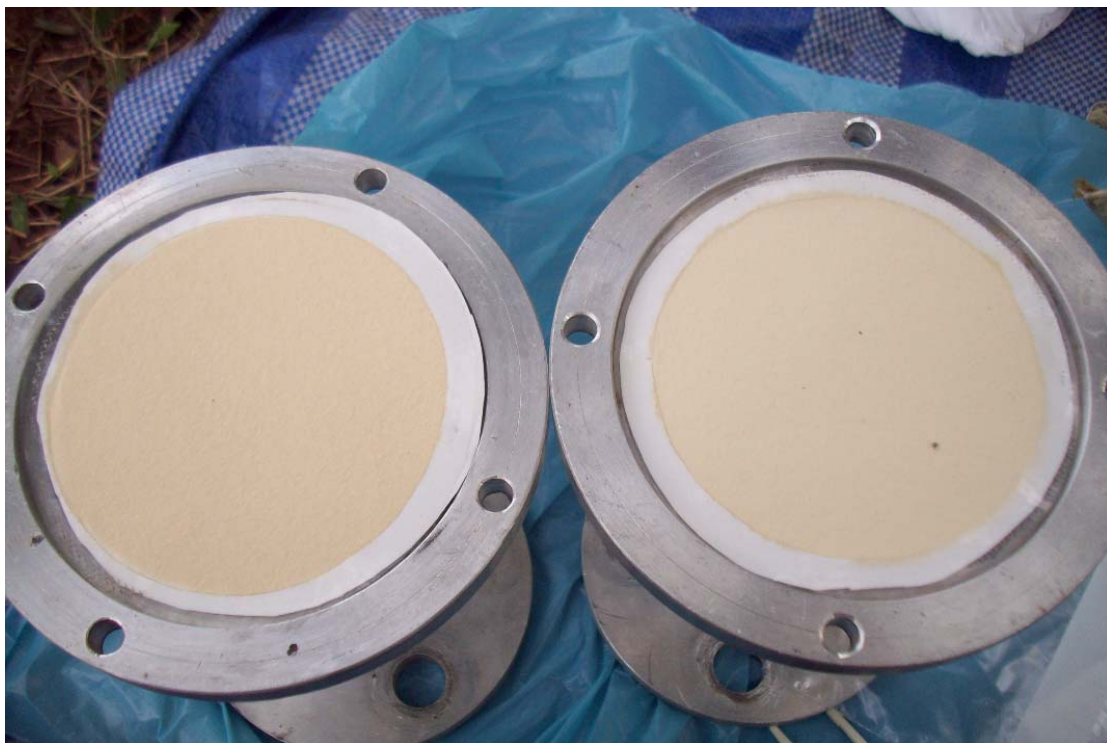
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
706.88	840.82	721.32	817.02	133.94	95.7	28.55

การทดลองครั้งที่ 10 (10/12/51)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
715.04	737.86	712.75	733.69	22.82	20.94	8.24

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm (ทดลองครั้งที่ 2)

การทดลองครั้งที่ 1 (07/01/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
720.05	894.33	709.73	748.30	174.28	38.57	77.87

การทดลองครั้งที่ 2 (07/01/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.49	867.03	713.19	773.52	166.54	060.33	63.77

การทดลองครั้งที่ 3 (07/01/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
714.08	877.35	708.30	777.51	163.27	69.21	57.61

การทดลองครั้งที่ 4 (07/01/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
714.78	801.04	709.96	753.86	86.26	43.9	49.11

การทดลองครั้งที่ 5 (07/01/52)

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
712.83	825.13	706.41	771.87	112.3	65.46	41.71

การทดลองครั้งที่ 6 (07/01/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.58	809.05	711.31	773.15	106.47	61.84	41.92

การทดลองครั้งที่ 7 (07/01/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.41	776.53	716.27	759.64	74.12	43.37	41.49

การทดลองครั้งที่ 8 (07/01/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
715.84	865.07	703.54	811.00	149.23	107.46	28

การทดลองครั้งที่ 9 (07/01/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

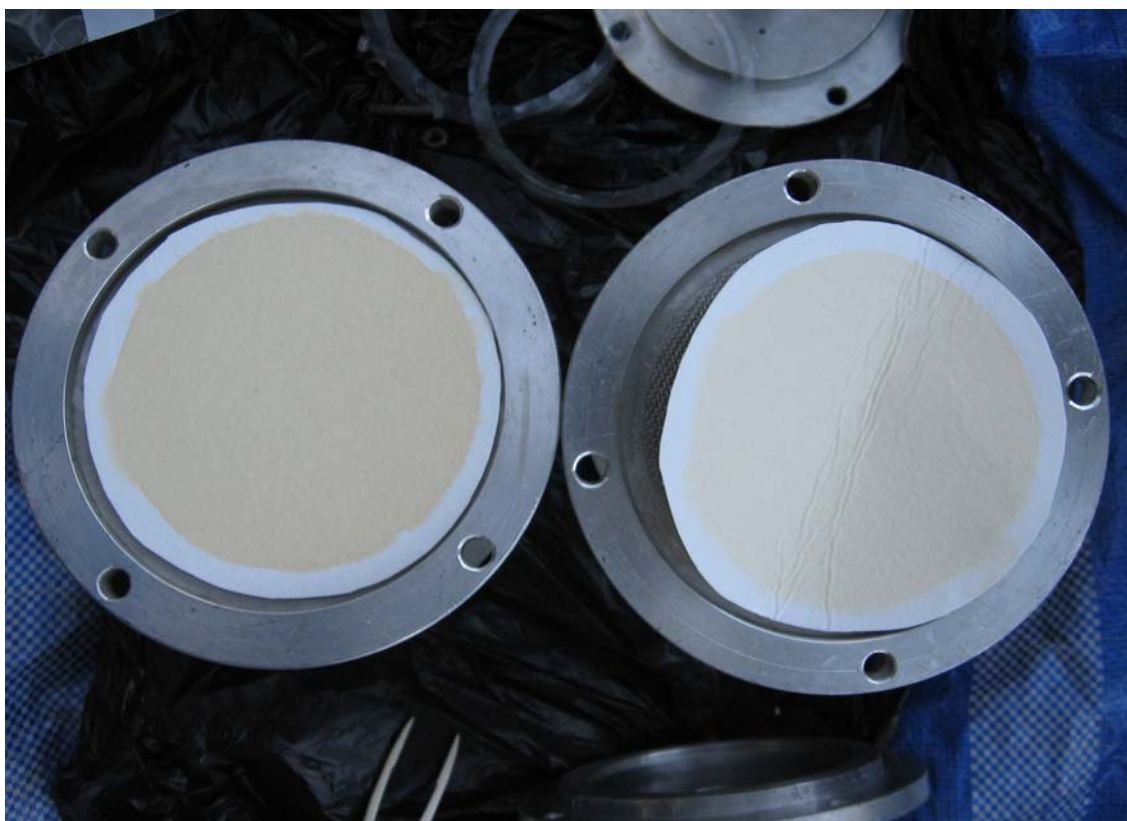
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.24	745.43	721.36	750.68	37.19	29.32	21.16

การทดลองครั้งที่ 10 (07/01/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (มิลลิกรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (มิลลิกรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.72	716.78	735.57	742.90	8.06	007.33	9.06

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm (ทดลองครั้งที่ 1)

การทดลองครั้งที่ 1 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
717.5	807.78	705.01	730.03	90.28	25.02	72.29

การทดลองครั้งที่ 2 (03/02/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
715.2	745.72	708.81	714.9	30.52	6.09	80.05

การทดลองครั้งที่ 3 (03/02/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.86	890	707.6	784.9	185.14	77.30	58.25

การทดลองครั้งที่ 4 (03/02/52)
 อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min
 เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที
 ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
714.14	929.96	702.21	796.32	215.82	94.11	56.39

การทดลองครั้งที่ 5 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
697.84	915.64	702.06	808.46	217.80	106.40	51.15

การทดลองครั้งที่ 6 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
712.96	786.38	702.56	740.69	73.42	38.13	48.07

การทดลองครั้งที่ 7 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
711.03	812.99	700.87	752.48	101.96	51.61	49.38

การทดลองครั้งที่ 8 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
705.35	1044.23	703.99	947.34	338.88	243.35	28.19

การทดลองครั้งที่ 9 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.94	816.63	693.9	792.75	107.69	98.85	8.21

การทดลองครั้งที่ 10 (03/02/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.15	732.49	708.89	732.58	24.34	23.69	2.67

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm (ทดลองครั้งที่ 2)

การทดลองครั้งที่ 1 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.18	1048.52	700.5	781.71	344.34	81.21	76.42

การทดลองครั้งที่ 2 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
696.53	1087.7	699.78	813.47	391.17	113.69	70.94

การทดลองครั้งที่ 3 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
694.2	1014.65	702.3	785.3	320.45	83.00	74.10

การทดลองครั้งที่ 4 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
696.9	1023.28	699.03	902.38	326.38	203.35	37.70

การทดลองครั้งที่ 5 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
689.82	929.6	700.28	829.7	239.78	129.42	46.03

