



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)

ปริญญา

วิศวกรรมความปลอดภัย

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกากของเสียอันตราย

A Study on the Adsorption System for the Volatile Organic Compounds
in Hazardous Waste Storage Tank

นามผู้วิจัย นายศักดิ์เกษม สายไหม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ธงไชย ศรีนพคุณ, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์พิรุณ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกากของเสียอันตราย

A Study on the Adsorption System for the Volatile Organic Compounds
in a Hazardous Waste Storage Tank

โดย

นายศักดิ์เกษม สายไหม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)

พ.ศ. 2552

ศักดิ์เกษม สายไหม 2552: การศึกษาระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกาก
ของเสียอันตราย ปริญญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)
สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร, วศ.ม.
121 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกาก
ของเสียอันตรายที่ได้จากการแยกเอาน้ำมันออกจากน้ำของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน
อุตสาหกรรมแห่งหนึ่งก่อนส่งกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ โดยประมาณการด้วยวิธีการคำนวณการ
ระเหยทั้งหมด (Total loss) ทั้งจากขณะที่มีการทำงาน (Working loss) และการระเหยขณะที่ไม่มี
การปฏิบัติงานถึงอยู่กับที่ (Breathing loss) พร้อมทั้งออกแบบระบบควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่าย
ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดเพื่อตรวจสอบหาว่ามีสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิด
ใดบ้างที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียและคำนวณอัตราการระเหยทั้งหมดได้เท่ากับ Benzene 5.48×10^{-3} ,
Ethylbenzene 3.54×10^{-5} , Styrene 1.65×10^{-4} , Toluene 1.38×10^{-3} , o-Xylene 9.00×10^{-6} , m&p-
Xylene 7.92×10^{-6} , Phenol 1.28×10^{-13} and m&p-cresol 1.65×10^{-15} Mg/yr ตามลำดับ นำข้อมูลที่ได้
ไปหาความหนาของชั้นสารดูดซับโดยปรับอัตราการไหลของอากาศเสียเท่ากับ 100, 200, 300,
400, 500 และ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และภายใต้การออกแบบที่อัตราการไหลของอากาศเสีย
เท่ากับ 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับ 10 นิ้วน้ำ ระยะเวลาในการดูดซับ
30 วัน จะได้ความหนาของชั้นสารดูดซับ 3.13 ฟุต ความเร็วที่ 75 ฟุตต่อนาที และพื้นที่หน้าตัด
2.67 ตารางฟุต

นอกจากนี้ยังสามารถเลือกออกแบบที่ความดันตกคร่อมต่างๆ คือ 12, 14, และ 16 นิ้วน้ำ
จะได้ความหนาของชั้นสารดูดซับ 3.50, 3.75 และ 3.94 ฟุต ความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านชั้น
สารดูดซับที่ 82, 86 และ 90 ฟุตต่อนาที พื้นที่หน้าตัดของชั้นสารดูดซับ 2.44, 2.33 และ 2.22
ตารางฟุต ทั้งหมดตามลำดับ

Sakkasem Saimai 2009: A Study on the Adsorption System for the Volatile Organic Compounds in a Hazardous Waste Storage Tank. Master of Engineering (Safety Engineering), Major Field: Safety Engineering, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Associate Professor Montree Pirunkaset, M.Eng. 121 pages.

Research purpose is used for studying the adsorption system Volatile organics compound of oil container which's received from separation oil from waste water treatment before disposal. Studying method is estimated the overall working loss calculation and breathing loss during room temperature including the design of volatile organics compounds control system before emitting into atmosphere. For protection of the employee and control environmental.

In order to analyze the volatile organics compound in the waste water treatment system on the sampling water from the waste water treatment system. The sampling results were found that total loss of Benzene 5.48×10^{-3} , Ethylbenzene 3.54×10^{-5} , Styrene 1.65×10^{-4} , Toluene 1.38×10^{-3} , o-Xylene 9.00×10^{-6} , m&p-Xylene 7.92×10^{-6} , Phenol 1.28×10^{-13} and m&p-cresol 1.65×10^{-15} Mg/yr respectively. Then it would be to calculate the emission VOC. These data were used to design the depth of activated carbon at the flow rate of 100, 200, 300, 400, 500 and 600 ft³/min. Under the design conditions at 200 ft³/min., total pressure loss 10 inch water and the adsorption period of 30 days, it was found that the depth of activated carbon was 3.13 ft, the velocity of VOC through activated layer 75 ft/min and the cross sectional area of 2.67 ft².

It can also selected the total pressure drop of 12, 14, and 16 inch water for design conditions. Accordingly, we would obtain other operation points as the depth of activated carbon was 3.50, 3.75 and 3.94 ft, the velocity of VOC through activated layer 82, 86 and 90 ft/min and the cross sectional area of 2.44, 2.33 and 2.22 ft² respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ชงไชย ศรีนพคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขปัญหาดตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่ง จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเกียน คุณแม่โชนง สายไหม และพี่ๆ ทุกคน ที่ได้อบรมเลี้ยงดู สนับสนุน ข้าพเจ้าด้วยความรักและความหวังดีตลอดมาจนถึงปัจจุบัน ขอขอบคุณเพื่อนๆ วิศวกรรมความปลอดภัยรุ่นที่ 7 และผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด รวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร. วราวุธ เสือดี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยดี

ศักดิ์เกษม สายไหม

ตุลาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	40
ผลและการวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ Total loss และการออกแบบระบบดูดซับ	60
ภาคผนวก ข กราฟความดันตกคร่อมถ่านกัมมันต์	110
ภาคผนวก ค ความเข้มข้นของสารเคมีที่เกินกว่าจะรับได้	112
ภาคผนวก ง ภาพตารางการแปลงหน่วย	117
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างของ Halogenated hydrocarbons ที่พบได้ในสิ่งแวดล้อม	5
2	คุณสมบัติของสารดูดซับ Activated Carbon (Marchello, 1976)	13
3	การดูดซับ ไอและแก๊ส โดย Activated Carbon (ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 0.01 psia)	16
4	พารามิเตอร์ Freundlich Isotherm ของแก๊สหรือไอบางชนิด	18
5	พารามิเตอร์การดูดซับสำหรับ Activate Carbons	20
6	ค่า W_c และ K สำหรับไอสารบางชนิดบน BC-AC Activated Carbon ^a 6x10 mesh	21
7	ดัชนีการหักเหของสาร VOCs (วัดที่ 25° C)	23
8	การตรวจสอบและการประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบดูดซับ	31
9	ความขรุขระของท่อ	38
10	ผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ในของเหลวในถังเก็บสารเคมี	45
11	ผลการคำนวณอัตราการระเหยทั้งหมด	46
12	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ในการดูดซับ 2 ในช่วงระยะเวลา 2 เดือนโดยการระเหยตามธรรมชาติ	47
13	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้จากการคำนวณโดยการออกแบบให้มีความเร็ว 221.89 ft ³ /min	48
14	ตารางการออกแบบถังดูดซับ	48
15	ตารางแสดงขนาดของเครื่องอัดอากาศที่อัตราการไหล 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยกำหนดขนาดท่อส่ง 4 นิ้ว ความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับ 18 นิ้วน้ำ	52
16	ตารางการประเมินราคากระบบดูดซับ	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ข้อมูลของสารแต่ละชนิด	61
ก2 ข้อมูลของถังเก็บของเสียอันตรายที่ได้จากระบบบำบัด	61
ก3 ตัวคูณสีต่างๆ ของถังเก็บ	68
ก4 ค่า n_i ของสารต่างๆ	74
ก5 ค่าที่ใช้ในการคำนวณ Affinity coefficient	75
ก6 ค่าต่างๆ สำหรับคำนวณความสามารถในการดูดซับ	77
ก7 ตารางต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณถ่านกัมมันต์	80
ก8 ค่าต่างๆ ที่ใช้คำนวณ Mole fraction	84
ก9 ตารางออกแบบระบบดูดซับโดยกำหนดเปลี่ยนสารดูดซับ 60 วัน	100
ก10 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ตามระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	104
ก11 ค่า K ที่ใช้ในการคำนวณความสูญเสียตรง	104
ก12 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25°	104
ค1 TLVs and PELs for a Variety of Chemical Substances	113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างของสาร VOC	5
2	แสดงระบบภาวะมลพิษทางอากาศ	6
3	Packed Column ที่พบโดยทั่วไป	8
4	เตาเผาไหม้ตาม (after burner)	9
5	องค์ประกอบของเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	10
6	ระบบการกรองชีวภาพ (Bio filtration)	11
7	กลไกการดูดซับ	15
8	Adsorption Isotherm สำหรับ Carbon Tetrachloride ใน Activated Carbon	17
9	แสดงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ	24
10	การเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ	25
11	อัตราความต้องการไอน้ำต่อปอนด์ของสารถูกดูดซับ	26
12	ความดันตกกับความเร็วแก๊สในระบบดูดซับ	27
13	ระบบดูดซับแบบ 3 ถังแนวตั้ง	28
14	ระบบดูดซับวางในแนวระดับ	28
15	ความยาวของ MTZ สัมพันธ์กับความเร็ว	29
16	ประสิทธิภาพการดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์	30
17	ระบบน้ำเสียแห่งหนึ่ง	33
18	แผนภาพการเก็บรวบรวมข้อมูล	40
19	ออกแบบระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการระเหยแบบธรรมชาติ	42
20	ออกแบบระบบดูดซับโดยการกำหนดความเร็ว	43
21	แสดงความลึกของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านแสดง ความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่าน ที่ความดันตกออกแบบ 18 นิ้วน้ำ อัตราการไหลของอากาศเสีย 221.89 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับเท่ากับ 60 วัน	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แสดงความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านที่ความดันลดออกแบบ 18 นิ้วน้ำ อัตราการไหลของอากาศเสีย 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับที่ออกแบบเป็น 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	50
23	แสดงระยะเวลาในการดูดซับ 30 วัน อัตราการไหลของอากาศเสีย 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยปรับเปลี่ยนความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับที่ออกแบบเป็น 18, 16, 14, 12 และ 10 นิ้วน้ำ	51
24	แสดงระยะเวลาในการดูดซับ 30 วัน อัตราการไหลของอากาศเสีย 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และความดันตกคร่อมสารดูดซับ 10 นิ้วน้ำ	51
25	แสดงระยะเวลาในการดูดซับ 30 วัน ความดันตกคร่อมสารดูดซับ 18 นิ้วน้ำ โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเสียผ่านชั้นสารดูดซับเป็น 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	52
26	การออกแบบระบบดูดซับ	53
 ภาพผนวกที่		
ก1	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วระยะเวลาในการดูดซับ 60 วัน	101
ก2	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วที่ระยะเวลาในการดูดซับต่างๆ	102
ก3	ภาพแสดงความลึกของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านที่ระยะเวลาในการดูด 30 วัน และความดันตกคร่อมสารดูดซับต่างๆ	102
ก4	การออกแบบระบบดูดซับ	109
ข1	ความดันตกคร่อมถ่านกัมมันต์ grade 4/8 และ 6/12	111
ง1	ภาพตารางการเปลี่ยนหน่วย	118

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

VOCs	= สารอินทรีย์ระเหยง่าย
EPA	= Environmental Protection Agency
TLV-TWA	= เป็นค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารสำหรับการทำงานปกติ 8 ชั่วโมงต่อวันและ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์โดยที่คนงานเกือบทุกคนสัมผัสสารซ้ำ ๆ หลายวันต่อเนื่องกันโดยไม่เกิดอันตรายต่อร่างกาย) (Threshold Limit Value-Time-Weighted Average), ppm
PEL	= Permissible Exposure Limits, ppm
OSHA	= Occupational Safety & Health Administration
O ₃	= โอโซน
LEL	= ระดับความเข้มข้นต่ำที่สุดที่อาจเกิดการระเบิด, เปอร์เซ็นต์
W _c	= ความสามารถในการดูดซับ, กรัมของสารพิษต่อกรัมของถ่านกัมมันต์
W _o	= เนื้อที่การดูดซับสูงสุดสำหรับการจับสารมลพิษ, ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
K	= ค่าคงที่ของสารดูดซับ, (mole/cal) ²
K	= ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย, ไม่มีหน่วย
P _{Sn}	= ความดันไออิ่มตัว, มิลลิเมตรปรอท
P _{pn}	= ความดันไอที่จุดสมดุลของสารมลพิษ, มิลลิเมตรปรอท
P ₁	= ความดันที่จุดต้นทาง, มิลลิเมตรปรอท
P ₂	= ความดันที่จุดปลายทาง, มิลลิเมตรปรอท
ρ _{Li}	= ความหนาแน่นสถานะของของแก๊สที่ต้องการหาค่า β, กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ρ _{Lr}	= ความหนาแน่นสถานะของของแก๊สที่ทราบค่า K และ W _o , กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
R	= ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ, cal/g.mole
β	= ค่าสัมประสิทธิ์, ไม่มีหน่วย
T	= อุณหภูมิสัมบูรณ์, Kelvin
n _i	= ดัชนีการหักเหแสงของสารที่ต้องการทราบค่า β, ไม่มีหน่วย
n _i	= ดัชนีการหักเหแสงของสารที่ทราบค่า K และ W _o , ไม่มีหน่วย
n	= จำนวนโมล, โมล
M _i	= น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สที่ต้องการหาค่า β, ปอนด์ต่อปอนด์โมล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

M_r	=	น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สที่ทราบค่า K และ W_o , ปอนด์ต่อปอนด์โมล
MTZ	=	ส่วนของตัวกลางที่แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของสารจากศูนย์ไปยังจุดอิ่มตัว เรียกว่า Mass Transfer Zone
L_W	=	การระเหยจากการปฏิบัติงาน, เมกะกรัมต่อปี
M_V	=	น้ำหนักโมเลกุล, ปอนด์ต่อปอนด์โมล
P_V	=	ความดันไอจริง, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
N	=	จำนวนครั้งการเก็บต่อปี
$\forall$	=	ความจุของถังเก็บ, ลูกบาศก์เมตร
K_n	=	อัตราคูณการเก็บ, ไม่มีหน่วย
K_c	=	อัตราคูณการระเหย, ไม่มีหน่วย
L_b	=	การระเหยขณะไม่มีการปฏิบัติงาน, เมกะกรัมต่อปี
P_{atm}	=	ความดันบรรยากาศ, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของถัง, ฟุต
H	=	ความสูงเฉลี่ยของไอในถังเก็บ, ฟุต
T	=	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในหนึ่งวัน โดยเฉลี่ย, องศาฟาเรนไฮต์
F_p	=	อัตราคูณของสี, ไม่มีหน่วย
c	=	ตัวคูณสำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก, ไม่มีหน่วย
Re	=	เลขเรย์โนลด์
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, เมตร
V	=	ความเร็ว, ฟุตต่อวินาที
μ	=	ความหนืดพลวัต, N-S/m ²
ϵ	=	ความขรุขระของท่อ, มิลลิเมตร
$h_{loss,f}$	=	เฮดสูญเสียหลัก, เมตรของไหล
$h_{loss,m}$	=	เฮดสูญเสียรอง, เมตรของไหล
$h_{loss,carbon Layer}$	=	เฮดสูญเสียจากชั้นสารดูดซับ, เมตรของไหล
$h_{loss,t}$	=	เฮดสูญเสียทั้งหมด, เมตรของไหล
h_p	=	เฮดสูญเสียจากเครื่องเป่าลม, เมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

f	=	ตัวประกอบความเสียดทาน, ไม่มีหน่วย
L	=	ความยาวของท่อ, เมตร
HP	=	แรงม้า
Q	=	อัตราการไหล, ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที
H_i	=	ค่าคงที่ของแต่ละสารตามกฎของ Henry, (atm-m ³ /g-mole)
C_i	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละสารในน้ำ, (g-mole/m ³)
Y_i	=	mole fraction ของไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิด, ไม่มีหน่วย
Z_1	=	เฮตระดับความสูงที่จุดที่ 1, เมตรของไหล
Z_2	=	เฮตระดับความสูงที่จุดที่ 2, เมตรของไหล
A	=	พื้นที่หน้าตัด, ตารางเมตร

การศึกษาระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกากของเสียอันตราย

A Study on the Adsorption System for the Volatile Organic Compounds in a Hazardous Waste Storage Tank