การทดลองครั้งที่ 6 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.83	1043.85	694.81	908.2	343.02	213.39	37.79

การทดลองครั้งที่ 7 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
690.4	968.94	710.33	907.8	278.54	197.47	29.11

การทดลองครั้งที่ 8 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.96	809.97	695.81	768.58	107.01	72.77	32.00

การทดลองครั้งที่ 9 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
696.97	788.46	695.89	771.97	91.49	76.08	16.84

การทดลองครั้งที่ 10 (22/2/52)

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.47	708.64	708.14	714.39	8.17	6.25	23.50

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 7.5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm (ทดลองครั้งที่ 2)

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.58	958.1	708.94	780.2	249.52	71.26	71.44

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.67	997.74	712.96	809.35	295.07	96.39	67.33

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.86	1072.96	717.81	805.45	370.10	87.64	76.32

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.6	982.45	712.03	869.84	279.85	157.81	43.61

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

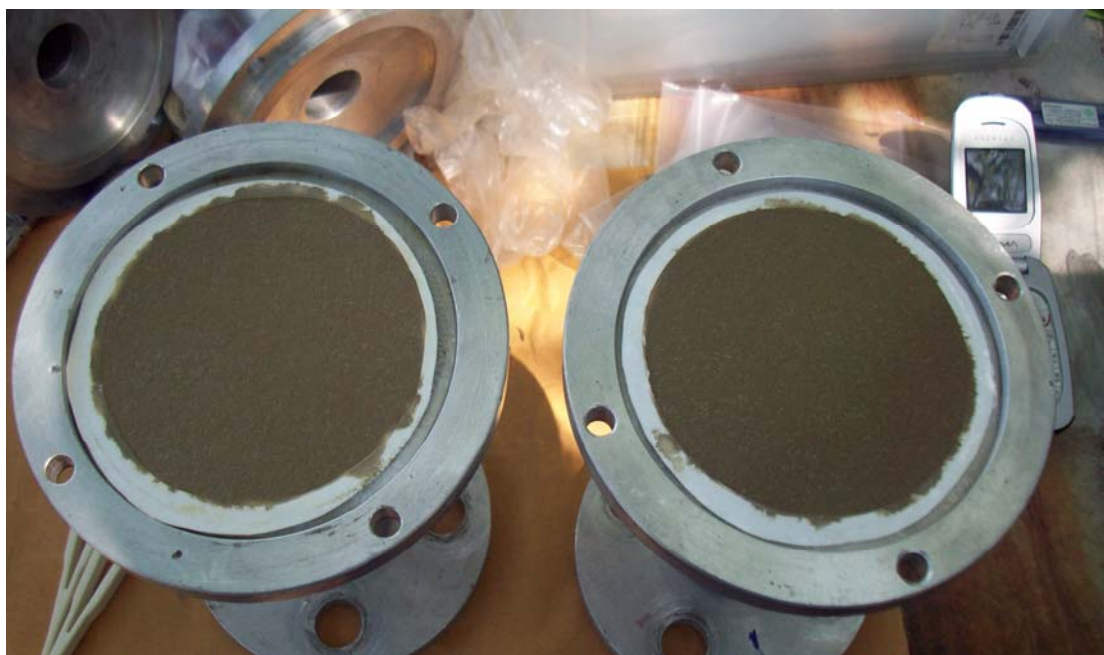
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
712.22	855	713.71	784.69	142.78	70.98	50.29

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

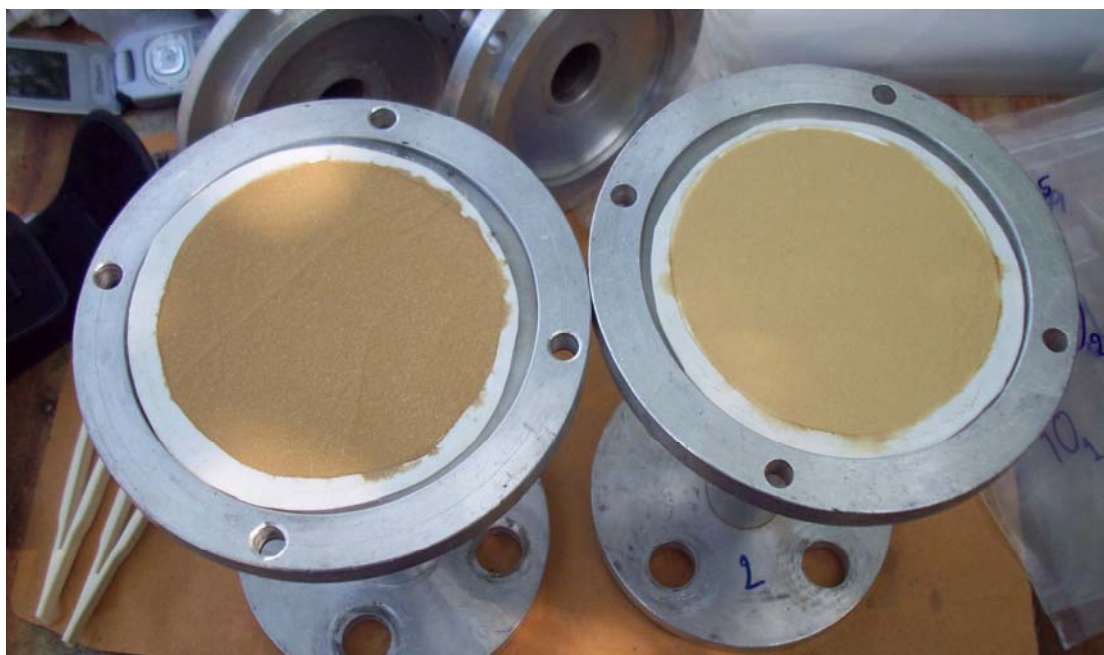
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
710.19	830.21	703.8	778.53	120.02	74.73	37.74

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูคเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
715.59	831.1	713.81	792.41	115.51	78.60	31.95

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.23	851.9	715.43	817.27	143.67	101.84	29.12

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.96	769.44	712.69	766.03	60.48	53.34	11.81

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
705.49	769.28	713.45	770.97	63.79	57.52	9.83

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm (ทดลองครั้งที่ 1)

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.82	1323.72	698.22	800.72	614.90	102.50	83.33

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.23	1212.36	703.38	901.20	512.13	197.82	61.37

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.51	1155.00	708.56	908.98	451.49	200.42	55.61

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

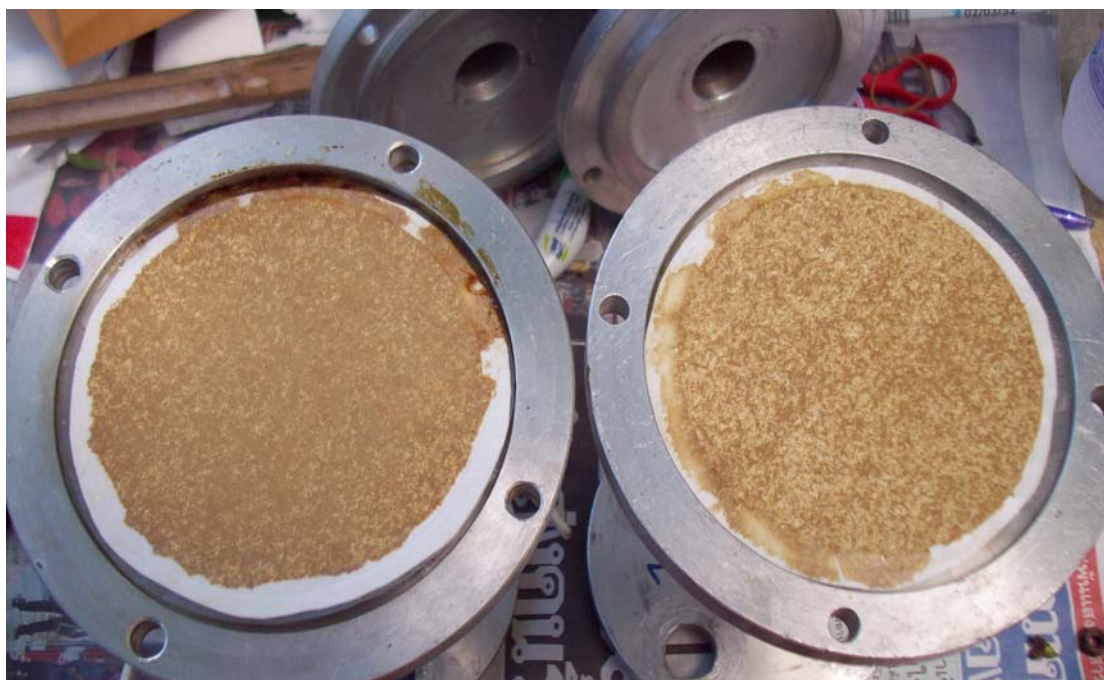
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.31	1127.59	717.73	914.66	423.28	196.93	53.48

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
713.17	1031.06	703.21	841.87	317.89	138.66	56.38

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
710.63	917.52	707.99	815.21	206.89	107.22	48.18