คำนำ

ปัจจุบันงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และจากการพัฒนางานด้านอุตสาหกรรมนี้ได้มีการนำเทคโนโลยีและสารเคมีมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานกระบวนการผลิตและงานสนับสนุนการผลิต ซึ่งสารเคมีที่นำมาใช้งานอุตสาหกรรมนั้นมีหลากหลายประเภท ทั้งที่เป็นสารเคมีอันตรายและไม่อันตราย และเมื่อน้ำสารเคมีต่างๆ เหล่านี้มาผ่านการกระบวนการผลิตแล้วสิ่งได้ตามาคือของเสีย และของเสียที่ได้ออกมาจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนที่จะปล่อยน้ำออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ ปัญหาหนึ่งที่พบในระบบบำบัดน้ำเสียในงานอุตสาหกรรม คือ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds; VOCs) ในบรรยากาศ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และทำลายสิ่งแวดล้อม ทำลายโอโซน ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวในอากาศได้ในอุณหภูมิและความดันปกติ โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกากของเสียอันตรายจากระบบบำบัดในโรงงานอุตสาหกรรมก่อนที่จะส่งไปกำจัดยังบริษัทรับกำจัดต่อไป เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ลดการทำลายสิ่งแวดล้อม และลดภาวะโลกร้อนอีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกากของเสียอันตราย
2. เพื่อนำผลการวิจัยที่ได้มาเป็นแนวทางในการศึกษาระบบควบคุมยังจุดอื่นๆ ต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย
2. ลดปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากถังเก็บกากของเสียในระบบบำบัดน้ำเสียออกสู่บรรยากาศ เพื่อลดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม
3. เป็นแนวทางในการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่จุดอื่นๆ ต่อไป

ขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมและการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเฉพาะถังเก็บของเสียอันตรายจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง จังหวัดระยอง ถึงขนาด 15.18 ลูกบาศก์เมตร

การตรวจเอกสาร

1. ทฤษฎีการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ
2. ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) ซึ่งมีอันตรายต่อมนุษย์และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลต่อชั้นโอโซนของโลก เมื่อโอโซน (O_3) อยู่ในบรรยากาศชั้นสูงโอโซนทำหน้าที่กรองแสงอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้นที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตไม่ให้ตกสู่พื้นโลก แต่เมื่อโอโซนอยู่ในบรรยากาศชั้นใกล้โลกกลับเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต กล่าวคือโอโซนสามารถทำให้เกิดอันตรายเฉียบพลันต่อสุขภาพ ทำให้เจ็บไข้ ไม่สบาย เกิดอาการเจ็บคอ หายใจไม่สะดวก เกิดการระคายเคืองต่อสายตา แก้วตา จมูก คอ ทรวงอก หรือมีอาการไอ ปวดศีรษะ เป็นต้น ถ้าได้รับเป็นเวลานานเนื้อเยื่อปอดจะถูกทำลายอย่างถาวรและมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ นอกจากนี้โอโซนยังเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ทำให้สิ่งก่อสร้างชำรุดเป็นตัวพอกสีและทำให้ผลผลิตทางการเกษตรตกต่ำอีกด้วยสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ฟลูออไรด์, คลอไรด์, โบรไมด์, ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบกันเป็นพวก อะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์คีโตน) และกลุ่มแอลกอฮอล์มีความดันไอน้ำมากกว่า 0.14 มม.ปรอท ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม ระเหยกลายเป็นไอหรือแก๊สได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ จัดเป็นอากาศพิษ (Toxic Air) จึงต้องมีการควบคุม ดูแลอย่างเคร่งครัดเมื่อมีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย ตัวอย่างของตัวทำละลายที่จัดเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น เบนซีน ไชลีน โทลูอิน สไตรีน พอร์มัลดีไฮด์ เปอร์คลอโรเอทิลีน เป็นต้น ในกระบวนการผลิตตัวทำละลายดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นระบบปิดทั้งหมดกล่าวคือเป็นหอก ล้น การส่งสารละลายและวัตถุดิบผ่านในแต่ละขั้นตอนใช้ระบบท่อและวาล์วทั้งหมดในขั้นตอนการผลิตจึงมีไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ก่อให้เกิดอันตรายเล็ดลอดออกสู่บรรยากาศได้น้อยลง

สรุปอย่างง่ายได้ว่าสารอินทรีย์ไอระเหยง่าย คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วย สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง ในชีวิตประจำวันเราได้รับสารอินทรีย์ไอระเหยง่ายจากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้าน คันทันบูรี น้ำยาสำหรับขัดพื้น น้ำยาดัดผม สารฆ่าแมลง สารที่เกิดจากเผาไหม้ และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม อาหาร สารอินทรีย์ ไอระเหยที่สะสมไว้นานๆ จะมีผลกระทบต่อทางชีวภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

เราแบ่งสารอินทรีย์ไอระเหยง่ายออกตามลักษณะของโมเลกุล เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุลประกอบด้วย Aliphatic hydrocarbons (เช่น fuel oils, แก๊สโซลีน Hexane, Industrial solvents, ในอุตสาหกรรม Alcohols, Aldehydes, Ketone, Hexane) และกลุ่มสาร Aromatic hydrocarbons (เช่นสารตัวทำละลาย - Toluene, Benzene, Ethylbenzene, Xylenes, Styrene, Phenol) สารอินทรีย์ไอระเหยง่ายกลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้กองขยะ พลาสติก วัสดุ สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ เป็นต้น มีผลเสียต่อสุขภาพ ดังนั้น พนักงานดับเพลิง คนงานเผาขยะ คนเผาถ่าน มักป่วยด้วยโรค ทางเดินลมหายใจบ่อยเพราะได้รับสารอินทรีย์ระเหยง่ายประมาณ 144 ชนิด เป็นประจำจากควันไฟและเชื้อเพลิง ในรูปของ Benzene, Toluene, Naphthalene propene, 1,3-butadiene, Styrene และ Alkyl-substituted benzene compounds อื่นๆ Xylenes, 1-butene/2-methylpropene, Propane, 2-methylbutane, Ethylbenzene, Naphthalene, Isopropylbenzene รวมกันในปริมาตรสูงถึง 76.8 % ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดที่วัดได้

2. Chlorinated VOCs หรือ Halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรมสาร Chlorinated VOCs นี้มีความเป็นพิษมากกว่าและเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มแรกเพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่ทนทานมากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ ทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือโดยทางวิธีเคมีทั่วไป มีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน สลายตัวทางชีวภาพได้ยากกระบวนการทำงานของสารพันธุกรรมหรือยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้ และตัวอย่างสารอินทรีย์ ไอระเหยได้ ชนิด Halogenated VOCs แสดงไว้ในตารางที่ 1



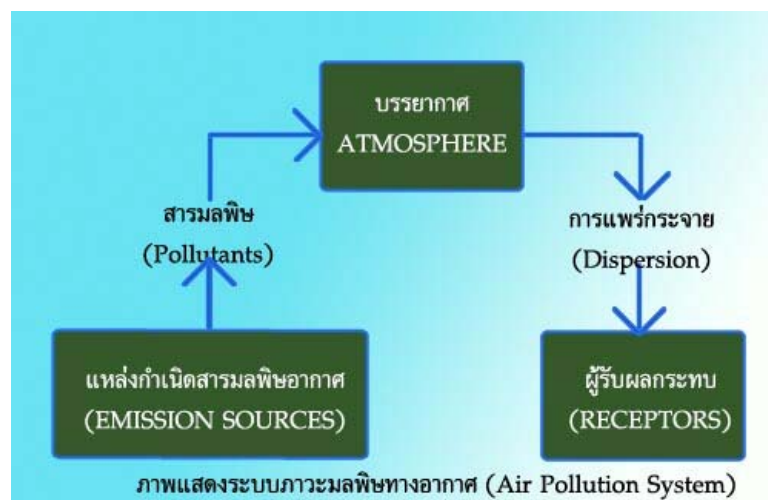
ภาพที่ 1 ตัวอย่างของสาร VOCs

ที่มา: <http://monitor.onep.go.th/document/voc.htm>

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของ Halogenated hydrocarbons ที่พบได้ในสิ่งแวดล้อม

1,1,1,2-Tetrachloroethane	Bromofor	Glycerol trichlorohydrin
1,1,1-Trichloroethane	Bromomethane	Hexachlorobutadiene
1,1,2,2-Tetrachloroethane	Carbon tetrachloride	Hexachlorocyclopentadiene
1,1,2-Tetrachloroethane	Chlorodibromomethane	Hexachloroethane
1,1-Dichloroethane	Chloroethane	Methylene chloride
1,1-Dichloroethylene	Chloroform	Neoprene
1,2,2-Trifluoroethane (Freon 113)	Chloromethane	Pentachloroethane
1,2-Dichloroethane	Chloropropane	Perchloroethylene
1,2-Dichloropropane	Cis-1,2-dichloroethylene	Propylene dichloride
1,2-Trans-dichloroethylene	Cis-1,3-dichloropropene	Trichlorotrifluoroethane
1,3-cis-dichlor-1-propene	Dibromchloropropane	Monochlorobenzene
1,3-trans- dichlorpropene	Dibromomethane	Tetrachloroethylene (Perchloroethylene) (PCE)
1-chloro-2-propene	Dichlorobromomethane	Trichloroethylene (TCE)
2-butylene dichloride	Dichloromethane(DCM)	Vinyl chloride
Acetylene tetrachloride	Ethylene dibromide	Vinyl trichloride
Bromodichloromethane	Fluorotrichloromethane (Freon 11)	Vinylidene chloride

ระบบภาวะมลพิษทางอากาศ (Air pollution system) มีส่วนประกอบ 3 ส่วน ที่มีความสัมพันธ์กัน คือ แหล่งกำเนิดสารมลพิษ (Emission Sources) อากาศหรือบรรยากาศ (Atmosphere) และผู้รับผลเสียหรือผลกระทบ (Receptors) แสดงเป็นแผนภูมิความสัมพันธ์ดังรูป



ภาพที่ 2 แสดงระบบภาวะมลพิษทางอากาศ

ที่มา: http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_basic.htm

การกำหนดมาตรการควบคุมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับของความเป็นพิษที่ยอมรับได้ที่จะปรากฏอยู่ในสิ่งแวดล้อม ความเป็นไปได้ในเชิงเทคโนโลยี และความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และในเชิงของมาตรการนี้ก็เช่นกันที่ องค์การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม สหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency, Control Technology) ซึ่งใช้หลักการความเป็นไปได้ในเชิงเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และแนวความคิด Reasonably Available Control Technology ซึ่งใช้หลักการความเป็นไปได้ในเชิงเทคโนโลยีและความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์

วิธีการควบคุมสารอินทรีย์ง่าย โดยโปรแกรมการวัดสำรวจและซ่อมบำรุง หรือ Leak Detection and Repair Program ซึ่งบังคับให้จะต้องมีการตรวจวัดเพื่อสำรวจการรั่วระยะเหยและตามด้วยการซ่อมบำรุงที่ต้องการ โดยใช้วิธีการตรวจวัดที่ระบุใน EPA Method 21 โดยผลจากการตรวจวัดแต่ละอุปกรณ์จะแสดงว่า ขณะนั้นอุปกรณ์ดังกล่าวมีการรั่วระยะเหยเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามีก็จะต้องมีการ ซ่อมบำรุงในช่วงระยะเวลาที่กำหนดต่อไป

วิธีการโดยทั่วไปของการควบคุมการระบายสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ (Stationary หรือ Point Sources) คือการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม (Add-on Control Device) ความแตกต่างของเทคโนโลยีในการควบคุมที่จะนำไปใช้ตามแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีเพียง 2 ประเด็นเท่านั้น คือ เป็นระบบการนำกลับ (Recovery) หรือเป็นระบบการกำจัด/ทำลายสารมลพิษ โดยทั่วไปนั้นวิธีการที่จะนำเทคโนโลยีใดไปใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของ กระแสแก๊สและประสิทธิภาพที่ต้องการมากกว่าที่จะพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิด และลักษณะเฉพาะที่สำคัญที่จะมีผลต่อความสามารถในการใช้งานเทคโนโลยีการควบคุมก็คือ ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในกระแสแก๊ส ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของระบบควบคุมได้เป็น 4 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

- ก. ระบบการดูดซับ
- ข. ระบบการดูดกลืน
- ค. ระบบการเผาทำลาย
- ง. ระบบการกรองชีวภาพ

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการควบคุมด้วยระบบดูดซับจึงขอกล่าวถึงระบบอื่นๆ โดยสรุปแต่ละลงรายละเอียดเฉพาะระบบดูดซับเท่านั้น

ระบบการดูดกลืน (Absorption)

การดูดกลืนเป็นวิธีที่แพร่หลายสำหรับใช้บำบัดแก๊ส การดูดกลืนเป็นการทำให้แก๊สเปลี่ยนรูปไปซึ่งปรากฏอยู่ในของเหลว การดูดกลืนแก๊สด้วยของเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลความเข้มข้นของแก๊ส ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นสมดุลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการดูดกลืน อัตราการดูดกลืนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของแก๊สหรือของเหลว (เช่น การแพร่กระจาย ความเร็ว ความหนาแน่น เป็นต้น) และสถานะของตัวดูดกลืน (เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สและของเหลว) กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง พื้นที่สัมผัสมากขึ้น สัดส่วนระหว่างของเหลวและแก๊สสูงขึ้นความเข้มข้นของกระแสแก๊สมากขึ้นการดูดกลืนจะเกิดได้ดีขึ้น

การดูดกลืนเกิดขึ้นได้ทั้งแบบกายภาพและแบบเคมี การดูดกลืนแบบกายภาพเกิดขึ้นแก๊สที่ถูกดูดกลืนละลายอยู่ในตัวทำละลาย และหากเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สที่ถูกดูดกลืนกับตัวทำละลาย นั่นคือ เกิดการดูดกลืนแบบเคมี ถ้าแก๊สที่ปนเปื้อนนั้นละลายได้ดี การบำบัดด้วยวิธีการดูดกลืนจะมีประสิทธิภาพสูง และสำหรับแก๊สที่ปนเปื้อนที่ละลายไม่ดีในตัวทำละลายบางครั้งอาจต้องมีการเพิ่มสารเคมีเข้าไปในระบบ เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของแก๊สที่ปนเปื้อนนั่น สารเคมีเหล่านั้นอาจช่วยให้แก๊สที่ปนเปื้อนละลายได้มากขึ้น หรือสารเหล่านี้อาจเกิดปฏิกิริยากับแก๊สที่ปนเปื้อน การเลือกคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ดูดกลืนควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการ และราคาของสารเคมี ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้น้ำเนื่องจากแก๊สที่ปนเปื้อนสามารถละลายในน้ำได้อีกทั้งน้ำยังสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก



ภาพที่ 3 Packed Column ที่พบโดยทั่วไป

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

Packed Column เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ถูกนำมาใช้สำหรับการดูดกลืนแก๊ส Packed Column จะทำการกระจายของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนเหนือ Packing Materials ที่เป็นตัวทำให้เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวขนาดใหญ่สำหรับให้แก๊สและของเหลวสัมผัสกันอย่างต่อเนื่อง กระแสของแก๊สที่ปนเปื้อนจะถูกปล่อยเข้ามาทางด้านล่างของ tower และไหลขึ้นสู่ Packing materials ส่วนของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนจะถูกนำเข้ามาทางด้านบนของ packing โดยวิธีการสเปรย์ และไหลลงสู่ Packing materials ในการใช้ทฤษฎีวิธีเช่นนี้จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด หากทำการเจือจางแก๊สที่ปนเปื้อนให้มากที่สุด และให้แก๊สนั้นสัมผัสกับของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนที่สะอาด และให้กระบวนการทั้งหมดเกิดในคอลัมน์ขนาดที่มีความสูงเพียงพอ