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
713.34	913.2	699.05	828.94	199.86	129.89	35.01

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.94	798.98	705.21	768.95	94.04	63.74	32.22

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
707.42	833.22	711.92	804.7	125.80	92.78	26.25

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.84	712.46	710.9	718.33	8.62	7.43	13.81

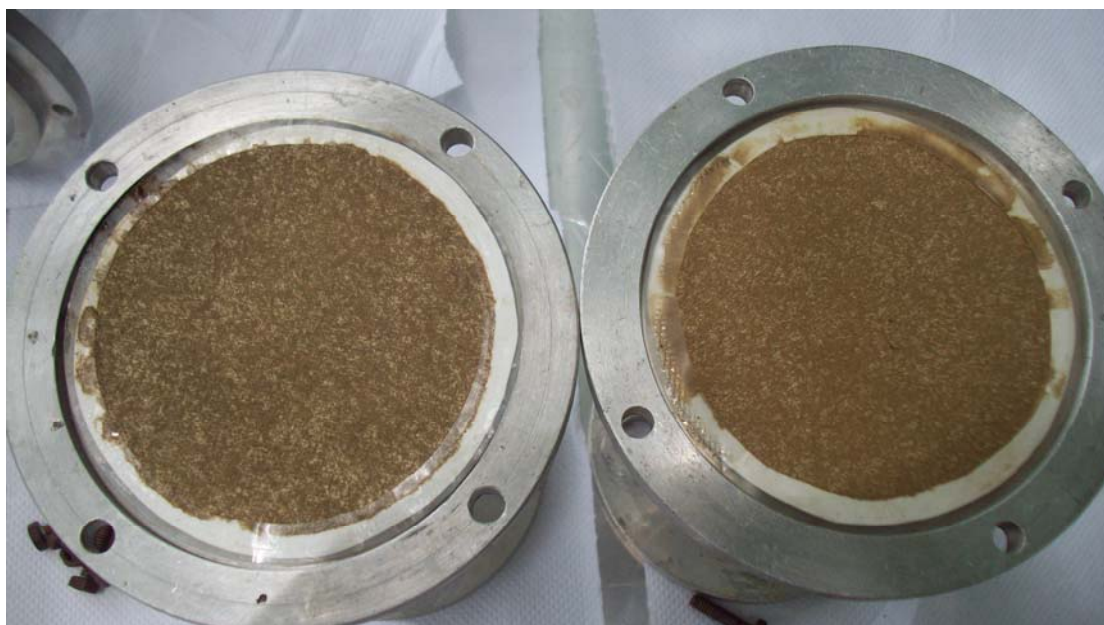
ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 8.5 cm (ทดลองครั้งที่ 2)

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดาด 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาดกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดาดกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาดกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.36	932.14	701.92	747.52	228.78	45.60	80.07

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
701.94	932.78	697.60	765.93	230.84	68.33	70.40

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
699.62	932.32	713.05	804.25	232.70	91.20	60.81

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
694.07	970.2	695.59	823.72	276.13	128.13	53.60

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
697.43	927.2	701.31	804.23	229.77	102.92	55.21

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
701.28	849.66	704.76	774.73	148.38	69.97	52.84

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700	856.2	703.36	798.04	156.20	94.68	39.39

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.51	834.72	709.73	799.95	131.21	90.22	31.24

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.23	824.21	694.15	784.7	119.98	90.55	24.53

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
698.04	727.46	693.97	718.33	29.42	24.36	17.20

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm (ทดลองครั้งที่ 1)

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
710.97	1198.27	710.52	800.52	487.30	90.00	81.53

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

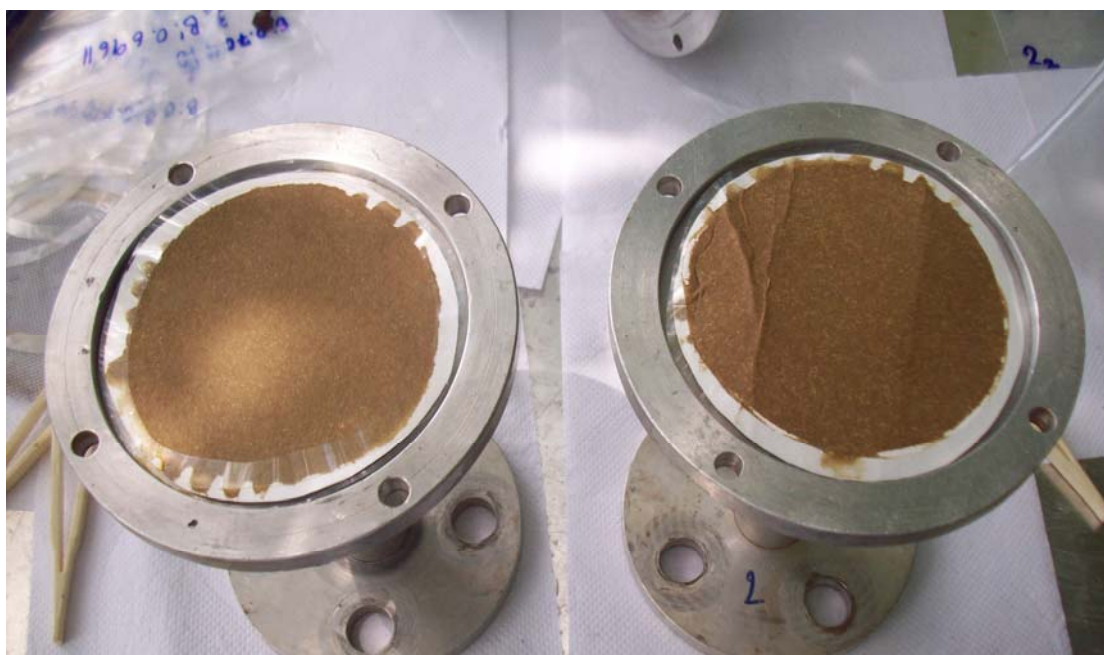
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.81	1108.82	703.96	806.75	408.01	102.79	74.81

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.10	997.89	696.11	809.06	293.79	112.95	61.55

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
698.59	948.48	702.03	807.75	249.89	105.72	57.69

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
693.97	845.43	701.03	771.94	151.46	70.91	53.18

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.25	798.89	699.42	748.1	96.64	48.68	49.63

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.65	828.2	707.37	778.87	127.55	71.50	43.94

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
700.13	823.27	697.74	785.85	123.14	88.11	28.45

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.48	801.85	710.08	785.72	99.37	75.64	23.88

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.64	758.67	704.33	751.99	56.03	47.66	14.94

ระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ 5 cm, ระยะห่างระหว่างเส้นลวด 6.4 cm (ทดลองครั้งที่ 2)

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
697.47	1099.73	715.89	785.97	402.26	70.08	82.58

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.77	1048.82	704.86	800.75	344.05	95.89	72.13

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
694.45	987.76	706.12	809.34	293.31	103.22	64.81

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
698.69	910.57	712.53	800.45	211.88	87.92	58.50

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.17	846.23	699.13	769.21	144.06	70.08	51.35

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
701.36	801.83	700.12	755.16	100.47	55.04	45.22

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
701.72	803.45	689.47	748.97	101.73	59.50	41.51

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.13	823.45	695.74	775.65	121.32	79.91	34.13

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.46	821.85	700.08	784.62	119.39	84.54	29.19

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.83	755.43	701.25	744.75	52.60	43.50	17.30

ประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกรณีติดตั้งระบบทำความสะอาดขั้วเก็บอนุภาค

ทดลองครั้งที่ 1 ติดตั้งระบบทำความสะอาด

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

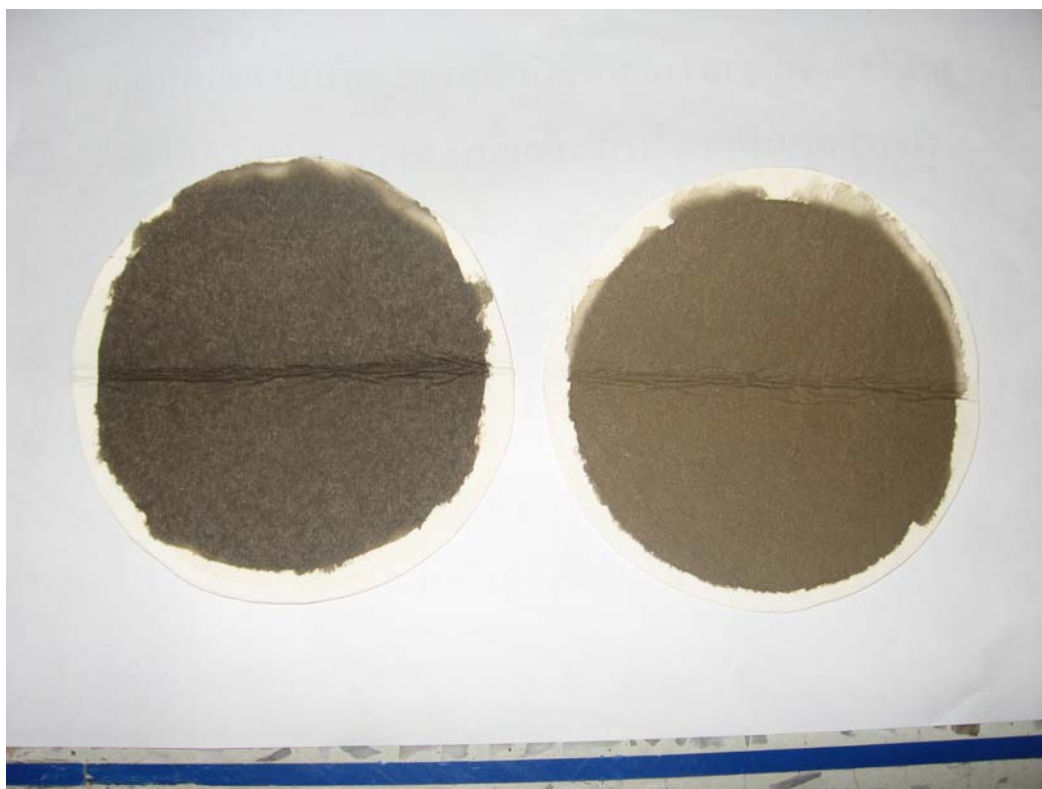
น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
706.23	1105.73	704.40	784.03	399.50	79.63	80.07