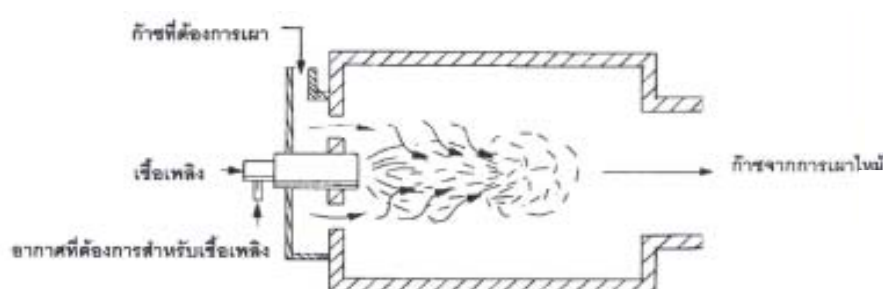
ระบบการเผาทำลาย (Incineration)

เตาเผา คือ อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดหนึ่งมีหลักการทำงานคือให้ความร้อนแก่อากาศที่ระบายออกจากสายการผลิตจนทำให้อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้นจนสารอินทรีย์ถูกเผา ในปัจจุบันเตาเผาที่ใช้เผาสารอินทรีย์มีใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการนำเอาเทคโนโลยีมาใช้ในการควบคุมการปล่อยสารมลพิษทางอากาศ

เตาเผา แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เตาเผาที่ใช้ความร้อนโดยตรง เรียกว่า Thermal Incinerator และ Catalytic Incinerator เป็นเตาเผาที่ใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำกว่า Thermal Incinerator และใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่า โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาบรรจุอยู่ ถึงแม้ว่าเตาเผาแบบนี้ใช้เชื้อเพลิงน้อยและมีต้นทุนต่ำกว่าแต่มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมดูแลระบบ และค่าใช้จ่ายของการใช้สารเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจทำให้ค่าใช้จ่ายสูงกว่าเตาเผาแบบใช้ความร้อนในบางกรณีได้

1. เตาเผาที่ใช้ความร้อนโดยตรง (Thermal Incinerator)

Thermal Incinerator อาจจะประกอบด้วยห้องเผาเพียงหนึ่งห้องเผา หรือมากกว่าหนึ่งห้องเผา โดยให้ความร้อนจากเปลวไฟผ่านเข้าไปในเตาเผาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพของเตาเผาชนิดนี้จะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีค่าอยู่ในช่วง 650-800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการเผามีค่า 0.3 – 0.5 วินาที



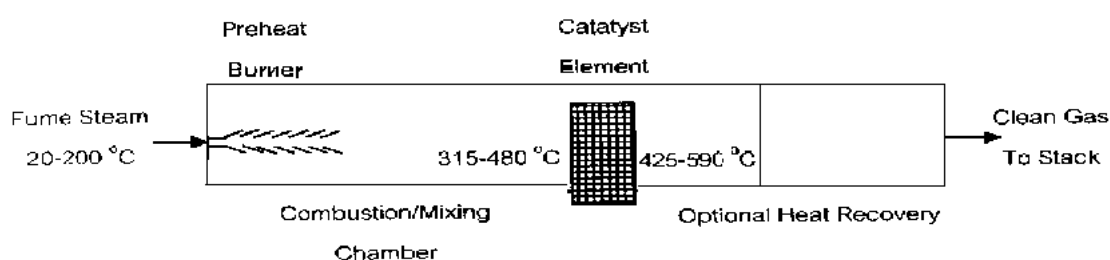
ภาพที่ 4 เตาเผาไหม้ตาม (after burner)

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

สารไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณค่าสูง (มีค่าความร้อนจากการเผา) และจะสามารถช่วยเพิ่มพลังงานความร้อนในเตาเผา ช่วยให้มีความต้องการความร้อนน้อยลง อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดในด้านความปลอดภัยกำหนดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ของค่า LEL (ระดับความเข้มข้นต่ำที่สุดที่อาจเกิดการระเบิด) ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารที่จะนำมาเผาจะถูกจำกัดความเข้มข้นไว้ 1,000 – 3,000 ส่วนในล้านส่วน เชื้อเพลิงนี้ช่วยลดสารดังกล่าวได้เล็กน้อย แต่เนื่องจากข้อกำหนดดังกล่าวจึงทำให้ความร้อนในส่วนนี้ถือว่าเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับความร้อนที่ต้องการทั้งหมดในการเผา

2. เตาเผาแบบมีสารเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incineration)

การเผาไหม้แบบเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปแล้วคล้ายกับการเผาไหม้แบบใช้ความร้อน (Thermal Oxidation) ส่วนข้อแตกต่างที่สำคัญ คือ เตาเผาแบบใช้สารเร่งปฏิกิริยา เมื่อแก๊สผ่านส่วนของการเพิ่มความร้อนเบื้องต้นแล้ว จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยทำให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแบบใช้ความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอาจเป็นวัสดุพอร์ซเลนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.5 – 12.5 มม. หรืออาจมีลักษณะเป็นรูวงรี ราบเรียบ หรือตาข่ายก็ได้ สารเร่งปฏิกิริยาส่วนมากมักเป็น โลหะมีค่า หรือ เกลือของโลหะมีค่า เช่น พลาตินัม แพลเลเดียม โคบอลต์ ทองแดง โครเมียม โมลิบดีนัม ส่วนโลหะจำพวกออกไซด์เช่นเหล็กหรือเหล็กจะสัมผัสและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยตรงทำให้เกิดชั้นของออกไซด์ขึ้นที่ผิว จึงไม่เหมาะต่อการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนโลหะจำพวกพลาตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีเพราะ โลหะเหล่านี้จะไม่ทำปฏิกิริยาและเกิดเป็นออกไซด์ทำให้คุณสมบัติการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาไม่สูญเสียไปในขณะที่ใช้งาน



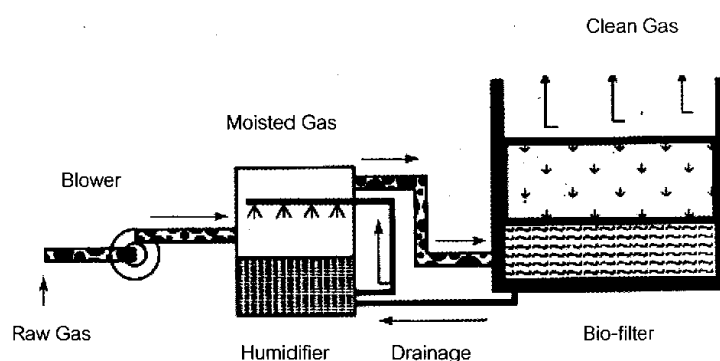
ภาพที่ 5 องค์ประกอบของเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: นภาพร และคณะ (2550)

ระบบการกรองชีวภาพ (Bio filtration)

ระบบการกรองชีวภาพเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการกำจัด ไอสารอินทรีย์ออกจากอากาศ โดยที่ในอากาศมีองค์ประกอบของแก๊สที่สามารถย่อยสลายได้โดยแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตเล็กๆ โดยการควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้น จะเสริมให้สิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่อาศัยอยู่ในชั้นกรองชีวภาพ (Biofilter bed) ย่อยสลายไอสารอินทรีย์กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ระบบนี้ มักจะใช้งานได้กับความเข้มข้นของไอสารอินทรีย์ที่ไม่เกิน 1,000 ppm ประสิทธิภาพการควบคุมมากกว่าร้อยละ 90

ค่าใช้จ่ายสำหรับระบบและในการเดินระบบจากระบบที่ใช้งานอยู่ทั้งในยุโรปและสหรัฐอเมริกามีความหลากหลายมาก แต่จากเอกสารอ้างอิง พบว่า ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ biofiltration จะต่ำกว่า (ในช่วงประมาณ 0.6-1.50 ต่อ 100,000 ลูกบาศก์ฟุต) ทำให้เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญกับระบบอื่น ถ้าใช้กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยไม่สูงมากนัก



ภาพที่ 6 ระบบการกรองชีวภาพ (Biofiltration)

ที่มา: นภาพร และคณะ (2550)

ระบบการดูดซับ (Adsorption)

ในการดูดซับ อนุภาคของแก๊สจะถูกดูดซับออกจากแก๊สที่ไหลออก โดยการจับติดกับผิววัตถุของแข็งโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ เรียกว่า Adsorbate ในขณะที่ของแข็งที่ทำการดูดซับแก๊ส เรียกว่า adsorbent ซึ่ง adsorbent จะเป็นก้อนของแข็งที่มีลักษณะรูพรุน

สำหรับวัตถุประสงค์ในการควบคุมมลพิษอากาศ กระบวนการดูดซับไม่ใช่กระบวนการสุดท้ายของการบำบัด เนื่องจากแก๊สที่มีการปนเปื้อนจะจับติดอยู่ที่ผิวของของแข็งของสารดูดซับ ซึ่งเมื่อผ่านไประยะหนึ่งหลังจากนั้นผิวของสารดูดซับจะอิ่มตัวไปด้วย Adsorbate ซึ่ง adsorbent จะต้องทำการไล่สารที่ดูดซับไว้ออกจากสารดูดซับซึ่งเรียกว่ากระบวนการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ในขั้นตอนนี้สารที่ถูกดูดซับจะถูกไล่ออกโดยการเพิ่มอุณหภูมิของชั้น adsorbate ทำให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับหลุดจากผิวของแข็ง จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงจนกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว นำกลับไปใช้ใหม่ หรือ กำจัดโดยวิธีที่เหมาะสม ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการกำจัดโดยตรงในขณะที่แก๊สดังกล่าวปนอยู่กับแก๊สที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด

โดยปกติเทคโนโลยีการดูดซับประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมพวกสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 45 ถือว่าเป็น adsorbate ที่ดี การดูดซับใช้ในการควบคุมการปล่อยมลพิษในปลายกระบวนการผลิตที่มีการใช้สารทำลาย เช่น กระบวนการซักแห้ง การเคลือบผิว กระบวนการผลิต กระบวนการผลิตอาหาร, rendering plant, ระบบบำบัดน้ำเสีย และกระบวนการการผลิตต่างๆ ที่มีการใช้สารเคมี เช่น การผลิตเชื้อเพลิง ผลิตปุ๋ย และยา สารดูดซับส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ Activated Carbon, Silica Gel, Activated Alumina (Alumina Oxide) และ Zeolites (Molecular Sieves) สารดูดซับมีคุณสมบัติเคมีตามธรรมชาติของสารที่นำมาผลิต พื้นที่ผิวของสาร รูปร่างและขนาดของช่องว่าง ปริมาตรของช่องว่าง คุณสมบัติที่สำคัญในการดูดซับของสารดูดซับคือ ประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส ถ้าสารดูดซับมีประจุไฟฟ้าจะทำให้ไอน้ำชอบเข้ามาเกาะและรบกวนกระบวนการดูดซับ เพราะความชื้นจะพบได้ทั่วไปในอากาศ ดังนั้นการใช้สารดูดซับที่มีประจุจึงมักใช้ไม่ได้ผลสำหรับระบบการควบคุมมลพิษทางอากาศ แต่ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ไม่มีประจุจึงไม่ถูกรบกวนโดยไอน้ำในกระบวนการดูดซับ จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย

ถ่านกัมมันต์อาจทำขึ้นจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอน เช่น ไม้ ถ่านหิน และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม คำว่า “activate” ใช้กับสารดูดซับที่ได้รับการเพิ่มพื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอก โดยกระบวนการเทคนิคพิเศษ กระบวนการกระตุ้นหรือการ Activate กล่าวคือ เป็นการให้ความร้อนในที่ไม่มีออกซิเจน และอัดด้วยความดันสูง ที่อุณหภูมิสูงจะระเหยส่วนที่ระเหยได้ทั้งหมดออกจากผิววัตถุ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว กระบวนการที่ใช้นี้ (เช่น อุณหภูมิและความดัน) และประเภทของวัตถุดิบจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของคาร์บอน

คาร์บอนถูกใช้ในระบบการดูดซับสารมลพิษจำพวกแก๊ส ถูกผลิตเป็นรูปเม็ด โดยปกติขนาดอยู่ระหว่าง 4x6 ถึง 4x10 Mesh ความหนาแน่นรวมของก้อนคาร์บอนอยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต ขึ้นอยู่กับโครงภายในของคาร์บอน ช่องว่างพื้นที่ผิวของคาร์บอนอยู่ในช่วงระหว่าง 3×10^6 ถึง 8×10^6 ตารางฟุต/ปอนด์ คือความสามารถในการดูดซับเมื่อพิจารณาจากการมีพื้นที่ผิวของ 2 ถึง 5 พื้นที่สนามฟุตบอล ใน 1 กรัมของคาร์บอน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารดูดซับ Activated Carbon (Marchello, 1976)

สารดูดซับ	ขนาด (Mesh size)	Bulk density กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	ขนาดของโพรง (Effective Diameter) มิลลิเมตร	สัดส่วนของโพรง	สัดส่วนของพื้นที่ผิว/ปริมาตร m^2/m^3	Reactivation temperature $^{\circ}\text{C}$	Specific Heat Btu/ปอนด์ $^{\circ}\text{C}$
Activated carbon	4x6	480	3.8	0.34	1017	93-540	0.077
	6x8	480	2.8	0.34	1463	93-540	0.077
	8x10	480	1.9	0.34	2116	93-540	0.077
	4x10	480	3.3	0.40	1509	93-540	0.077
	6x16	480	1.9	0.40	2362	93-540	0.077
	4x10	480	3.2	0.40	1476	93-540	0.077

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

หลักการดูดซับนั้นมี 2 กระบวนการคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) ที่พิจารณาถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลและการดูดซับทางเคมี (Chemisorptions) ที่ใช้การสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและแก๊ส การดูดซับทางกายภาพไม่รวมถึงการแลกเปลี่ยนหรือการไอออนย้ายอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาสามารถทำกลับสู่สภาพเดิมได้ การดูดซับทางกายภาพไม่มีการจำเพาะเจาะจง โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีความอิสระที่จะจับได้ทั้งพื้นที่ผิวของสารดูดซับ สำหรับการดูดซับทางเคมีคือการรวมโดยพันธะเคมี โดยหลักเป็นการทำปฏิกิริยาที่มีความร้อนมาเกี่ยวข้องจนมีผลต่อพันธะเคมี เมื่อมีการดูดซับทางเคมีจะยากต่อการกลับสู่สภาพเดิม หรือยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่

กระบวนการดูดซับทั้งหมดเป็นปฏิกิริยาความร้อน ไม่ว่าการดูดซับจะเกิดจากแรงทางกายภาพหรือทางเคมี เนื่องจากความเร็วการเคลื่อนตัวของโมเลกุลแก๊สจะถ่ายเทพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ไปยังสารดูดซับกลายเป็นความร้อน ในกระบวนการดูดซับทางเคมี ความร้อนของการดูดซับที่เกิดขึ้น เทียบเท่ากับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 10 kcal/mol ส่วนความร้อนที่เกิดจากการดูดซับทางกายภาพเทียบได้กับความร้อนที่คายออกเนื่องจากการควบแน่นซึ่งมีค่าประมาณ 100 cal/mol ซึ่งน้อยกว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางเคมีมาก ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา การดูดซับทางเคมีจึงมักไม่นิยมนำมาใช้ในระบบการควบคุมมลพิษอากาศ

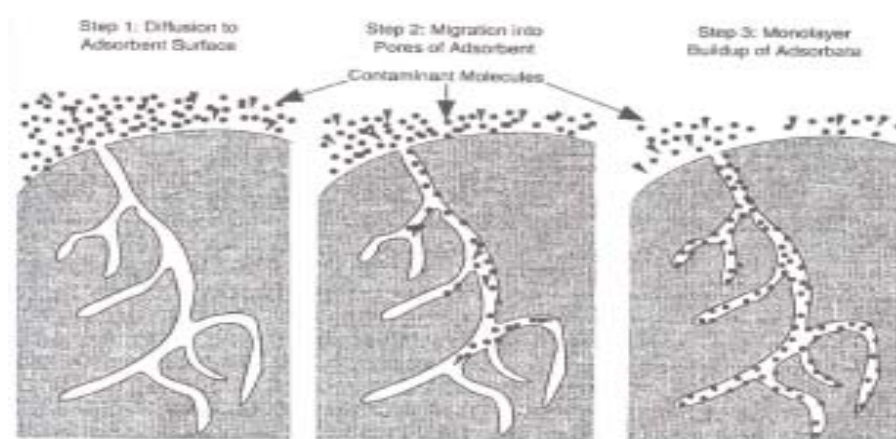
สำหรับกระบวนการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับลดลงในขณะที่อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น จากกฎทั่วไปอุณหภูมิตัวดูดซับจะถูกรักษาให้ต่ำกว่า 130 °F เพื่อให้มั่นใจว่าเพียงพอกับความสามารถของสารดูดซับ อุณหภูมิที่กล่าวมานี้สามารถทำให้ลดลงโดยการหล่อเย็นแก๊สที่ปล่อยออกมา ที่ความเข้มข้นต่ำ (ต่ำกว่า 100 ppm) ความร้อนที่ปล่อยออกมาต่ำและถูกระบายออกจากสารดูดซับโดยการไหลของอากาศผ่านตัวกลาง ที่ความเข้มข้นสูง (ประมาณ 5,000 ppm) จะต้องพิจารณาถึงความร้อนของสารดูดซับที่จะเกิดขึ้นซึ่งถ้าไม่มีการระบายออกจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอย่างรวดเร็ว ประกอบกับก้อนคาร์บอนเป็นฉนวนอย่างดี ซึ่งกันความร้อนไม่ให้ระบายออกจากภายในตัวกลาง ในบางกรณีที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้คาร์บอนเกิดประกายไฟขึ้นได้เอง การตรวจสอบอุณหภูมิของสารดูดซับ และการทำให้สารดูดซับเปียกหลังจากการฟื้นฟูสภาพเป็นเทคนิคที่หลีกเลี่ยงตัวกลางไม่ให้เกิดไฟไหม้

ก่อนหน้านี้ถ่านกัมมันต์จะใช้ดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีประจุ และจะไม่เหมาะสมกับไอน้ำที่มีประจุ ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง (มากกว่า 50%) ปริมาณโมเลกุลของน้ำจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเริ่มที่จะแข่งกับโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนในกระบวนการดูดซับ การลดลงของความสามารถและประสิทธิภาพของระบบการดูดซับไอที่ปล่อยออกมาที่ความชื้นมากกว่า 50% อาจจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเอาความชื้นออก หรือ เพิ่มอุณหภูมิเพื่อลดความชื้นสัมพัทธ์

การดูดซับเกิดขึ้นอย่างเป็นขั้นตอน ในขั้นแรก การแพร่กระจายของโมเลกุลของแก๊สและไอเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ ในขั้นตอนที่สอง โมเลกุลของสารมลพิษจะเคลื่อนที่จากพื้นที่เล็กๆของผิวหน้า (อย่างน้อยในระดับ ตารางเมตร/กรัม) ไปยังโพรงช่องว่างภายในของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดในโพรงช่องว่างเหล่านี้ เพราะความเหมาะสมระหว่างรูปร่างของโมเลกุลของแก๊สและ

ไอกับลักษณะของพื้นที่ผิวของสาร คือ พื้นที่ (100 ของตารางเมตร/กรัม) ในขั้นตอนที่สาม โมเลกุลของสารมลพิษจะเกาะติดที่ผิวในโพรงช่องว่าง และแสดงภาพรวมของกระบวนการแพร่กระจายและการดูดซับ (Joseph & Beachler, 1981)

จากกลไกที่มีการเคลื่อนไหว อัตราการถ่ายโอนมวลสารในโพรงช่องว่าง ยากที่จะทำนายอย่างน้อยข้อมูลจะต้องมีความพร้อม โดยเฉพาะการพิจารณาการดูดซับ การวัดอัตราการควบคุมจึงเป็นไปได้ ดังนั้นหลักการออกแบบขั้นตอนจะขึ้นอยู่กับสภาพการดูดซับที่สมดุล ซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายขนาดของตัวดูดซับและการทำงาน



ภาพที่ 7 กลไกการดูดซับ

ที่มา: นภาพร และคณะ (2550)

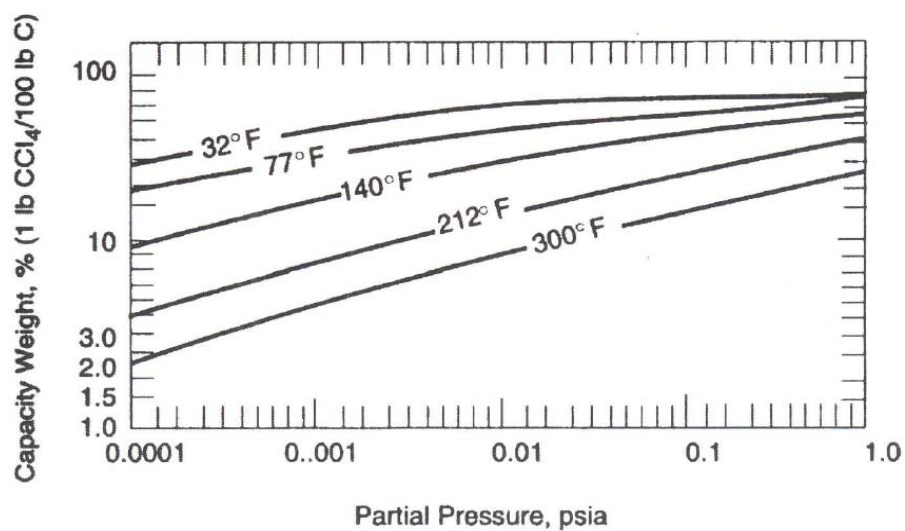
ข้อมูลที่ต้องคำนึงของระบบการดูดซับ คือ การพิจารณาที่สภาพสมดุล การดูดซับที่สมดุลคือการจัดให้อยู่ในสภาพที่อัตราการเคลื่อนที่หนีจากผิวของสารดูดซับของโมเลกุลของแก๊สหรือไอเท่ากับอัตราที่เคลื่อนที่เข้าไปในผิวของสารดูดซับ การวัดปริมาณไอที่มากที่สุดที่อาจถูกดูดซับ อยู่ที่การกำหนดสภาพการทำงาน ถึงแม้ว่าจำนวนโมเลกุลจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการดูดซับ แต่สิ่งสำคัญที่สุดสำหรับระบบการควบคุมมลพิษอากาศนี้ คือ อุณหภูมิ

โดยปกติทั่วไป ข้อมูลการดูดซับที่เป็นประโยชน์ คือ Adsorption Isotherm ซึ่ง Isotherm คือ เส้นกราฟแสดงความสามารถของสารดูดซับกับความดันของสารมลพิษที่อุณหภูมิคงที่ ประสิทธิภาพของสารดูดซับปกติให้อยู่ในรูปร้อยละของน้ำหนัก หรือเป็นกรัมของสารมลพิษต่อ 100 กรัมของสารดูดซับ เป็นตัวอย่างของ Adsorption isotherm สำหรับ Carbon Tetrachloride บน Activated Carbon แสดงการดูดซับของ Activated Carbon สำหรับแก๊สและไอบางชนิดที่อุณหภูมิ 20 °C

จากรูปด้านล่างที่ความดันบรรยากาศ 0.01 psia และอุณหภูมิ 140 °F คาร์บอนมี ประสิทธิภาพ 30% นั่นคือที่จุดอิ่มตัวคาร์บอน 100 ปอนด์ จะสามารถจับสารมลพิษออกได้ 30 ปอนด์

ตารางที่ 3 การดูดซับไอบและแก๊สโดย Activated Carbon (ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 0.01 psia)

สารถูกดูดซับ	น้ำหนัก โมเลกุล	จุดเดือด, K	ความสามารถในการดูดซับ ที่ 20 °C (ปอนด์/ปอนด์ Activated carbon)
Butyric Acid, $C_4H_4O_2$	88	437	0.35
Amyl Acetate, $C_7H_{14}O_2$	130	421	0.34
Toluene, C_7H_8	92	384	0.29
Carbon Tetrachloride, CCl_4	154	349	0.45
Ethyl Mercaptan, C_2H_6S	62	307	0.23
Acetaldehyde, C_2H_4O	44	294	0.07
Sulfur Dioxide, SO_2	64	263	0.10
Ammonia, NH_3	17	239	0.013
Chlorine, Cl_2	71	238	0.022
Hydrogen Sulfide, H_2S	34	214	0.014



ภาพที่ 8 Adsorption Isotherm สำหรับ Carbon Tetrachloride ใน Activated Carbon
ความสัมพันธ์ของการดูดซับที่ภาวะสมดุล

ที่มา: นภาพร และคณะ (2550)

ดังที่กล่าวแล้วว่า ข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการออกแบบระบบดูดซับ ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาสมการ เพื่อทำนายการดูดซับที่ภาวะสมดุล จากข้อมูลทางกายภาพ ซึ่งนับว่ายากเพราะ adsorption isotherms มีหลายรูปแบบและขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เส้น isotherms อาจจะขึ้นและลง หรือ เป็นรูปตัว S ซึ่งทฤษฎีส่วนใหญ่เห็นด้วยกับรูปแบบที่เฉพาะเจาะจงระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ และความเข้มข้นของสารดูดซับ

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ Freundlich Isotherm ของแก๊สหรือไอบางชนิด

Adsorbate	Temperature (K)	$K \times 100$	N	Partial Pressure (Pa)
Acetone	311	1.234	0.389	0.69-345
Acrylonitrile	311	2.205	0.424	0.69-103
Benzene	298	12.602	0.176	0.69-345
Chlorobenzene	298	19.934	0.188	0.69-69
Cyclohexane	311	7.940	0.210	0.69-345
Dichloroethane	298	8.145	0.281	0.69-276
Phenol	313	22.116	0.153	0.69-207
Toluene	298	20.842	0.110	0.69-345
Trichloroethane	298	25.547	0.161	0.69-276
m-Xylene	298	28.313	0.0703	6.9-345

ที่มา: EAB Control Cost Manual, 3rd ed. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 1987.

ความสามารถในการดูดซับอยู่ในหน่วย kg adsorbate/kg adsorbent.

ความดันย่อยอยู่ในหน่วยปาสคาล, Pa.

ข้อมูลนี้มาจาก Calgon Activated Carbon (4 x 10 mesh).

การคำนวณความสามารถในการดูดซับ

ความพยายามจะทำนาย Adsorption Isotherms อีกทฤษฎีหนึ่งคือ Polanyi Potential Theory ซึ่งทฤษฎีนี้กล่าวว่า ศักยภาพของการดูดซับพิจารณาได้จากงาน Isotherm โดยระบบ ประโยชน์หลักของทฤษฎี Polanyi พยายามครอบคลุมโมเดลอื่น ๆ ที่มีการทำนายการดูดซับอื่นๆ เพื่ออธิบายเรื่องการดูดซับที่สมดุลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระบบสารมลพิษกับสารดูดซับ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากอุณหภูมิ Polanyi แสดง Isotherm ของการดูดซับของแก๊สต่างๆ แสดงได้จากสมการ (1) (Noll, 1992)

$$\ln W_e = \ln(W_o \rho_L) - K \frac{\left[RT \ln \left(\frac{P_{Sn}}{P_{pn}} \right) \right]^2}{\beta^2} \quad (1)$$

โดยที่	W_e	หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ, กรัมของมลพิษ/กรัมของคาร์บอน
	W_o	หมายถึง เนื้อที่การดูดซับสูงสุดสำหรับการจับสารมลพิษ, ลูกบาศก์ เซนติเมตร/กรัม
	K	หมายถึง ค่าคงที่ของสารดูดซับ, (mole/cal) ²
	P_{Sn}	หมายถึง ความดันไออิ่มตัวของสารมลพิษที่อุณหภูมิแก๊ส T, K
	P_{pn}	หมายถึง ความดันไอที่จุดสมดุลของสารมลพิษที่ T, K
	ρ_L	หมายถึง ความหนาแน่นของสารมลพิษในสถานะของเหลว, กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร
	R	หมายถึง ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ, 1.987 cal/g.mole K
	β	หมายถึง ค่า affinity coefficient
	T	หมายถึง อุณหภูมิสมบูรณ์, K

ค่า K และ W_o เป็นพารามิเตอร์ของอนุภาคถ่านกัมมันต์ และไม่ขึ้นกับไอสารมลพิษ จากสมการข้างต้นสามารถใช้หาค่า adsorption isotherm ของไอจากการดูดซับของสารอ้างอิง เป็นการบอกค่าสัมประสิทธิ์, β , ของไอที่อิ่มตัว β อาจหาได้จากอัตราส่วนของ molar volume ของ การทดสอบสารทำละลาย เพื่อเป็นการอ้างอิงสารทำละลายที่ใช้กับค่า W_o และ K สำหรับคาร์บอน

ค่าสัมประสิทธิ์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\beta = \frac{[(n_i^2 - 1)/(n_i^2 + 2)]M_i / \rho_{Li}}{[(n_r^2 - 1)/(n_r^2 + 2)]M_r / \rho_{Lr}} \quad (2)$$

เมื่อ n_i = ดัชนีการหักเหของแก๊สหรือไอที่ต้องการหาค่า β วัดจากความยาวคลื่น sodium D
 n_r = ดัชนีการหักเหของแก๊สหรือไอที่ทราบค่า วัดจากความยาวคลื่น sodium D ที่ทราบค่า K และ W_o

M_i = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สหรือไอที่ต้องการหาค่า β

M_r = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สหรือไอที่ทราบค่าที่ทราบค่า K และ W_o

ρ_{Li} = ความหนาแน่นของเหลวในสถานะของเหลวของแก๊สหรือไอสารที่ต้องการหาค่า β

ρ_{Lr} = ความหนาแน่นของเหลวในสถานะของเหลวของแก๊สหรือไอสารที่ทราบค่า K และ W_o

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์การดูดซับ สำหรับ Activate Carbons

Description	Surface Area (ตารางเมตร/ กรัม)	Packed Density (กรัม/ ลูกบาศก์ เมตร)	W_o (ลูกบาศก์ เมตร/กรัม) ^a	K (mol/cal) ² $\times 10^8$
A. Tsurumi 4GS-S, from Coal and Coconut Shell	1170	0.43	0.485	5.1
B. Tsurumi HC-8, from Coconut Shell	1270	0.44	0.525	4.7
C. Takeda Sx, from Coconut Shell	1090	0.41	0.455	4.2
D. Hokuetsu Y-20, from Coconut Shell	1098	0.45	0.440	5.1
E. Fujisawa D-CG, from Coconut Shell	1240	0.43	0.495	5.2
F. Fujisawa A, from coal	840	0.42	0.375	4.6
G. Kureha G-BAC, from Oil Pitch	1000	0.51	0.430	4.6
H. Columbia JXC 4/6 pellets; 25°C, 737 mm	1194	0.461	0.404 ^b	1.44 ^b
I. Barnebey-Cheney 6-10 mesh BC-AC from lot 0993; 23°C	--		0.413 ^c	4.7 ^c
J. Nort American Carbon, NACAR G-352, 6-10 mesh granular	--		0.481	1.5
			0.700	14.9

^a Reference vapors: benzene for A-G; n-Pentane, n-butanol, for H; CCl₄ for I-J

^b n-HePVane.

^c n-Butanol.