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.98	1056.94	704.44	810.66	352.96	106.22	69.91

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
698.50	898.98	711.73	777.62	200.48	65.89	67.13

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
678.69	863.54	714.23	786.45	184.85	72.22	60.93

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.23	846.23	703.16	760.02	143.00	56.86	60.24

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.23	837.83	712.12	775.16	134.60	63.04	53.16

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
707.34	833.65	709.47	758.49	126.31	49.02	61.19

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
704.06	843.55	702.04	767.06	139.49	65.02	53.39

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.76	859.86	707.18	769.01	156.10	61.83	60.39

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
699.95	855.23	701.45	777.75	155.28	76.30	50.86

ทดลองครั้งที่ 2 ติดตั้งระบบทำความสะอาด

การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 1

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
696.90	1012.93	693.73	744.51	316.03	50.78	83.93

การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 2

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
693.71	927.60	706.41	762.21	233.89	55.80	76.14

การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 3

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
702.54	754.98	693.44	712.96	52.44	19.52	62.78

การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 4

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
696.43	841.2	699.78	764.79	144.77	65.01	55.09

การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 5

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
699.2	810.88	728.75	771.45	111.68	42.70	61.77

การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 6

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
697.69	802.03	699.47	770.96	104.34	71.49	31.48

การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 7

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
701.81	791.69	702.86	741.35	89.88	38.49	57.18

การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 8

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
708.84	727.28	712.22	723.38	18.44	11.16	39.48

การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลผ่านกระดาษ 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดาษกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 9

น้ำหนักกระดาษกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดาษกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
723.56	865.45	714.03	770.11	141.89	56.08	60.48

การทดลองครั้งที่ 10

อัตราการไหลผ่านกระดวย 24 L/min

เวลาที่ใช้ในการดูดเขม่า 15 นาที

ผลการทดลอง



กระดวยกรองที่ผ่านการทดสอบที่ทางเข้า (ซ้าย) และที่ทางออก (ขวา) ในการทดสอบครั้งที่ 10

น้ำหนักกระดวยกรอง ก่อนเข้า ESP (กรัม)		น้ำหนักกระดวยกรอง ออกจาก ESP (กรัม)		น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออก จาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ก่อน ทดสอบ	หลัง ทดสอบ			
703.77	798.97	721.34	772.46	95.20	51.12	46.30

ภาคผนวก ง.

ลักษณะไดโอดแรงดันสูง (high voltage diode) No. ESJC13 9kV/450 mA

ESJC13

(9kV/450mA, 12kV/350mA)

HIGH VOLTAGE DIODE

ESJC13 is high reliability resin molded type high voltage diode in an all size package which is sealed (a multilayer mesa type silicon chip) by epoxy resin.

Features

- Low VF
- High Surge proof resistivity
- High reliability .

Applications

- Rectification for Microwave oven high voltage power supply

Maximum Ratings and Characteristics

- Absolute Maximum Ratings

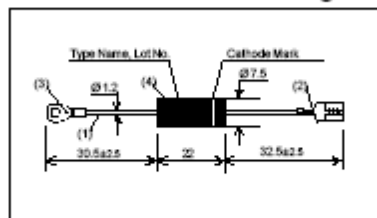
Items	Symbols	Conditions	ESJC13		Units
			-09B	-12B	
Repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RM}		9	12	kV
Average Forward Current	I_o	50HzSine half-wave average value. $T_a \leq 60^\circ C^*$	450	350	mA
Non-repetitive Peak Reverse Current	I_{RSM}	$W_p=1mS$.Rectangular-wave. One-shot. $T_a=25^\circ C$	100		mA
Non-repetitive Peak Forward Current	I_{FSM}	50HzSine half-wave peak value. One-shot. $T_a=25^\circ C$	30		A
Allowable Junction Temperature	T_j		130		$^\circ C$
Storage Temperature Range	T_g		-40 to +130		$^\circ C$

* Cooling Requirement: Cathode terminal is fastened to radiating fin
That size is more than 50mm \times 50mm \times 0.5mm and Wind-cooled velocity is more than 0.5m/s.

Electrical Characteristics ($T_a=25^\circ C$ Unless otherwise specified)

Items	Symbols	Conditions	ESJC13		Units
			-09B	-12B	
Maximum Forward Voltage Drop	V_F	$I_F=350mA$	8	10	V
Maximum Reverse Current	I_R	$V_R=12kV$	5		μA
Minimum Avalanche Breakdown Voltage	V_Z	$I_Z=100\mu A$	9.5	12.5	kV

Outline Drawings



No.	Part name	Material and type name
1	Lead wire	Ag plated Cu wire
2	Anode terminal	Flat quick-connect terminal CGS-85325-P (SANYO DENKI ELECTRONIC CO., LTD. JAPAN)
3	Cathode terminal	Crimp-type terminal lugs for copper conductor 1.25-4M
4	Molding resin	Epoxy resin UL94V-0

Cathode Mark

Type	Mark
ESJA13-09B	■ ■ ■ ■
ESJA13-12B	◆ ◆ ◆ ◆

รูปที่ 1 ไดโอดแรงดันสูง ไดโอดแรงดันสูง (high voltage diode) No. ESJC13 9kV/450 mA

ภาคผนวก จ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พิน Electrostatic precipitator for collection of particles from rubber wood combustion

ชญาศักดิ์ รัตนโชติ^{1*} พีระพงษ์ ทีฆสกุล¹ ยุทธนา ฐิระวณิชยกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร 0-7428-7036 โทรสาร 0-7421-2893 อีเมลล์ chayasak114@hotmail.com * perapong.t@psu.ac.th

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร 0-7428-8029-30 โทรสาร 0-7421-2801 อีเมลล์ yutthana.t@psu.ac.th

Chayasak Rattanachot^{1*} Perapong Tekasakul¹ Yutthana Tirawanichakul²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

Tel: 0-7428-7036 Fax: 0-7421-2893 E-mail: chayasak114@hotmail.com * perapong.t@psu.ac.th

²Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

Tel 0-7428-8029-30 Fax 0-7421-2801 E-mail: yutthana.t@psu.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พินโดยมีขนาดความกว้าง $0.5 \times 1 \times 0.5$ m มีจำนวนแผ่นเรียบ 10 แผ่น จำนวนเส้นลวด 12 เส้นต่อ 1 แถว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 1 mm ผลการทดลองเบื้องต้นปรากฏว่าเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบโดยให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 12 kV (DC) มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 58.43 % อย่างไรก็ตามควรมีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงโดยศึกษาผลของตัวแปรที่สำคัญคือระยะระหว่างแผ่นเรียบและระยะระหว่างเส้นลวด รวมทั้งขนาดของอุปกรณ์ต่อประสิทธิภาพการดักจับด้วย

Abstract

A wire-plate electrostatic precipitators (ESP) was constructed to test an efficiency in collecting smoke particles from wood burning. A $0.5 \times 1 \times 0.5$ m ESP contained 10 collecting plates and 12 1-mm electrode wires per row between plates. Maximum input voltage was 12 kV (DC). Average collection efficiency was found to be 58.43 % which is still lower than expected. Therefore and improvement of collection efficiency is necessary. This can be

achieved by adjusting the distance between plates, electrode wire and overall dimension of the device.