ความสามารถในการดูดซับของสารบางสารใช้สมการการทำนายแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ค่า W_c และ K สำหรับไอสารบางชนิดบน BC-AC Activated Carbon^a 6x10 mesh

Vapor	Liquid Density, ^b ρ_L (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	Refractive Index, ^c n	K (นาที ⁻¹)	W_c (กิโลกรัม/ กิโลกรัม)
Acetamide	1.159	1.4274 ⁷⁸	1186	0.494
Acrylonitrile	0.8060	1.3911	1251	0.357
Benzene	0.8761	1.5011	1031	0.409
Carbon tetrachloride	1.5881	1.4607	735	0.741
Chloroform	1.4832	1.4459	834	0.688
bis (Chloromethyl) ether	1.315	1.4346	850	0.608
Chloromethyl methyl ether	1.0605	1.3974	1016	0.480
1,2-Dibromo-3-Chloropropane	2.09311	1.553 ¹¹	593	0.992
1,1-Dibromoethane	2.0555	1.5128	665	0.962
1,2-Dibromoethane	2.1792	1.5383	665	1.020
1,2-Dichloroethane	1.2492 ³³	1.4448	916	0.575
Diepoxy butane (meso)	1.1157	1.4330	982	0.510
1,1-Dimethyl hydrazine	0.791 ²²	1.4075 ^{22,3}	1176	0.359
1,2- Dimethyl hydrazine	0.8274	1.4204	1176	0.375
Dimethyl sulfate	1.332	1.3874	812	0.615
ρ -Dioxane	1.0333 ²³	1.4220	971	0.475
Ethylenimine	0.8321	1.412 ²⁵	1388	0.354
Hydrazine	1.0083	1.4698 ^{22,3}	1610	0.380
Methyl methane sulfonate	1.2943	1.4140	869	0.595

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Vapor	Liquid Density, ^b ρ_L (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	Refractive Index, ^c n	K (นาที ⁻¹)	W_e (กิโลกรัม/ กิโลกรัม)
1-Naphthylamine	1.229 ²⁵	1.6703 ⁵¹	762	0.585
2-Naphthylamine	1.0614 ⁹⁸	1.6493 ⁹⁸	762	0.506
N-Nitrosodiethylamine	0.9422	1.4386	902	0.442
N-Nitrosodimethylamine	1.0059	1.4368	1059	0.458
N-Nitroso-N-methylurethane	1.133	1.4363	793	0.534
N-Nitrosopiperidine	1.0631 ^{18.5}	1.4933 ^{18.5}	853	0.501
N-Nitrosopropylamine	0.9163	1.4437	799	0.434
1,3-Propane sultone	1.39310	1.450 ¹⁰	825	0.646
β -Propiolactone	1.1460	1.4118	1074	0.508
Propylenimine	0.802 ²⁵	1.409 ²⁵	1206	0.361
Safrole	1.096	1.5383	716	0.522
Urethane	0.9862 ²¹	1.4144 ⁵²	966	0.456
Vinyl chloride	0.9114	1.3700	1153	0.404

^aBarnebey-Cheny Co., Table 10.2; T = 23 °C, P/P₀ = 0.0936, W₀ = 0.481 cm³/g, K = 1.5 X 10⁻⁸ (mol/cal)²

^bLiquid densities at 20 °C relative to water unless otherwise stated.

^cRefractive indices are for D line of D line of the sodium spectrum and at 20 °C unless otherwise state

ที่มา: Sansone and Jonas (1981)

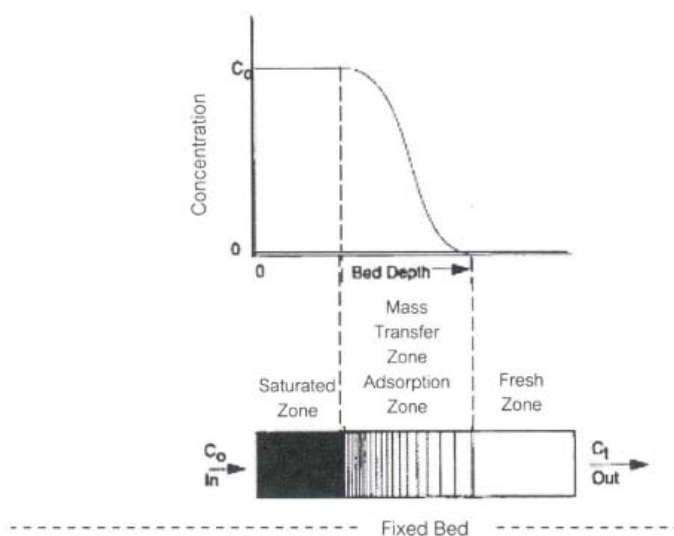
ตารางที่ 7 ดัชนีการหักเหแสงของสาร VOCs (วัดที่ 25 °C)

Compound	Refraction Index, n
Acetone	1.357
Benzene	1.498
Butyl acetate	1.392
Butyl alcohol	1.397
Carbon tetrachloride	1.459
Chloroform	1.444
Ethyl acetate	1.412
Ethyl alcohol	1.359
Heptane	1.383
Hexane	1.498
Isobutyl alcohol	1.395
Isopropyl alcohol	1.374
Methyl alcohol	1.326
Methyl ethyl ketone	1.377
Tetrachloroethylene	1.504
Toluene	1.494
Trichloroethylene	1.475
m-Xylene	1.493
p-Xylene	1.495

การออกแบบระบบการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของตัวกลางขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการดูดซับ คือการจัดเรียงตัวกลางให้อากาศผ่านขณะที่อากาศที่ปนเปื้อนสารมลพิษผ่านตัวกลางแล้วเป็นอากาศที่สะอาดออกจากคอลัมน์ดังรูป

ตำแหน่งที่เข้าสู่คอลัมน์สารดูดซับจะเป็นตำแหน่งที่สัมผัสอากาศที่มีมลพิษอย่างต่อเนื่อง เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งส่วนที่สัมผัสกับสารมลพิษจะไม่ถูกดูดซับโดยตำแหน่งที่ดูดซับสารก่อนหน้านี้ ดังนั้นสารมลพิษจะมีมากบริเวณทางเข้าเป็นตำแหน่งแรก หลังจากนั้นอาณาเขตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

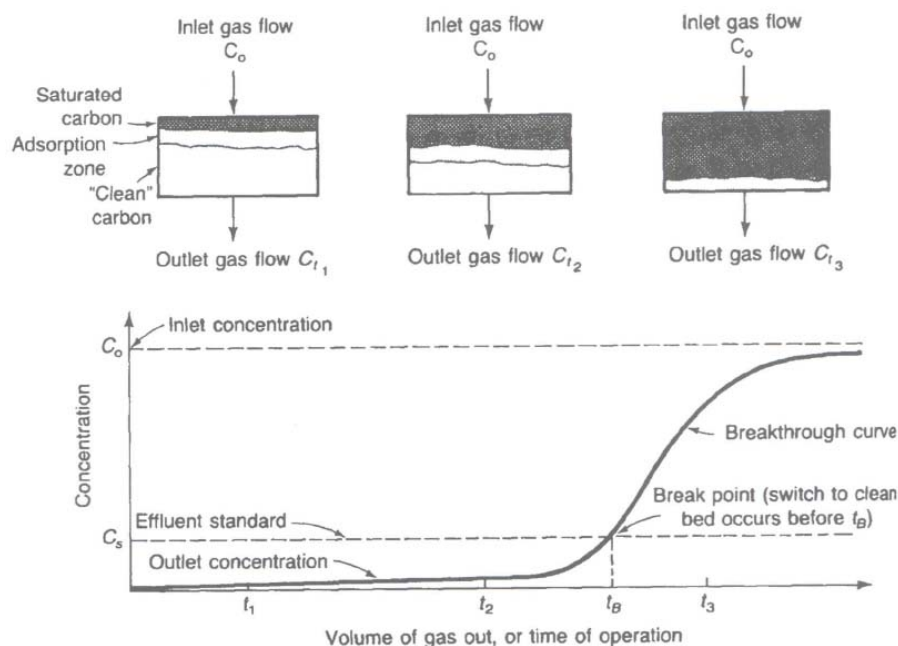


ภาพที่ 9 แสดงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

ส่วนของตัวกลางที่แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของสารจากศูนย์ไปยังจุดอิ่มตัว เรียกว่า Mass Transfer Zone (MTZ) ซึ่งชื่อนี้บ่งบอกว่าเป็นส่วนของตัวกลางที่กำลังเกิดปฏิกิริยาดูดซับ ความเข้มข้นของสารมลพิษจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านตัวกลาง จากค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดเริ่มต้นของ MTZ ไปยังความเข้มข้นสูงสุดเมื่อถึงตอนสุดท้าย

เมื่อตัวกลางเกิดการอิ่มตัว การดูดซับจะเริ่มลดลง MTZ จะเคลื่อนไปตามทิศทางการไหล และในที่สุดอากาศจะหลุดออกจากชั้นของสารดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกจากตัวกลางกับเวลา ซึ่งเรียกว่า breakthrough curve ที่ช่วง breakthrough นี้ ความเข้มข้นทางออกจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะเท่ากับค่าความเข้มข้นทางเข้า ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีความสำคัญที่ใช้อธิบายเรื่องความสามารถในการดูดซับ การ breakthrough นี้อาจเรียกว่าเป็นจุดที่ความสามารถของตัวกลางในการดูดซับสารพิษเริ่มหมดไป จุดอิ่มตัว คือจุดที่จะดูดซับได้น้ำหนักของคาร์บอน (ซึ่งอ่านค่าได้จาก Adsorption Isotherm)



ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ

ที่มา: นภาพร และคณะ (2550)

เมื่อคุณภาพอากาศที่ไหลออกมีความเข้มข้นสูงเกินไป หรือ เมื่อเวลาผ่านไปการทำงานของคอลัมน์หยุดลงและสารดูดซับควรได้รับการฟื้นฟูสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ คือระบบการดูดซับอากาศโดยใช้ไอน้ำ การทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบดูดซับจึง ต้องให้มีตัวสำรองไว้อีกหนึ่งตัวในกรณีที่ตัวใช้งานอยู่เต็ม

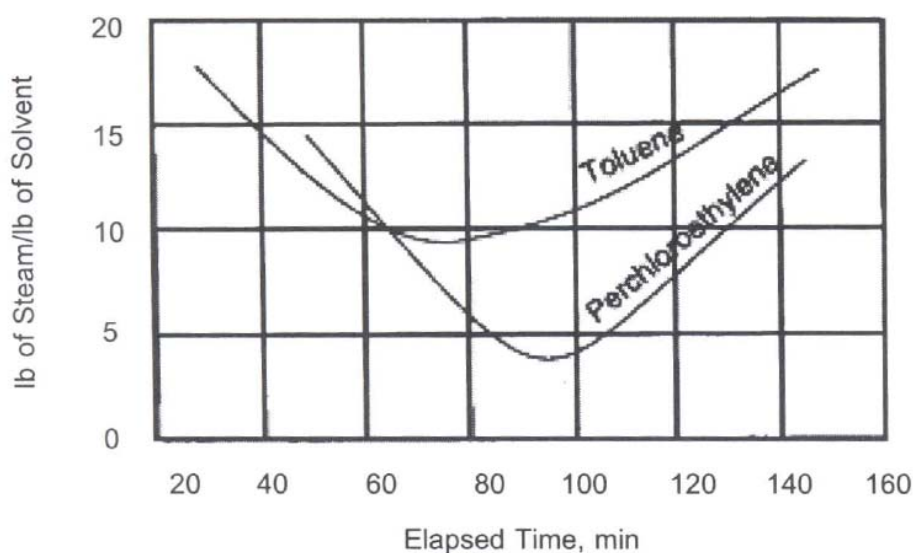
การฟื้นฟูสภาพระบบดูดซับ (Regeneration)

การใช้ไอน้ำเป็นวิธีการแยกสารออกมา โดยไอน้ำไล่สารดูดซับออกมาทำให้ความสามารถในการดูดซับกลับมาเท่าเดิม สารที่ถูกดูดซับจะหลุดออกมาจากผิวหน้าของสารดูดซับ ซึ่งในช่วงแรกของการให้ความร้อนจะไม่มีแก๊สออกมา เนื่องจากจะต้องให้อุณหภูมิเพียงพอที่จะสามารถหลุดออกมาได้ รูปที่แสดงถึงไอน้ำต่อปอนด์ของการ (Danieison, 1973) เวลาในการดูดซับสามารถประเมินได้จาก ไอน้ำต่อปอนด์ของสารที่ถูกดูดซับ ในจุดที่เหมาะสมเพราะไอน้ำที่นำกลับมาใหม่คือกำไร

รูปที่แสดงคือสัดส่วนของไอน้ำ (ปอนด์) ที่ใช้ต่อ Perchloroethylene (ปอนด์) ที่นำกลับมา ในช่วง 20 นาทีแรก จุดต่ำสุด คือ 4.7 ปอนด์ หลังจากพ้นเวลาที่ 90 นาที ปริมาณของ Solvent ที่นำกลับมาที่จุดสูงสุดและจะเริ่มลดลงในรูป การไล่ Toluene ก็จะเป็นรูปแบบเดียวกัน นอกจากจะใช้ไอน้ำมากขึ้น ถ้าทราบว่าค่าความร้อนแฝงจำเพาะสูงกว่า สำหรับวัฏจักรการไล่สารดูดซับเพื่อทำให้ ส่วนของตัวดูดซับคืนสภาพในส่วนนี้ต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 90 นาที การออกแบบระบบจะต้องใช้ไอน้ำในช่วง 1-4 ปอนด์ ของการคืนสภาพและใช้ความดัน 3-15 psig

ไอน้ำของสารละลายและไอน้ำที่หลุดมาจะกลั่นตัวในถังควบแน่นที่ น้ำหล่อเย็นที่ใช้อุณหภูมิ 60 °F อุณหภูมิในเข้าถึงควบแน่นประมาณ 40 °F และน้ำที่ออกมาจะมีอุณหภูมิประมาณ 100 °F อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่สูงหรืออัตราการไหลของน้ำต่ำจะทำให้กระบวนการควบแน่นช้า จะเพิ่ม เวลาในกระบวนการใช้ไอน้ำ และทำให้เพิ่มต้นทุนในกระบวนการดูดซับ

อุปกรณ์แยกชั้นจะติดตั้งต่อจากถังควบแน่น เพื่อแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากน้ำ อุปกรณ์แยก การทำงานโดยอาศัยความหนาแน่นที่แตกต่างกัน สารที่หนักจะถูกแยกออกมาจากด้านล่างและ สารที่เบาจะถูกแยกออกจากส่วนบนของถัง ถ้าค่าละลายของสารที่ถูกดูดซับในน้ำต่ำก็สามารถใช้งานได้



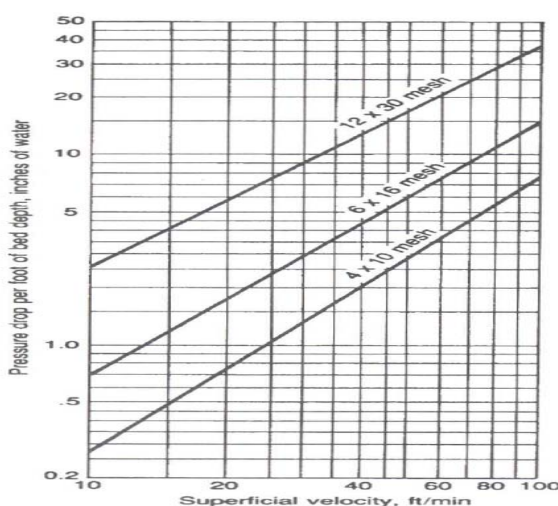
ภาพที่ 11 อัตราความต้องการไอน้ำต่อปอนด์ของสารที่ถูกดูดซับ

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

สำหรับการจับแก๊สในกระบวนการต่อเนื่องต้องการระบบอย่างน้อย 2 ระบบ ระบบแรกจะใช้งานขณะที่ระบบที่ 2 จะ Regenerate เพื่อเตรียมไว้ใช้งานเมื่ออีกระบบหนึ่งเต็ม

ความหนาของชั้นสารดูดซับที่เป็นไปได้สูงสุดปกติถึงดูดซับมีขนาดสูงแปรตามความดันตกคร่อมผ่านถัง ความลึกถึงถูกควบคุมโดยการสึกกร่อนของสารดูดซับเนื่องจากความเร็วของแก๊สและความดัน ความเร็วแก๊สสูงสุดถูกจำกัดที่ 100 ฟุตต่อนาที่ซึ่งจะทำให้เกิดความดันตกประมาณ 18-20 นิ้ว น้ำ ภาพด้านล่าง (Turk 1977) แสดงข้อมูลของความดันตกต่อนี้ของความลึกชั้นสารดูดซับถึงกับความเร็วแก๊สและขนาดของถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ สารดูดซับที่ความเร็วแก๊สที่ 80 ฟุตต่อนาที่ เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ขนาด 4x10 Mesh จะมีความดันตกคร่อมประมาณ 6 นิ้ว น้ำต่อฟุต ของความลึก ความดันตกคร่อมผ่านถังต้องไม่เกิน 18 นิ้ว น้ำ ความลึกของชั้นสารดูดซับจะไม่เกิน 3 ฟุต

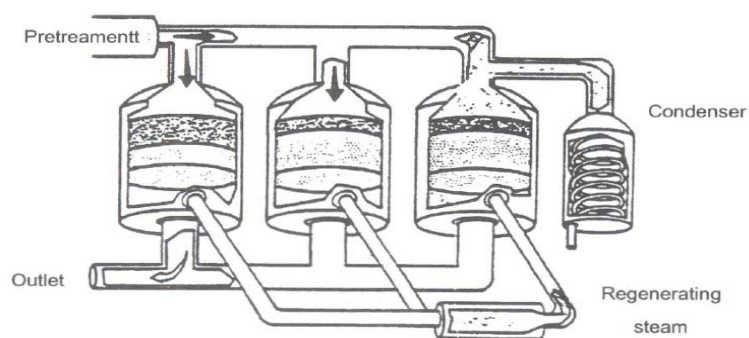
ระบบ Activated Carbon จึงมักออกแบบสำหรับความเร็วแก๊สที่ไม่เกิน 100 ฟุตต่อนาที่ เมื่อความเร็วแก๊สดำกว่า 20 ฟุตต่อนาที่ จะก่อให้เกิดปัญหาขึ้นเช่น เกิดช่องเหนือชั้นของความเร็วแก๊สสูงสุดและต่ำสุดความดันตกคร่อมจะก่อให้เกิดความลึกถึงสูงสุด สำหรับความเร็วที่เฉพาะพื้นที่ผิวหน้าตัดก็จะมีขนาดเฉพาะด้วย เช่น ถ้าต้องการบำบัดแก๊สที่ 300 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที่ พื้นที่หน้าตัดของถังจะมีขนาดอย่างน้อย 10 ตารางฟุต ข้อจำกัดของความลึกถึงขึ้นกับความดันตกคร่อมพิจารณา 2 อย่าง คือ ถังตั้งหรือถังนอน



ภาพที่ 12 ความดันตกกับความเร็วแก๊สในระบบดูดซับ

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

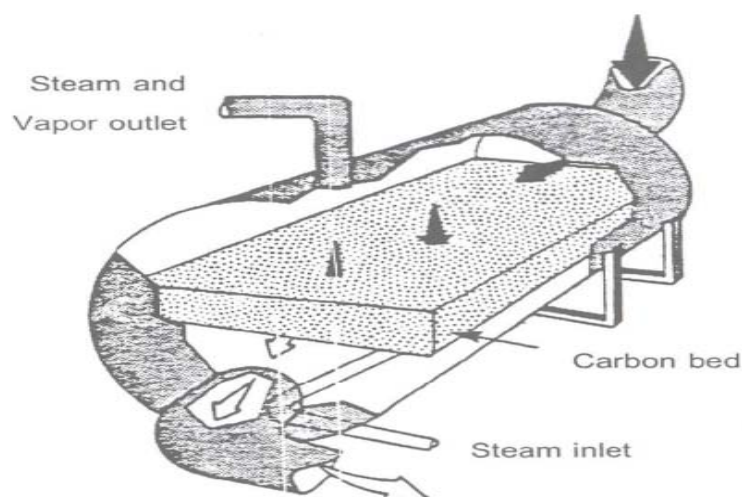
ถึงในแนวดิ่งมักจะเป็นทรงกระบอก ระบบดูดซับแบบ 3 ถัง โดยอัตราการไหลของแก๊สในระบบมีอัตรา 3,000-4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่มี Trichloroethylene ขนาด 75 ปอนด์ต่อชั่วโมง ในถังขนาด 48 นิ้วบรรจุ 560 ปอนด์ของ Activated Carbon ลึก 4 นิ้ว อัตราการไหลของแก๊ส 3,500 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ความดันตกคร่อมของระบบประมาณ 12 นิ้วน้ำ (Joseph and Bdachler, 1981)



ภาพที่ 13 ระบบดูดซับแบบ 3 ถังแนวดิ่ง

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

สำหรับอัตราการไหลของแก๊สที่สูงควรใช้การจัดเรียงในแนวระดับ โดยความยาวถังสามารถรับอากาศได้โดยตรง แสดงระบบในแนวระดับ ถังมีขนาดความกว้าง 10 ฟุต และความดันตกคร่อมที่ 20 นิ้วน้ำ



ภาพที่ 14 ระบบดูดซับวางในแนวระดับ

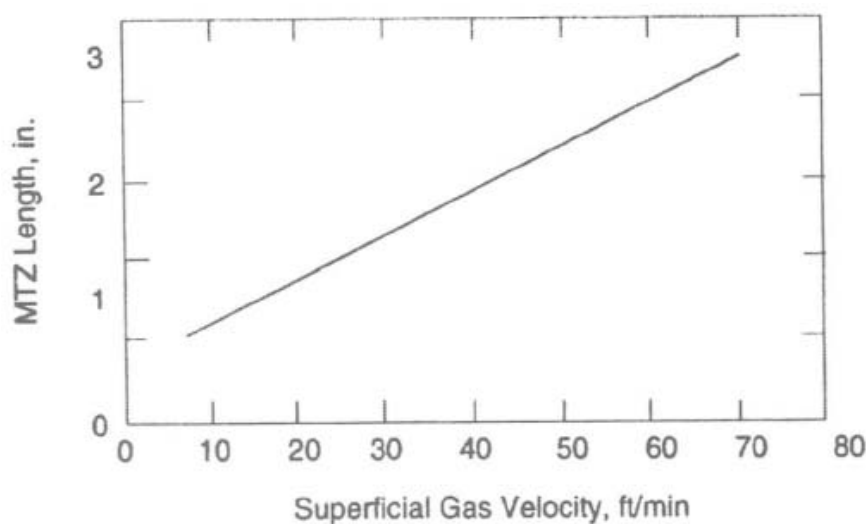
ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

ความลึกของชั้นตัวกลางต่ำสุด

ความลึกต่ำสุดของตัวดูดซับมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพในการแยกแก๊ส ถ้าความลึกของตัวดูดซับสั้นกว่า MTZ ที่ต้องการ การเกิดส่วนนี้อย่างรวดเร็วทำให้ระบบไม่ได้ผล โชคดีที่ MTZ ที่ปกติสั้นกว่า 3 นิ้ว ซึ่งเกิดขึ้นในงานด้านมลพิษอากาศมีวิธีการทำนายส่วน MTZ ของความลึกทั้งหมด (Noll, 1992) การคำนวณความยาวของ MTZ มีความยุ่งยากมากเนื่องจากขึ้นกับปัจจัย 6 ชนิด คือ ขนาดอนุภาคที่ดูดซับ ความเร็วแก๊ส ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ คุณสมบัติของแก๊ส อุณหภูมิและความดันของระบบ MTZ สามารถประมาณจากข้อมูลทดลอง ความลึกจริงก็ยาวกว่าความยาวของ MTZ

ในการฟื้นฟูสภาพนั้นเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพปกติคือ 2 ชั่วโมง ซึ่งแบ่งเป็น 60-90 นาทีสำหรับการให้อินน้ำและ 30 นาทีถึง 1 ชั่วโมงสำหรับการหล่อเย็นและปล่อยให้แห้ง

ความยาวของ MTZ สัมพันธ์กับความเร็ว ปกติความเร็วที่สูงขึ้น บริเวณที่ยังไม่อิ่มตัวจะยาวขึ้น ผลกระทบของความเร็วต่อความยาวของ MTZ ได้แสดงให้เห็นสำหรับเอทานอลโดยใช้ Activated Carbon (Buonicore & Davis, 1992) ข้อมูลในรูปแบบแสดงระบบควบคุม VOCs (ปกติความยาวสูงสุดของ MTZ น้อยกว่า 3 นิ้ว) เปรียบเทียบกับระบบดูดซับของน้ำ MTZ มักจะยาวกว่า 1 ฟุต



ภาพที่ 15 ความยาวของ MTZ สัมพันธ์กับความเร็ว

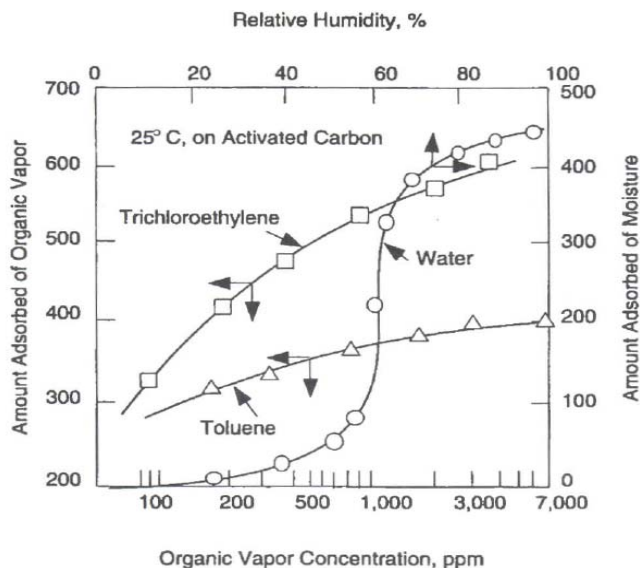
ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

ผลจากความชื้น

การแยก VOC จากน้ำหรือดินโดยกระบวนการ Stripping จะทำให้ VOCs จะไปปรากฏอยู่ในอากาศและจะต้องดูดซับออกในคอนทักซ์ การดูดซับ VOCs ที่ปล่อยออกมา การ stripping จะถูกรบกวนโดยความชื้นที่สูงจากความชื้นที่สูงในไอน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งการลดลงของประสิทธิภาพจะยิ่งมากขึ้นถ้าสารนั้นไม่ละลายน้ำ

กระบวนการดูดซับที่ซับซ้อน แสดงในรูปความสัมพันธ์จากศูนย์ถึง 40 และ 50% มีผลต่อระบบการดูดซับน้อย แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง มากกว่า 40%-50% จะรบกวนการดูดซับมาก ความจุจะลดลงจนมีนัยสำคัญ

อุณหภูมิแก๊สที่สูงขึ้น ความจุในการดูดซับในสถานะแห้งลดลง อย่างไรก็ตามจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10-15 °C ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดลง 100% ถึง 40-50% ซึ่งจะไม่เกิดผลกระทบจากความชื้นในการดูดซับ (Noll, 1992)



ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพการดูดซับกับความชื้นสัมพัทธ์

ที่มา: นพภาพร และคณะ (2550)

การตรวจสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบดูดซับ

การนำระบบดูดซับมาใช้ในระบบการควบคุมมลพิษจากอุตสาหกรรมนั้น ควรมีการตรวจสอบเพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบดูดซับ ทั้งนี้หากระบบทำงานผิดปกติหรือเกิดความเสื่อมสภาพจะได้ปรับปรุงแก้ไขให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ตามปกติ

ตารางที่ 8 การตรวจสอบและการประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบดูดซับ

การตรวจสอบ	การประเมินสมรรถนะ
สภาพทางกายภาพ	ตรวจสอบสภาพการสึกกร่อน การกัดกร่อน หรือสภาพภายนอกที่ถูกทำลายของระบบดูดซับ
การวัดความดันสถิตลดลง (Static Pressure Drop) ระหว่างพัดลมและเบดของสารดูดซับ	เปรียบเทียบค่าความดันสถิตลดลงกับค่าปกติที่ทำให้งานการทำงานของระบบการดูดซับเป็นไปตามข้อกำหนด 1. ถ้าค่าความดันสถิตลดลงมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเบดของสารดูดซับเกิดการอุดตันบางส่วน อันเนื่องมาจากการก่อตัวของอนุภาคละเอียด หรืออันเนื่องมาจากวัสดุต่างๆ ไหลเข้าไป พร้อมกับกระแสแก๊ส 2. ถ้าค่าความดันสถิตลดลงมีค่าลดลง แสดงว่าเบดของสารดูดซับเกิดเสื่อมสภาพจนกระทั่งถึงจุดที่ช่องการไหล (Channeling) ของกระแสแก๊สมีผลกระทบต่อการสัมผัสระหว่าง แก๊ส-ของแข็ง แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันสถิตลดลงเช่นกัน

ตารางที่ 8 (ต่อ)

การตรวจสอบ	การประเมินสมรรถนะ
การสังเกตกลิ่นสารเคมีที่ออกจากสารดูดซับ (หากทำได้)	ปกติแล้ว จะมีกลิ่นสารเคมีที่ออกจากสารดูดซับ น้อยมาก แต่หากสารดูดซับหมดสภาพ (อิ่มตัว แล้วหรือเต็มที่แล้ว) อากาศเสียจะผ่านไปได้โดยไม่ถูกดูดซับเลย และสารที่มีโมเลกุลเล็กอาจถูก ผลักดันออกมาโดยสารโมเลกุลใหญ่กว่าก็ได้
เวลาที่ใช้ในการดูดซับ/เวลาที่ใช้ในการกำจัด สารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ	เปรียบเทียบช่วงเวลาในการทำรีเจนเนอเรชัน ให้กับค่าที่ได้จากการสังเกตครั้งก่อน ถ้าพบว่ามี ค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการทำรีเจนเนอเรชัน ให้กับเบด แสดงว่าเกิด Breakthrough ขึ้น (แก๊ส ที่ไม่ผ่านการ
ความดันและอุณหภูมิของไอน้ำในระหว่างรี เจนเนอเรชัน	ค่าความดัน/อุณหภูมิ ของไอน้ำที่ลดลงจากค่าที่ ได้บันทึกไว้ครั้งก่อนสามารถชี้ให้เห็นว่า อัตรา การไหลของไอน้ำไม่เพียงพอสำหรับรีเจนเนอเรชัน

ที่มา: นภาพร และคณะ (2550)

ความหมายของน้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ในปริมาณสูงจนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ ต้องการการและน่ารังเกียจของคนทั่วไป สิ่งเจือปนที่ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำเสีย

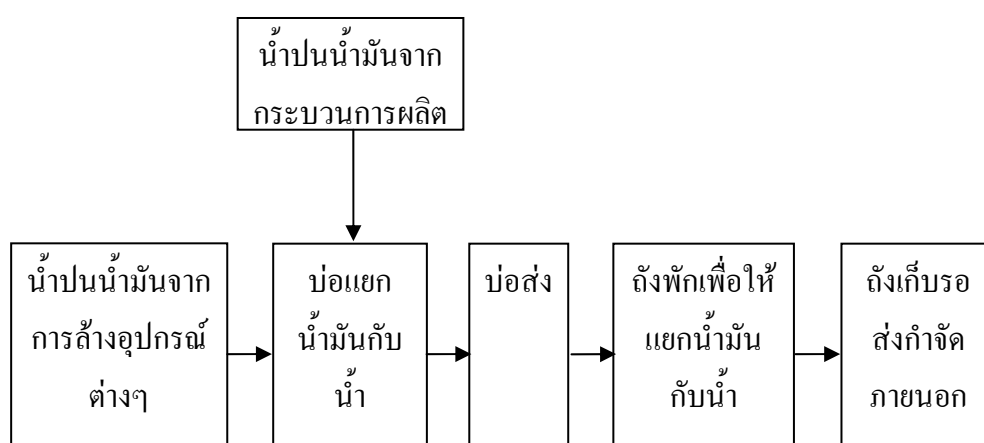
1. สารอินทรีย์ต่างๆ ทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำ
2. กรด, ด่าง
3. ของแข็งหรือตะกอนแขวนลอย
4. ไขมัน, น้ำมัน
5. เกลือและแร่ธาตุที่เป็นพิษ เช่น โลหะหนัก
6. สารที่ทำให้เกิดฟอง

7. ความร้อน
8. สารพิษต่างๆ เช่น ขาม้าแมลง
9. สีและกลิ่น

ประเภทน้ำเสีย

1. น้ำเสียชุมชน
2. น้ำเสียจากโรงงาน

ระบบบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง



ภาพที่ 17 ระบบบำบัดน้ำเสียแห่งหนึ่ง

ที่มา: ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง

การคำนวณอัตราความสูญเสียของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บมีความสูญเสีย 2 ประเภท คือ ความสูญเสียจากการปฏิบัติงาน (Working loss) และความสูญเสียจากสภาพแวดล้อมของถังเก็บ (Breathing loss) สามารถคำนวณได้จาก

จากสูตร
$$L_W = 2.40 \times 10^{-5} \times M_V \times P_V \times \varphi \times N \times K_n \times K_C \quad (3)$$

โดยที่ L_w = การระเหยจากการปฏิบัติงาน; (ปอนด์ต่อปี)

M_v = น้ำหนักโมเลกุลของไอในถังเก็บของเสียอันตราย; (ปอนด์ต่อปอนด์โมล)

P_v = ความดันไอจริงที่สถานะของเหลว; (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