1. บทนำ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลมีบทบาทสำคัญเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ การใช้ไม้พินซึ่งเป็นชีวมวลที่สำคัญเพื่อให้ความร้อนก่อให้เกิดมลภาวะในรูปเขม่าควันซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเขม่าควันมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อสุขภาพเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) เป็นต้น [1-3] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการหาวิธีการควบคุมหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่าควันให้อยู่ในระดับที่ต่ำ จึงเกิดแนวคิดในการหาวิธีกำจัดหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่าซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น ห้องตกตะกอนไซโคลน ห้องถลุงกรอง เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยทุกวิธีได้มีเพื่อนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก

จากการควบคุมหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่าควันได้มีกลุ่มผู้วิจัยได้ทำการศึกษาตั้งนี้ นฤบดีและคณะ [4] สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีทอสมแดนเลสทำหน้าที่เป็นขั้วเก็บอนุภาคและมีความยาวของขั้วที่อยู่กลางทอทำหน้าที่เป็นขั้วโคโรนาจ่ายประจุให้กับ

อนุภาคสำหรับดักจับอนุภาคเขม่าควัน ในการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12.3 kV(DC) ให้กับเครื่อง ทำการติดตั้งบีมสูญญากาศ โดยตั้งอัตราการไหลที่ เพื่อการเก็บตัวอย่างเขม่าควันที่ทางเข้าและทางออก ทุกๆ 30 นาที ผลปรากฏว่า 30 นาทีแรก มีค่าประสิทธิภาพ 90%, 80% และ 75% ที่ค่าความต่างศักย์ 12.3 kV, 9.7 kV and 8.6 kV ตามลำดับ โดยค่าความต่างศักย์ทั้งหมดในช่วงนี้จะทำให้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า สถิติมีประสิทธิภาพมากที่สุด และ Kocik และคณะ [5] ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของการตกตะกอนในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่มีเส้นลวด 7 เส้น และใช้ควันบุหรี่เป็นอนุภาคที่ไหลผ่าน โดยการวัดการกระจายของอนุภาคขนาด 0.5 ถึง 8 ไมครอน ที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 0.2 และ 0.8 m/s หลังจากการตกตะกอนลงบนขั้วเก็บประจุเรียบร้อยแล้ว ซึ่งในการทดลองที่ความเร็วลมและความต่างศักย์ต่างๆ นั้นจะทำการสลับขั้วบวกและขั้วลบเข้ากับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบผลปรากฏว่า ถ้าใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วลบเป็นตัวแทนิวานาที่ความต่างศักย์ 16 kV (DC) จะทำให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าจากขั้วบวกที่ความเร็วลมเฉลี่ย 0.2 และ 0.8 m/s และความต่างศักย์ 16 kV (DC) Tekasakul และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในโรงรมยาง โดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดท่อ-เส้นลวดพบว่า มีประสิทธิภาพเหมาะกับการใช้งานแต่รูปร่างยังไม่เหมาะสมจึงต้องมีการพัฒนาต่อ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักเขม่าจากการเผาไหม้ไม่พินเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการกำจัดปริมาณอนุภาคเขม่าสูง มีรูปร่างที่เหมาะสม มีความสูญเสียความดันที่ต่ำ มีประสิทธิภาพสูง และมีค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมวิธีอื่น เพื่อทำการทดลองและคำนวณประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎี

กระบวนการเกาะติดของอนุภาคบนขั้วเก็บประจุของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิด เส้นลวด-แผ่นเรียบ

สำหรับความเข้าใจพื้นฐานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนคือ การใส่ประจุ การเก็บอนุภาค และการกำจัดอนุภาคที่เก็บแล้ว

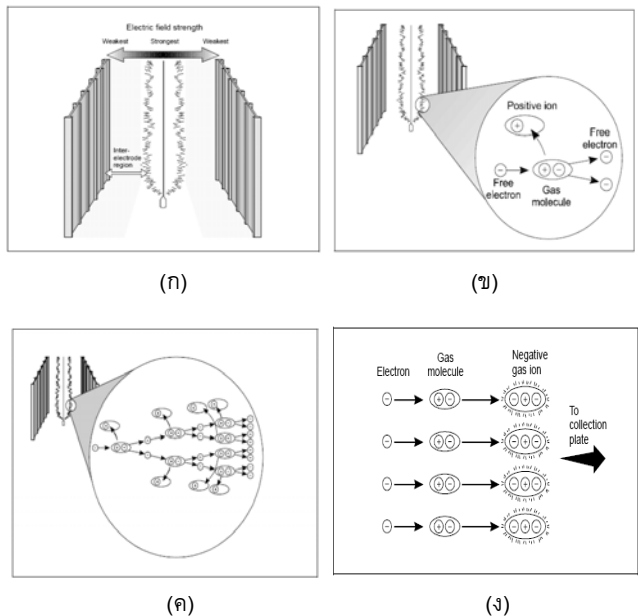
เริ่มต้นด้วยการเหนี่ยวนำให้เส้นลวดเป็นประจุลบและให้ขั้วเก็บประจุเป็นประจุบวก ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และที่เส้นลวดจะสร้างอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นมา ตัวอิเล็กตรอนอิสระนี้จะเป็นตัวทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ไหลผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) เปลี่ยนเป็นไอออนบวกและทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นมาอีกเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ ขั้วปล่อยประจุและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไปรวมตัวกับอนุภาคที่ไหลผ่านมาทำให้ตัวอนุภาคมีประจุลบเกินมาดังนั้นจึงเคลื่อนตัวไปเกาะติดบนขั้วเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 1 (ง) ซึ่งทำให้เกิดการเกาะติดอยู่บนขั้วเก็บประจุ [7]

ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคเขม่า (Collection Efficiency)

การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า (η) สถิติสามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch – Anderson [8]

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-u_e A_c}{Q}\right) \tag{1}$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการเก็บ, A_c คือ พื้นที่ผิวของขั้วเก็บ (m²), Q คือ ปริมาณการไหลของก๊าซที่เข้าเครื่อง (m³/s), u_e คือ ความเร็วของการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (m/s)



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบ (ก) การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (ข) อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น (ค) อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นอย่างทวีคูณ (ง) การเคลื่อนของอนุภาคไปเกาะติดที่ขั้วเก็บประจุ

ความเร็วของการเคลื่อนย้ายอนุภาค (The Electrical Drift Velocity of Particles)

ความเร็วของการเคลื่อนย้ายอนุภาค (u_e) คำนวณได้จาก [9]

$$u_e = \frac{n(t)eEC_c}{3\pi\mu d_p} \tag{2}$$

เมื่อ $n(t)$ คือ จำนวนการประจุบนอนุภาค, e คือ ประจุของอิเล็กตรอน (คูลอมบ์/อิเล็กตรอน) (1.6×10^{-19}), E คือ ความแรงของสนามไฟฟ้า (Volt/m), μ คือ ความหนืดของก๊าซ (N.s/m²), C_c คือ ตัวชดเชยของคันทิงแฮม

ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (The Cunningham Correction Factor)

ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (C_c) คำนวณได้จาก [10]

$$C_c = 1 + \frac{2.52 \lambda}{d_p}; \text{ For } d_p > 0.1 \text{ micron} \quad (3)$$

โดยที่ λ คือระยะทางอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล (micron)

ความแรงของสนามไฟฟ้า (The Electrical Field Strength In The Wire-Plate)

การคำนวณความแรงสนามไฟฟ้า (E) คำนวณได้จาก [9]

$$E = \frac{V}{W_p} \quad (4)$$

โดยที่ V_w คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใส่ (V), W_p คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเรียบ (m)

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าหรือ การแพร่เชิงความร้อน (thermal diffusion) ดังนั้นการคำนวณจำนวนประจุอนุภาคคำนวณได้จากการใช้ประจุแบบแพร่เชิงความร้อน ($n_d(t)$) (diffusion charging) และหรือ จำนวนประจุอนุภาคจากการให้ประจุสนามไฟฟ้า ($n_f(t)$) (field charging) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

การแพร่เชิงความร้อน (Diffusion Charging)

การคำนวณจำนวนประจุอนุภาคคำนวณได้จากการใช้ประจุแบบแพร่เชิงความร้อน ($n_d(t)$) คำนวณได้จาก [9]

$$n_d(t) = \frac{d_p K T}{2 K E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K E d_p C_i e^2 N_i t}{2 k T} \right] \quad (5)$$

เมื่อ d_p คือ ขนาดของอนุภาค (m), k คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์ (1.38×10^{-23} J/K), K_E คือ ค่าคงที่จากสมการของคูลอมบ์ (9×10^9 Nm²/C²), C_i คือคือ ความเร็วอุณหภูมิเฉลี่ยของไอออน (240 m/s), N_i คือ ค่าความเข้มข้นของไอออน, t คือ เวลาที่เริ่มนับจากการใส่ประจุ (sec), T คือ อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน (K)

การคำนวณค่าความเข้มข้นของไอออน (N_i) คำนวณได้จาก [9]

$$N_i = \frac{I}{e Z_i E A_c} \quad (6)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่าย (A)

การให้ประจุแบบสนาม (Field Charging)

การคำนวณจำนวนประจุอนุภาคจากการให้ประจุแบบสนาม ($n_f(t)$) คำนวณได้จาก [9]

$$n_f(t) = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{E d_p^2}{4 K E e} \right) \left(\frac{\pi K E e Z_i N_i t}{1 + \pi K E e Z_i N_i t} \right) \quad (7)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค Z_i คือ การเคลื่อนย้ายไฟฟ้าของไอออน

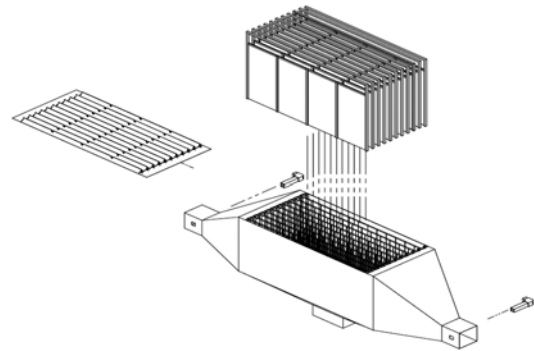
ดังนั้นจำนวนประจุโดยรวม ($n(t)$) คำนวณได้จาก [9]

$$n(t) = n_f(t) + n_d(t) \quad (8)$$

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีวิจัย

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด - แผ่นเรียบ

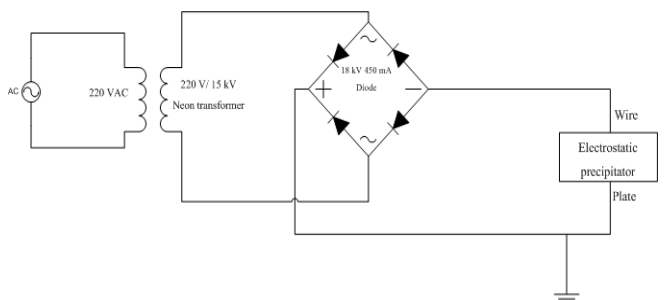
ขนาดของเครื่องที่ออกแบบเพื่อการทดสอบสามารถคำนวณขนาดจากสมการ (1), (2) และ (4) โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในเชิงทฤษฎี ซึ่งทำให้ได้ขนาดความกว้าง $0.5 \times 1 \times 0.5$ m มีจำนวนแผ่นเรียบ 10 แผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2 จำนวนเส้นลวด 12 เส้นต่อ 1 แถว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 0.001 m ระยะระหว่างแผ่นขั้วบวก 2.5 cm และระยะห่างระหว่างเส้นลวดขั้วลบ 8.3 เซนติเมตร



รูปที่ 2 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเส้นลวด-แผ่นเรียบ

3.2 ชุดวงจรสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้า

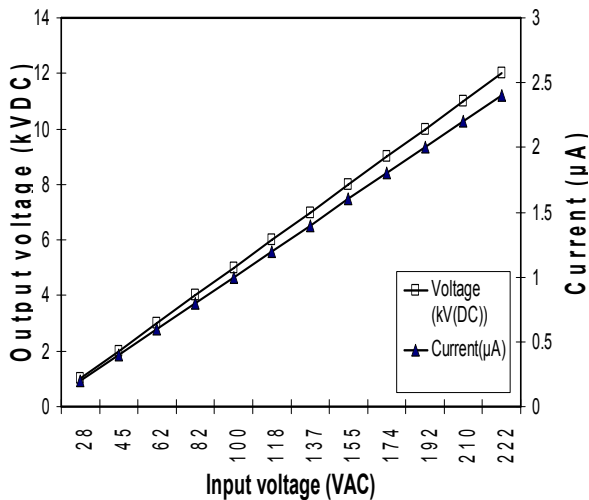
วงจรประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ high voltage transformer ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V(AC) เป็น 15 kV(AC) ในเชิงทฤษฎี โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA แบบ high voltage transformer และใช้ไดโอด สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 18kV นำมาต่อเป็นวงจร bridge rectifier เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดย diode แต่ละตัวที่อยู่ในหน้าหม้อแปลงเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟของ diode แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะต่อเข้ากับมุมของวงจร bridge rectifier และ output จะถูกนำออกที่สองมุมที่เหลือแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 3 และผลจากการทดลองวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าแสดงในกราฟรูปที่ 4 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 12 kV (DC)



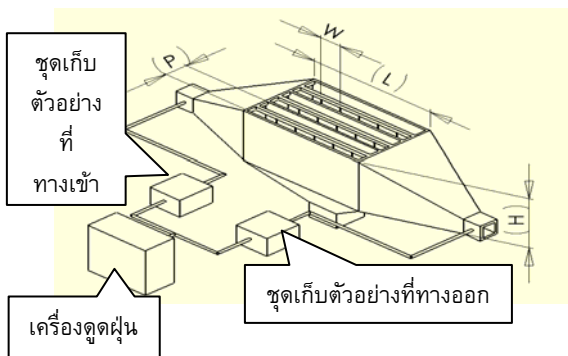
รูปที่ 3 โดอะแกรมแสดงวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

เตรียมแผ่นกระดาษกรอง นำกระดาษกรองเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น (50% RH) เป็นเวลา 3 วัน เมื่อนำกระดาษกรองออกจากตู้ควบคุมความชื้นทำการชั่งน้ำหนักของกระดาษกรองและควรให้อุณหภูมิห้องมีอุณหภูมิต่ำกว่า 25 °C และ ควรให้ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50 % RH จากนั้นนำกระดาษกรองต่อเข้ากับตัวยึดเพื่อเก็บตัวอย่างของอนุภาคเขม่าที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพื่อดูดเขม่าควันผ่านกระดาษกรองดังแสดงในรูปที่ 5 โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 และ 2 อัตราการไหลของเขม่าผ่านกระดาษกรอง 94.7 lpm เวลาในการดูดเขม่า 8 นาที ครั้งที่ 3 อัตราการไหลของเขม่าผ่านกระดาษกรอง 94.7 lpm เวลาในการดูดเขม่า 5 นาที นำกระดาษกรองที่มีตัวอย่างของอนุภาคเขม่าเกาะติดเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน เมื่อนำกระดาษ กรองออกจากตู้ควบคุมความชื้นทำการชั่งน้ำหนักของกระดาษกรองและควรให้อุณหภูมิห้องมีอุณหภูมิประมาณ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 50 % RH



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลของวงจร Bridge Rectifier ระหว่าง Input voltage (V (AC)) & Output voltage (kV (DC)) & Current (µ A)



รูปที่ 5 โดอะแกรมแสดงการต่อชุดเก็บตัวอย่างเข้ากับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

คำนวณหาประสิทธิภาพในการดักเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เมื่อทราบมวลของกระดาษกรองก่อนการทดลองและมวลของกระดาษกรองหลังการทดลองสามารถคำนวณหามวลของอนุภาคและความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าที่จุดนั้นๆ โดยการคำนวณดังนี้

การคำนวณมวลของอนุภาคเขม่าควัน คำนวณได้จาก

$$M_{dust} = M_f - M_i \tag{9}$$

เมื่อ M_{dust} คือ มวลของอนุภาคเขม่าควัน (mg), M_f คือ มวลของกระดาษกรองหลังการทดลอง (mg), M_i คือ มวลของกระดาษกรองก่อนการทดลอง (mg)

การคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคเขม่า คำนวณได้จาก

$$C_{dust} = \frac{M_{dust}}{V} \tag{10}$$

เมื่อ C_{dust} คือ ความเข้มข้นของอนุภาคเขม่า (mg/m^3), V คือ ปริมาตรที่ไหลผ่านกระดาษกรอง (m^3)

การคำนวณอัตราการไหลที่ผ่านกระดาษกรอง คำนวณได้จาก

$$V = Qt \tag{11}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลที่ผ่านกระดาษกรอง (m^3/sec), t คือ เวลาในการเก็บตัวอย่าง (sec)

การคำนวณประสิทธิภาพในการดักเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต คำนวณได้จาก

$$\eta = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \tag{12}$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการดักเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, C_i คือ ความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าทางเข้าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, C_f คือ ความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

5. ผลการทดลอง

ทำการทดลองโดยการเก็บตัวอย่างกระดาษกรองนำมาเปรียบเทียบน้ำหนักเขม่าจากชุดเก็บตัวอย่างที่ทางเข้าและที่ทางออกซึ่งผลการทดลอง 3 ครั้ง มีประสิทธิภาพที่ต่างกันดังนี้ ครั้งที่ 1 และ 2 ประสิทธิภาพที่ได้ใกล้เคียงกันมากเนื่องจากทดลองที่อัตราการไหล 94.7 lpm และใช้เวลาในการดูดเขม่า 8 นาทีเท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากการทดลองในครั้งที่ 3 อัตราการไหล 94.7 lpm แต่ใช้เวลาในการดูดเขม่า 5 นาที ซึ่งความเข้มข้นของอนุภาคเขม่าควันเริ่มเบาบางลง จึงทำให้ได้ประสิทธิภาพในครั้งที่ 3 ต่ำที่สุด ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลอง 3 ครั้ง

ครั้งที่	น้ำหนักอนุภาคก่อนเข้า ESP (กรัม)	น้ำหนักอนุภาคออกจาก ESP (กรัม)	ประสิทธิภาพ ESP (%)
1			
2			
3			