N = จำนวนครั้งการเก็บต่อปี; (ไม่มีหน่วย)

V = ความจุของถังเก็บ; (แกลลอน)

K_n = อัตราการเก็บ; (ไม่มีหน่วย คำนวณได้จาก $K_n = \frac{180 + N}{N}$)

K_c = อัตราการระเหย; (ไม่มีหน่วย สำหรับน้ำมันดิบ $K_c = 0.84$ และสำหรับสารอินทรีย์อื่นที่เป็นของเหลว $K_c = 1$)

ความสูญเสียที่เกิดจากการระเหยที่อุณหภูมิปกติและความกดอากาศไม่คงที่ บริเวณที่ตั้งของถังปิดชนิดฝาถังอยู่กับที่ทำให้เกิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกสู่บรรยากาศผ่านระบายอากาศของถัง ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ระดับของของเสียอันตรายในถังเก็บมีการเปลี่ยนแปลง และสามารถหาความสูญเสียนี้ได้จากสมการด้านล่าง

$$L_b = 2.26 \times 10^{-2} \times M_v \times \left(\frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \right)^{0.68} \times D^{1.73} \times H^{0.51} \times T^{0.5} \times F_p \times c \times K_c \quad (4)$$

โดยที่ L_b = การระเหยออกจากถังชนิดหลังคาอยู่กับที่; (ปอนด์ต่อปี)

M_v = น้ำหนักโมเลกุลของไอในถังเก็บของเสียอันตราย; (ปอนด์ต่อปอนด์โมล)

P_v = ความดันไอจริงที่สถานะของเหลว; (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

P_{atm} = ความดันบรรยากาศเฉลี่ยที่จุดตั้งถังเก็บ; (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง; (ฟุต)

H = ความสูงเฉลี่ยของไอในถังเก็บ; (ฟุต ประมาณการ โดยคิดที่ 50% ของถัง)

T = อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในหนึ่งวันโดยเฉลี่ย; (องศาฟาเรนไฮด์ ประมาณการที่ 20 องศาฟาเรนไฮด์)

F_p = อัตราการของสี; (ไม่มีหน่วย สามารถได้จากตารางด้านล่าง)

c = ตัวคูณสำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก; (ไม่มีหน่วย สำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ≥ 30 ฟุต, $C = 1$ และสำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง < 30 ฟุต, $C = 0.0771D - 0.0013D^2 - 0.1334$)

K_c = อัตราการระเหย; (ไม่มีหน่วย สำหรับน้ำมันดิบ $K_c = 0.65$ และสำหรับสารอินทรีย์อื่นที่เป็นของเหลว $K_c = 1.0$)

คำนวณหาความดันไอจริงของของเหลวในน้ำเสียที่เป็นของเหลวผสมกันได้โดยใช้ Henry's law ดังสมการต่อไปนี้ เนื่องจาก Raoult's law นั้นจะใช้กับสารบริสุทธิ์เท่านั้น

$$\text{จากสูตร } P_V = \sum P_{Vi} \quad (5)$$

โดยที่ P_V หมายถึง ความดันไอจริงของถังเก็บ, (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

P_{Vi} หมายถึง ความดันไอของแต่ละสารบริสุทธิ์, (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

$$\text{และจากสูตร } P_{Vi} = \sum (H_i) \cdot (C_i) \quad (6)$$

โดยที่ P_{Vi} หมายถึง ความดันไอจริง, (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

H_i หมายถึง ค่าคงที่ของแต่ละสารตามกฎของ Henry, (atm-m³/g-mole)

C_i หมายถึง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละสารในน้ำ, (กรัม-โมลต่อลบ.ม.)

เนื่องจากความเข้มข้น ที่ตรวจวัดได้มีหน่วยเป็น mg/l ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับ g/m³ และแปลงหน่วยจาก g/m³ เป็น g-mole ด้วยนำเอาความเข้มข้นหารด้วยน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสาร

คำนวณหาปริมาตรของถังกักมันต์

ปริมาตรถังกักมันต์ที่ต้องใช้ = ปริมาณสารพิษ X ความสามารถในการดูดซับของถังกักมันต์

ในการออกแบบระบบดูดซับต้องคำนวณความดันที่สูญเสียไปในระบบทุกจุดเพื่อใช้ในการเลือกขนาดของ Blower ที่เหมาะสม

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_P - h_{\text{loss}, t} \quad (7)$$

การไหลในท่อ

การศึกษาถึงการไหลของของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้ ซึ่งไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อภายใต้ความดันภายใต้ของการไหลที่มีผลของความหนืดนั้นจะทำให้เกิดความดันลดและสูญเสียพลังงานขณะไหลผ่านท่อ การคำนวณหาความดันลดหรืออัตราการไหลนี้จะต้องใช้สมการพลังงานและสมการต่อเนื่อง สำหรับพลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากของเหลวที่มีความหนืดไหลไปตามความยาวท่อ และคำนวณได้โดยตรงจากตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) พลังงานสูญเสียนี้เรียกว่า เฮดสูญเสียหลัก (major head loss) นอกจากนี้พลังงานความสูญเสียยังเกิดจากการไหลผ่านส่วนประกอบในระบบท่อ เช่น ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่ม พื้นที่หน้าตัด เป็นต้น พลังงานสูญเสียนี้เรียกว่า เฮดความสูญเสียรอง (minor head loss)

การไหลแบบการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flows)

การไหลแบบลามินาร์ หรือการไหลแบบราบเรียบ เป็นการไหล ซึ่งอนุภาคของของไหลมีการเคลื่อนตัวอย่างเป็นระเบียบ ความเร็วของแต่ละอนุภาคไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การไหลแบบเทอร์บิวแลนต์ หรือการไหลแบบปั่นป่วนนั้น ความเร็วของแต่ละอนุภาคจะมีขนาดและทิศทางไม่แน่นอน

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหล ที่จะนำไปสู่การไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนได้แก่ ความเร็ว และความหนืดของของไหล ตลอดจนขนาดของท่อ ตามความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number) ดังนี้คือ

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{D v}{\nu} \quad (8)$$

โดยที่ Re = เลขเรย์โนลด์
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
 V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ (m/s)
 μ = ความหนืดพลวัต (N.s/m^2)
 ν = ความหนืดจลนศาสตร์ (m^2/s)

โดยทั่วไป จะจำแนกชนิดของการไหลตามค่าเลขเรย์โนลด์ ดังนี้คือ

$Re < 2100$ การไหลในท่อจะเป็นแบบราบเรียบ
 $2100 < Re < 4000$ การไหลจะเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลง (Transition) จากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

การสูญเสียหลัก (Major Losses)

ความสูญเสียของการไหลในท่อที่สำคัญ มีสาเหตุมาจากแรงเสียดทาน อันเนื่องมาจากความหนืดของของไหล และแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อ เรียกว่าการสูญเสียหลัก ซึ่งสามารถคำนวณ ได้จาก Darcy-Weisbach Equation ดังนี้คือ

$$H_{\text{loss},f} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

โดยที่ $h_{\text{loss},f}$ = ความสูญเสีย อันเนื่องมาจากความเสียดทานของการไหล (m)
 f = ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor)
 L = ความยาวของท่อช่วงที่พิจารณา (m)
 V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ (m/s)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน คือ

$$f = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

เมื่อ Re คือ ค่าเลขเรย์โนลด์

สำหรับการไหล แบบปั่นป่วน ค่าตัวประกอบความเสียดทาน ไม่ได้ขึ้นกับค่าเลขเรย์โนลด์ เพียงอย่างเดียว เหมือนการไหลแบบลามินาร์ แต่ยังขึ้นอยู่กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (Relative Roughness, $\frac{\epsilon}{D}$) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าความขรุขระของผนังท่อ (ϵ) กับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (D) ค่าความขรุขระของผนังท่อ สามารถเปิดดูได้จากตาราง

ตารางที่ 9 ความขรุขระของท่อ (ϵ)

ชนิดของท่อ	ϵ , mm.
เหล็กย้ำหมุด (Riveted Steel)	0.9-9.0
คอนกรีต	0.3-3.0
ไม้ประกะบ (Wood stave)	0.2-0.9
เหล็กหล่อ (Cast Iron)	0.25-0.26
เหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Iron)	เหล็กหล่อ 0.15
อาบยางมะตอย (Asphalted Cast Iron)	เหล็กตลาดหรือเหล็ก 0.1-0.12
เหนียว (Commercial Steel or Wrought Iron)	ท่อรัด (Drown Tubing), 0.046
ท่อ Polyvinyl Chloride (ท่อ P.V.C)	0.0015

ที่มา: มนตรี (2550)

การสูญเสียรอง (Minor Losses)

ความสูญเสียของการไหลในท่อ อีกสาเหตุหนึ่งซึ่งเรียกว่า การสูญเสียรองเกิดจากการเปลี่ยนแปลง ขนาดและความเร็วของการไหล เช่น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของการไหล การไหลผ่าน ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่ม หรือ วาล์ว เป็นต้นซึ่งเขียนในรูปสมการดังนี้

$$h_{\text{loss,m}} = K \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

โดยที่ K คือสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) นอกจากนี้อาจพิจารณาการสูญเสียจากความดันเทียบเท่าการสูญเสียจากความดันภายในท่อตรงแทน โดยจะกำหนด L_e เป็นความยาวสมมูล(equivalent length)

อุปกรณ์และวิธีการ

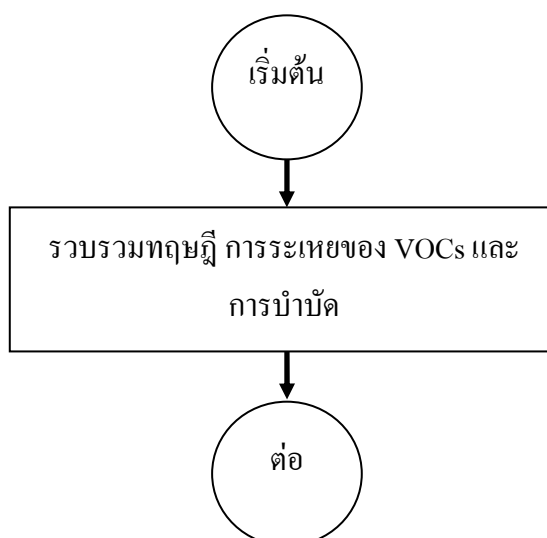
อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์เสริมประกอบ
 - 1.1 งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ชนิดพกพา รุ่น Toshiba Satellite A100 หน่วยประมวลผลกลาง Intel Pentium 3 หน่วยความจำของระบบ 1 GB และหน่วยความจำสำรองเท่ากับ 120 GB ในการคำนวณ
 - 1.2 เครื่องพิมพ์ Cannon iP1900 series
 - 1.3 เครื่องแสกนภาพ
2. โปรแกรม Microsoft office 2003 ในการจัดทำเอกสาร

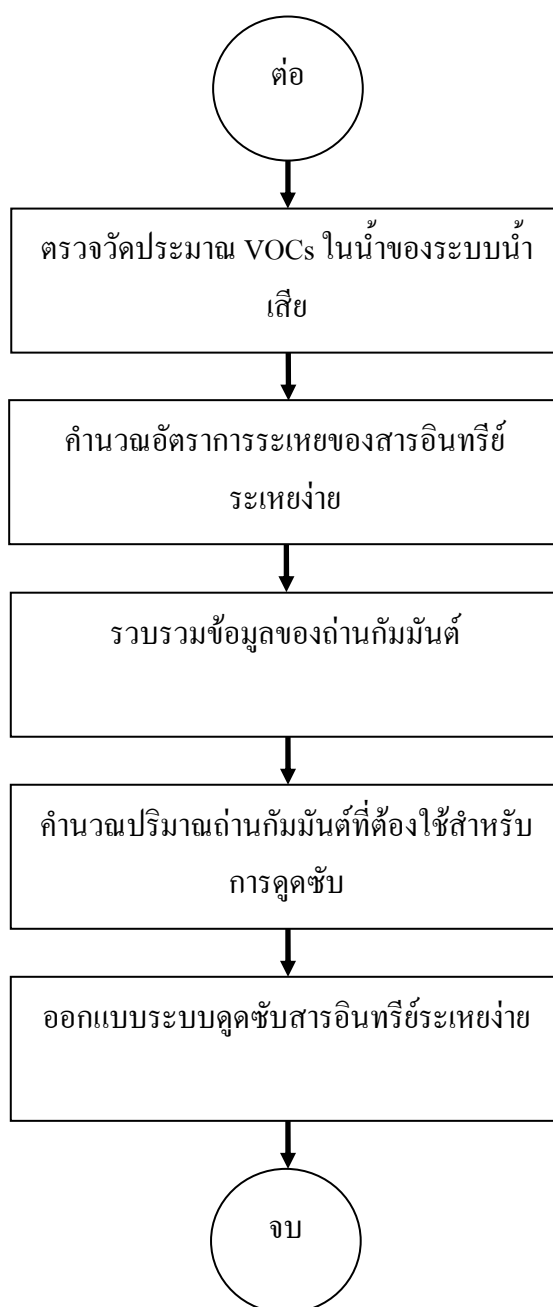
วิธีการ

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถนำมาสรุปเป็นวิธีการในแบบของแผนภูมิได้ดังนี้