1	0.45231	0.15655	65.39
2	0.37952	0.14549	61.66
3	0.16389	0.08482	48.25

จากผลการทดลองประสิทธิภาพที่ได้ยังไม่สูงนักดังนั้นจึงต้องปรับปรุงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การจัดวางตำแหน่งของเส้นลวด-แผ่นเรียบและขนาดของของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวดและแผ่นเรียบให้เหมาะสม การเพิ่มพื้นที่แผ่นเรียบเพื่อดักจับเขม่าได้มากขึ้น

6. สรุป

จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้งมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 58.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้มีต่ำกว่าค่าในเชิงทฤษฎี (80 %) เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาคก่อนเข้าสู่ห้องสูง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้สูงขึ้นเหมาะกับการดักจับเขม่า

เอกสารอ้างอิง

- Furuuchi, M., Tekasakul, P., Murase, T., Otani, Y., Tekasakul, S. and Bai, Y. "Characteristics of particulates emitted from rubber-wood burning," J. Ecotech. Res., 12(1-2), 135-139, 2006
- Bai, Y., Furuuchi, M., Tekasakul, P., Tekasakul, S., Choosong, T., Aizawa, M., Hata, M. and Otani, Y. "Application of soft X-rays in the decomposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in smoke particles from biomass fuel burning," Aerosol and Air Quality Research, 7(1), 79-94, 2007. (March-May)
- Tekasakul, P., Furuuchi, M., Tekasakul, S., Chomanee, J. and Otani, Y. "Characteristics of PAHs in particulates in atmospheric environment of the city of Hat Yai, Thailand and relation with rubber-wood burning in rubber sheet production," Aerosol and Air Quality Research, Accepted, 2008.
- นฤบดี ศรีสังข์, จรัสชัย เย็นพยับ, พีระพงศ์ ทีฆสกุล, วชร กาลาสี. 2549. "ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2018 – 20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- M. Kocik, J. Dekowski, J. Mizeraczyk, 2005. "Particle precipitation efficiency in an electrostatic precipitator," Journal of Electrostatics 63 761-766.
- Tekasakul, S., Tantichaowanant, M., Otani, Y., Kuruhongsa, P. and Tekasakul, P. "Removal of soot particles in rubber smoking chamber by electrostatic precipitator to improve rubber sheet color," Aerosol and Air Quality Research, 6(1), 1-14, 2006.
- White, H. J., 1977. "Electrostatic precipitation of fly ash," APCA Reprint Series, Journal of Air Pollution Control Association. Pittsburgh, PA.
- Mizuno, A., 2000. "Electrostatic Precipitator," IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, No.5, 615-624.
- พานิช อินต๊ะ, 2548. "เทคนิค เครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม", ปีที่ 22 ฉ. 252 ส.ค 2548.
- Cunningham. E., 1910. "On the velocity of steady fall of spherical particle through fluid medium", Proceeding of the Royal Society, A-83,357-365.

Electrostatic precipitator for collection of smoke aerosol particles from wood combustion

C. Ruttanachot^{1*}, P. Tekasakul¹, Y. Tirawanichakul² and M. Furuuchi³

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, THAILAND

²Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, THAILAND

³Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa 920-1162, JAPAN

ABSTRACT

A simple wire-plate electrostatic precipitators (ESP) was constructed to test efficiency in collecting smoke particles from combustion of rubber-wood that is used as a source of biomass-thermal energy in industries. A 0.72 x 1.3 x 0.62 m ESP contains maximum of 15 collecting plate electrodes and 20 1-mm-diameter electrode wires per row between plates. Maximum input voltage of the Wheatstone bridge circuit using a high-voltage neon transformer was 22 kV (DC). The gap between plates and the spacing between wires can be adjusted. The field-test results in a burner indicated that the device could be used for a period of about 1 hours before cleaning of the electrodes is required. The collection efficiency is decreased during the course of wood burning as the dust loading is increased. The maximum efficiency wires are about 83 % during the initial period. In the practical use of the equipment, a proper cleaning mechanism for the plate electrodes is needed.

Keywords : electrostatic precipitator, wire and plate, smoke particles, wood burning

Corresponding author: E-mail: chayasak114@hotmail.com, Tel: 0-7428-7036 Fax: 0-7421-2893

INTRODUCTION

Nowadays, Biomass is a major source of renewable energy. Wood is an important biomass fuel but its combustion leads to pollution in the form of smoke particles containing numerous chemical components, for example, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [1-3]. To efficiently use the fuel wood, a proper gas cleaning or aerosol collection devices must be used to control smoke emission level. Electrostatic precipitator has been widely used in power plants. Many types of the electrostatic precipitator were investigated including attempts to collect aerosol from wood combustion [4-6]. However, appropriate low-cost simple-to-operate ESPs for small-scale industries have not been developed.

In this work, a simple ESP was built and collection characteristics were tested for various parameters in order to obtain appropriate dimension of the ESP applicable for small-scale industries using wood as a source of energy.

EQUIPMENT

Wire-plate electrostatic precipitators

The ESP used in this work was a wire-plate type. It was designed so that it could fit into any passage of hot gas from wood combustion. A 0.72 x 1.3 x 0.62 m ESP contains maximum of 15 collecting plate electrodes and 20 1-mm-diameter electrode wires per row between plates. The collecting plate was made of a 0.554 x 1.215 m stainless steel as shown in Fig. 1.

Electrical components

A high-voltage neon transformer was used to transform the input voltage from 220 V(AC) to 15 kV(AC). A simple Wheatstone bridge circuit was used to rectify the AC current to DC current (Fig. 2).

High voltage diodes (maximum voltage of 22 kV) were used to form the bridge circuit. Output of the circuit was not a real DC current but containing ripples. However, this simple circuit was sufficient for the purpose of smoke particle collection. The negative polar of the Wheatstone bridge circuit was applied to copper wire electrodes and the positive polar was applied to the collecting plate electrodes of the ESP. The output voltage from a Wheatstone bridge circuit varies almost linearly for input voltage of 0-220 V-rms (AC) as shown in Fig. 3.

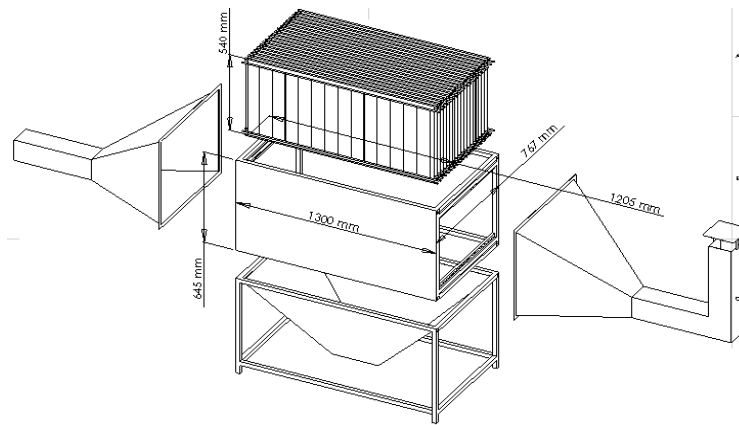


Fig. 1 Model of an ESP used in collection of smoke particles from wood burning.

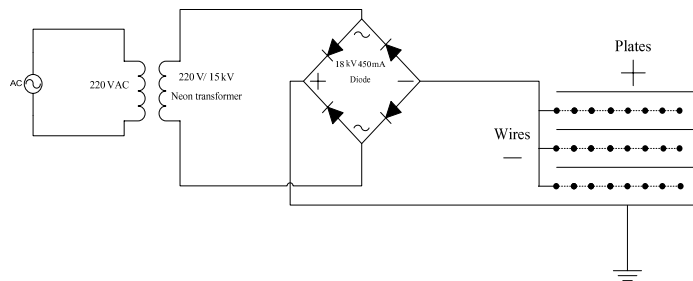


Fig 2 Diagram of the direct current high-voltage circuit.

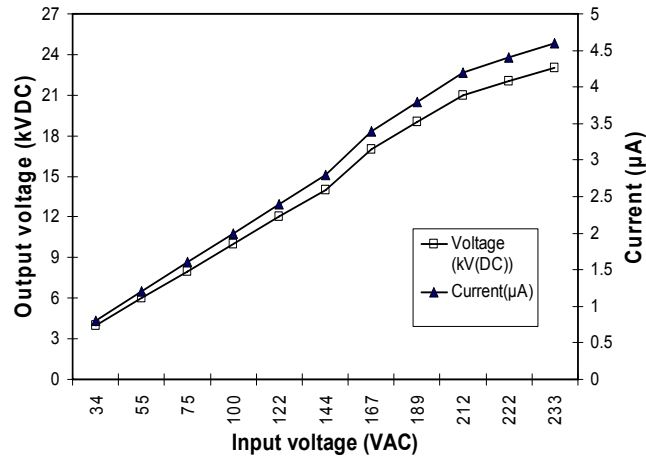


Fig 3 Output voltages and currents from the bridge circuit for various input voltages.

EXPERIMENTS

The collection efficiency from experiment can be calculated from

$$\eta = 1 - \frac{c_{exit}}{c_{inlet}} \quad (1)$$

Where c_{inlet} and c_{exit} are concentrations of particles at the inlet and exit of the ESP.

Inlet and exit concentrations of smoke particles were obtained experimentally by upstream and downstream samplings using HEPA filters as collecting media and vacuum pumps, orifice meters and valves as flow driving and regulating devices (Fig. 4). Sampling flow rate was set at 24 L min^{-1} . Each sampling period took 15 minutes. Two samplings were taken in an hour for a total sampling period of 5 hrs.

Before sampling, the filters were treated in a desiccators controlled at constant temperature and relative humidity (25°C and $50\% \text{ RH}$) for at least 72 hours. The filters were then weighed using a five-digit readability analytical balance (Sartorius, CP225D). After sampling, the filters were treated under the same conditions. Then the weight of the collected particles on the filter sample was measured using the identical balance.

The experimental results were compared to those calculated from the Deutsch-Anderson equation [7]

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-V_{TE} A_c}{Q}\right) \quad (2)$$

Here A_c is the collection surface area, Q is the flow rate, and V_{TE} is the terminal electric velocity. Detail of the Deutsch-Anderson equation is given in [7].

Experimental parameters including distance between collecting plate electrodes (d_c) and distance between wires electrodes (d_w) in the experiments are shown in Table 1.

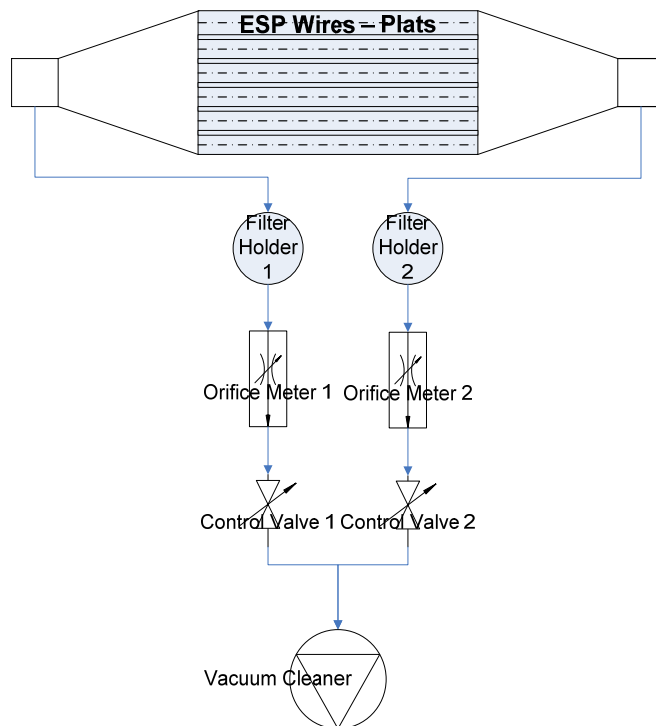


Fig. 4. Diagram of sampling equipment.

Table 1: Conditions in the experiments to determine collection efficiency of a wire-plate electrostatic precipitator

Distance between collecting plate electrodes (d_c) (cm)	Distance between wire electrodes (d_w) (cm)	Number of wire per row	Total collecting plate electrodes
5	8.5	15	15
5	6.4	20	15
7.5	8.5	15	10
7.5	6.4	20	10

RESULTS AND DISCUSSION

Results obtained from the field test operated under dust loading condition are shown in Fig. 5. In this graph, the collection efficiency is plotted against the dust-loading parameter (cvt); where c is the particle mass concentration, v is the aerosol velocity in the collecting device, and t is the collection time. The collection efficiency for every case is shown to be maximum at the initial periods and to decrease as the dust loading increases. This is because the discharge current decreases due to particle deposition on the surface during 5 hours of operation in the test burner. Higher collection efficiency was found to take place

when the distances between collecting plate electrodes and between the wires electrodes are reduced. When the distance between collecting plate electrodes is reduced to 5 cm, the distance between the wire electrodes appears to play an insignificant role in enhancing the efficiency. In practice, this distance (5 cm) is minimum for safe operation. The efficiency is reduced from about 83% to 70% when cvf is about 2 kg/m^2 which is corresponding to about 2 hours of operation. When using in the real situation, an electrode cleaning is then required at least after every 2 hours in order to ensure sufficient collection efficiency.

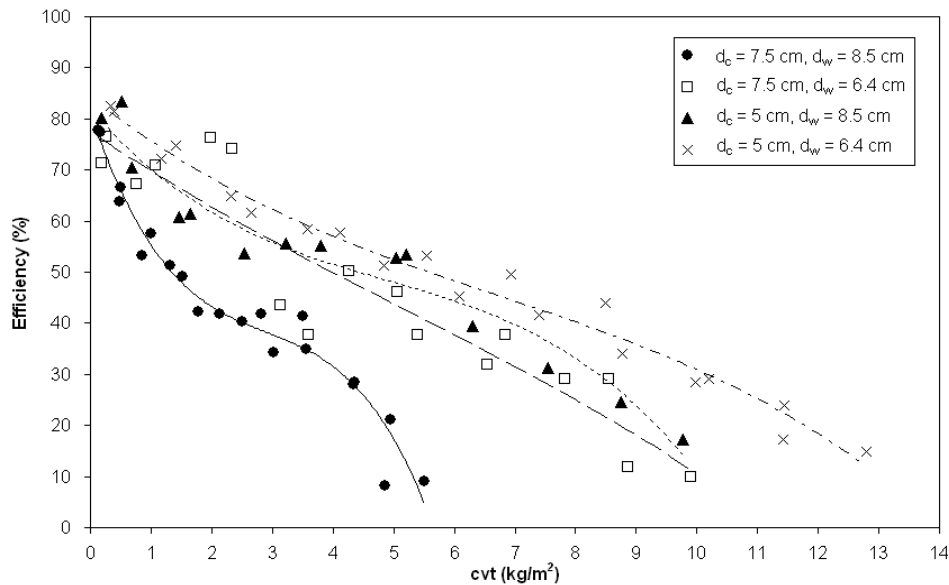


Fig. 5 Collection efficiency of the ESP device at dust-loaded condition.

CONCLUSION

From the experiment, direct current 22 kV(DC) was supplied to the ESP. The maximum efficiency was found to be about 83 % during the initial period. The collection efficiency was shown to decrease as the dust loading is increased. The results show that the distance between the collecting plate electrodes has greater influence to the efficiency than the distance between the wire electrodes. In practice, minimum distance between the collecting plate electrodes is about 5 cm for safe operation. The efficiency is reduced from about 83% to 70% when cvf is about 2 kg/m^2 which is corresponding to about 2 hours of operation. Electrode cleaning is then required after every 1 hour in order to ensure sufficient collection efficiency.

REFERENCES

- [1] Furuuchi, M., Tekasakul, P., Murase, T., Otani, Y., Tekasakul, S. and Bai, Y. (2006), 'Characteristics of Particulates Emitted from Rubber-Wood burning,' *Journal of Ecotechnology Research*, 12(1-2), pp 135-139.
- [2] Bai, Y., Furuuchi, M., Tekasakul, P., Tekasakul, s., choosong, T., Aizawa, M., Hata, M. and Otani, Y. (2007), 'Application of Soft X-rays in the Decomposition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Smoke Particles from Biomass Fuel Burning,' *Aerosol and Air Quality Research*, 7(1), pp 79-94.
- [3] Tekasakul, P., Furuuchi, M., Tekasakul, S., Chomanee, J. and Otani, Y. (2008), 'Characteristics of PAHs in particulates in atmospheric environment of the city of Hat Yai, Thailand and relation with rubber-wood burning in rubber sheet production,' *Aerosol and Air Quality Research*, 8(3), pp 265-278.
- [4] Srisang, N., Yenphayab, C., Tekasakul, P., and Kalasee, W. (2006), 'The Soot Particles Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator. Part II: The Effect of Voltage,' *Conference of the*

mechanical engineering network of Thailand 20th, Suranaree University of Technology, October 18-October 20.

- [5] Kocik, M., Dekowski, J., Mizeraczyk, J. (2005), 'Particle precipitation efficiency in an electrostatic precipitator,' *Journal of Electrostatics*, 63(6-10), pp 761-766.
 - [6] Tekasakul, S., Tantichaowanani, M., Otani, Y., Kuruhongsa, P. and Tekasakul, P. (2006), 'Removal of soot particles in rubber smoking chamber by electrostatic precipitator to improve rubber sheet color,' *Aerosol and Air Quality Research*, 6(1), pp 1-14.
 - [7] White, H. J. (1963), *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, pp 3-4 – 3-5
-

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายชญาศักดิ์ รัตนโชติ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120011		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่	2549	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี 2550-2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชญาศักดิ์ รัตนโชติ, พีระพงษ์ ทิมสกุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชกุล, “เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พื้น”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, หน้า 13

C. Ruttanachot, P. Tekasakul, Y. Tirawanichakul and M. Furuuchi, “Electrostatic precipitator for collection of smoke aerosol particles from wood combustion”, Asian Aerosol Conference AAC09, Bangkok, Thailand, Nov 24-27, 2009, pp. 105