1. เก็บข้อมูลรวบรวมข้อมูล

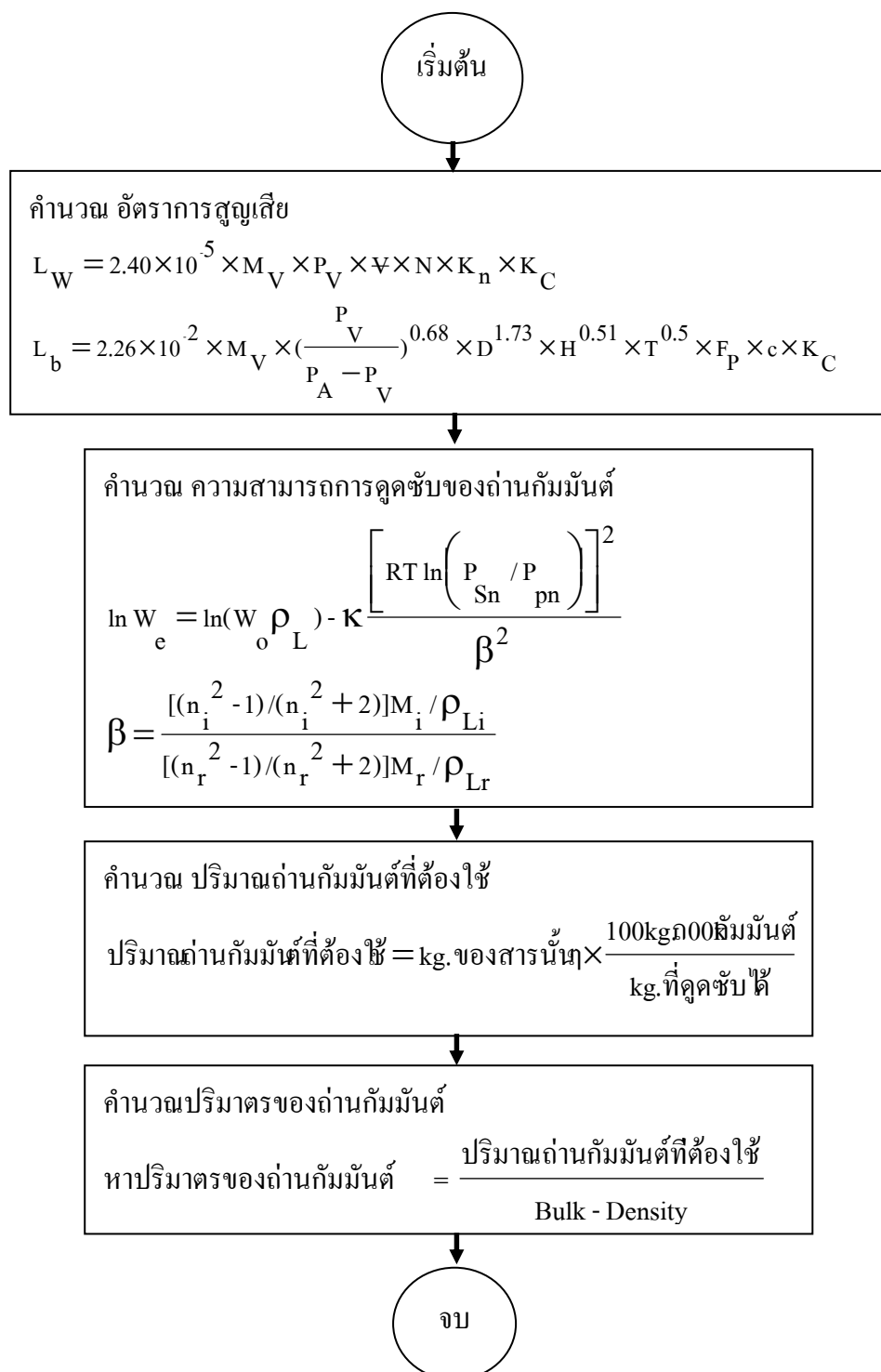


ภาพที่ 18 แผนภาพการเก็บรวบรวมข้อมูล



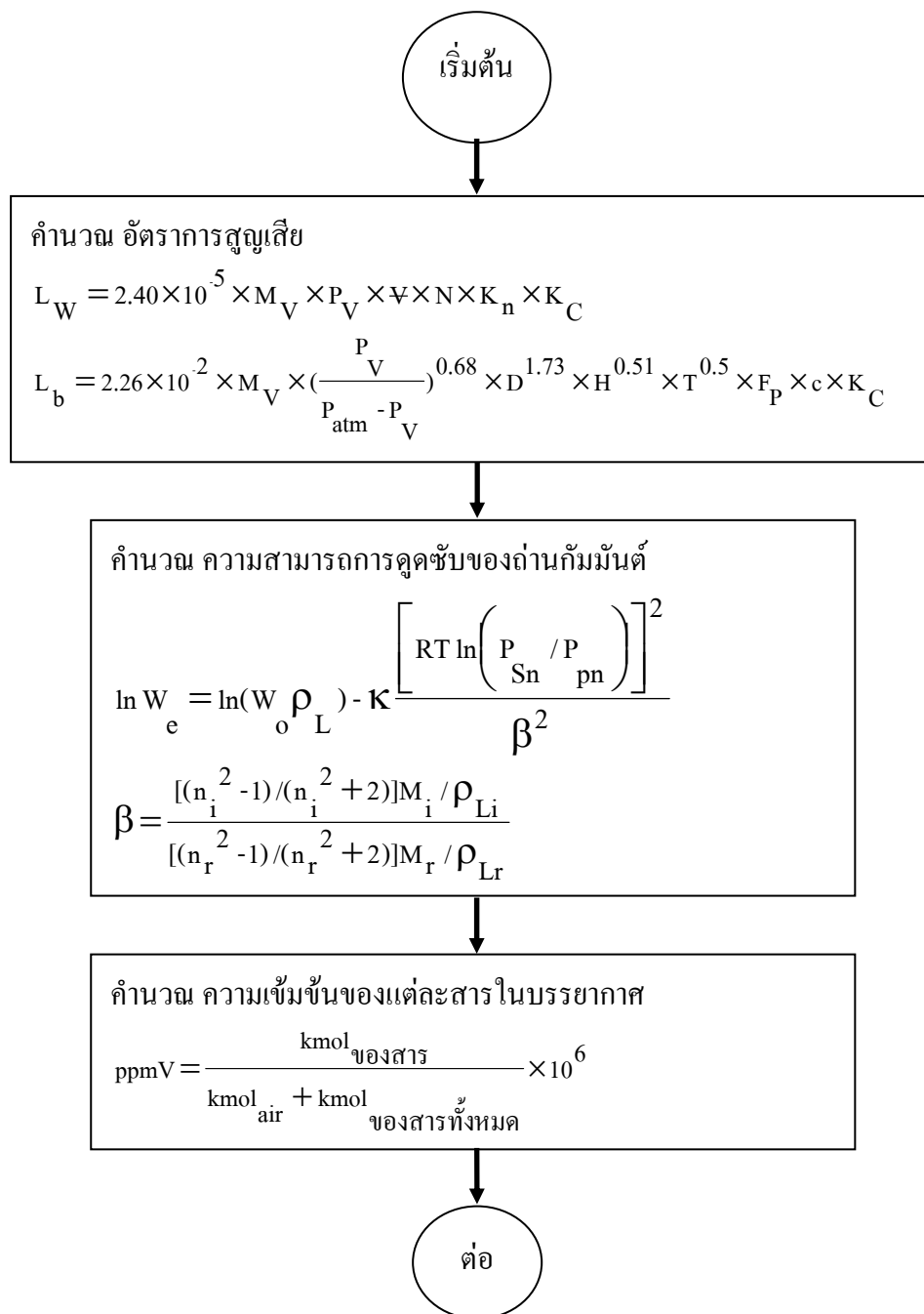
ภาพที่ 18 (ต่อ)

2. ออกแบบระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการระเหยแบบธรรมชาติ

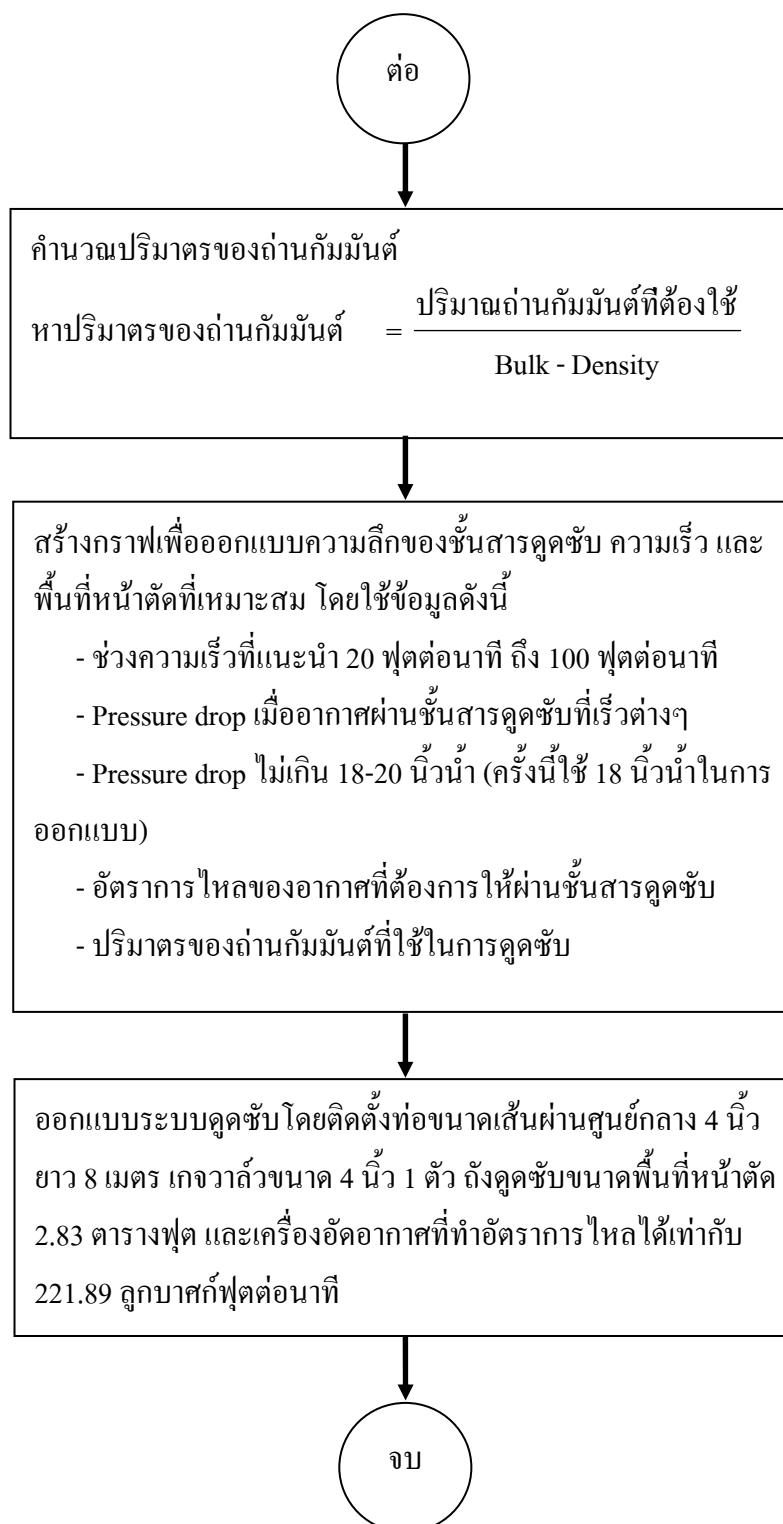


ภาพที่ 19 การออกแบบระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการระเหยแบบธรรมชาติ

3. ออกแบบระบบดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการกำหนดให้มีความเร็วในช่วง 20 ฟุตต่อนาที ถึง 100 ฟุตต่อนาที



ภาพที่ 20 ออกแบบระบบดูดซับโดยการกำหนดความเร็ว



ภาพที่ 20 (ต่อ)

ผลและวิจารณ์

ผล

จากการศึกษาของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถึงเก็บกักสารเคมีของระบบบำบัดน้ำเสียพบว่า มีสารอินทรีย์ระเหยในน้ำมี 8 ชนิด คือ

ตารางที่ 10 ผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ในของเหลวในถังเก็บสารเคมี

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	Mg/l
Benzene	8.73
Ethylbenzene	0.55
Styrene	3.62
Toluene	4.08
O-Xylene	0.44
M&p-Xylene	0.27
Phenol	0.083
M&p-Cresol	0.013

เมื่อได้ผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ในของเหลวแล้ว คำนวณหาอัตราการระเหยของผล การคำนวณอัตราการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยคำนวณขณะที่มีการส่งถ่ายของเสียจากระบบบำบัดเข้าเก็บในถัง (Working loss, L_w) และขณะที่ไม่มีการส่งถ่ายเข้าถัง (Breathing loss, L_b) และนำผลการคำนวณทั้งสองมารวมกันจะได้อัตราการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดต่อปี

โดยปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง ดังนี้

1. การระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยคำนวณขณะที่มีการส่งถ่ายของเสียจากระบบบำบัดเข้าเก็บในถัง

- 1.1 น้ำหนักโมเลกุลของไอในถังเก็บของเสียอันตราย
 - 1.2 ความดันไอจริงที่สถานะของเหลว
 - 1.3 จำนวนครั้งการเก็บต่อปี
 - 1.4 ความจุของถังเก็บ
 - 1.5 อัตราคูณการเก็บ
 - 1.6 อัตราคูณการระเหย
2. การระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยคำนวณขณะที่ไม่มีการส่งถ่ายเข้าถัง
 - 2.1 การระเหยออกจากถังขณะคงที่
 - 2.2 น้ำหนักโมเลกุลของไอในถังเก็บของเสียอันตราย
 - 2.3 ความดันไอจริงที่สถานะของเหลว
 - 2.4 ความดันบรรยากาศเฉลี่ยที่จุดตั้งถังเก็บ
 - 2.5 เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง
 - 2.6 ความสูงเฉลี่ยของไอในถังเก็บ
 - 2.7 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในหนึ่งวันโดยเฉลี่ย
 - 2.8 อัตราคูณของสี่
 - 2.9 ตัวคูณสำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก
 - 2.10 อัตราคูณการระเหย

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณอัตราการระเหยทั้งหมด

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	Working loss, L_w (Mg/yr)	Breathing loss, L_b (Mg/yr)	Total loss (Mg/yr)
Benzene	5.10E-03	3.80E-04	5.48E-03
Ethylbenzene	3.00E-05	5.34E-06	3.54E-05
Styrene	1.45E-04	2.00E-05	1.65E-04
Toluene	1.26E-03	1.21E-04	1.38E-03
O-Xylene	7.36E-06	1.64E-06	9.00E-06
M&p-Xylene	6.45E-06	1.47E-06	7.92E-06

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	Working loss, L_w (Mg/yr)	Breathing loss, L_b (Mg/yr)	Total loss (Mg/yr)
Phenol	2.10E-14	1.07E-13	1.28E-13
M&p – Cresol	1.30E-16	1.52E-15	1.65E-15

ผลของการคำนวณปริมาณคาร์บอนที่ต้องใช้จากการคำนวณโดยการระเหยตามธรรมชาติ

ตารางที่ 12 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ในการดูดซับในช่วงระยะเวลา 2 เดือนโดยการระเหยตามธรรมชาติ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ความสามารถในการดูดซับต่อ ถ่านกัมมันต์ (kg.VOCs/kg.Carbon)	ถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ต่อ 2 เดือน (kg.)
Benzene	0.28	3.15E+00
Ethylbenzene	0.30	1.78E-02
Styrene	0.32	7.82E-02
Toluene	0.30	7.17E-01
o -Xylene	0.30	4.49E-03
M&p - Xylene	0.29	4.11E-03
Phenol	0.12	9.97E-11
M&p - Cresol	0.13	1.06E-12

และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้คำนวณเพื่อเพื่อความปลอดภัย 100% จะใช้ถ่านกัมมันต์ประมาณ 10 กิโลกรัมต่อ 2 เดือน การคำนวณแสดงในภาคผนวก

ผลของการคำนวณปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้จากการคำนวณโดยการออกแบบให้มีความเร็ว

ตารางที่ 13 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้จากการคำนวณโดยการออกแบบให้มีอัตราการไหล
221.89 ft³/min

สารอินทรีย์ ระเหยง่าย	Vol ของสาร ต่างๆ ต่อ 2 เดือน (m ³)	มวลของสาร (kg)	ปริมาณถ่านกัม มันต์ (kg. carbon)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (m ³) safety factor = 1.2
Benzene	1.34E+01	4.28E+01	1.55E+02	3.87E-01
Ethylbenzene	1.34E+01	4.28E+01	1.55E+02	2.29E-03
Styrene	6.36E-02	2.76E-01	9.18E-01	9.75E-03
Toluene	3.02E-01	1.29E+00	3.90E+00	8.92E-02
o-Xylene	2.85E+00	1.08E+01	3.57E+01	5.88E-04
m&p-Xylene	1.62E-02	7.03E-02	2.35E-01	5.39E-04
Phenol	1.42E-02	6.19E-02	2.16E-01	2.07E-11
m&p-Cresol	2.59E-10	9.98E-10	8.29E-09	2.39E-13
รวม			195.90	0.49

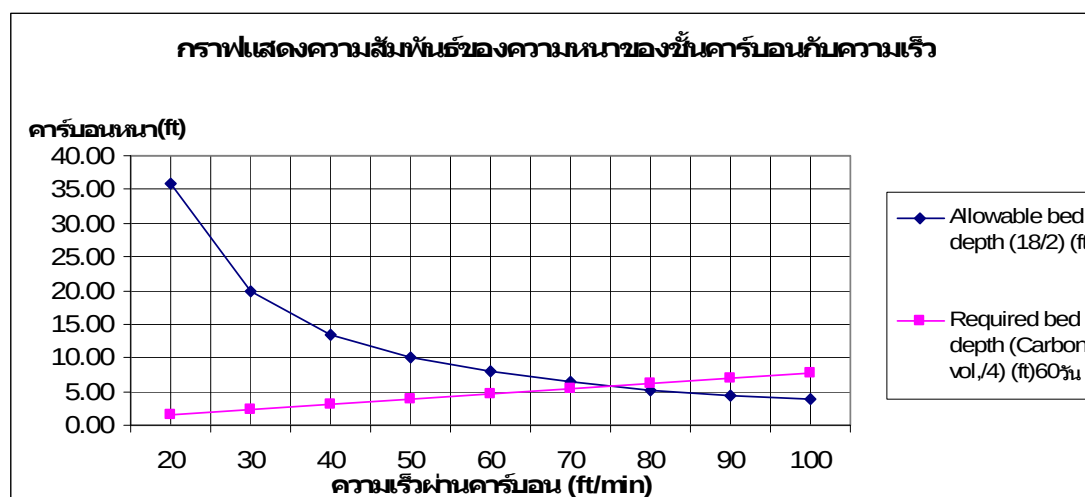
ออกแบบด้วยตารางความสัมพันธ์ด้านล่าง

ตารางที่ 14 ตารางการออกแบบถังดูดซับ

1	2	3	4	5
ความเร็วของ อากาศที่ไหลผ่าน ถ่านกัมมันต์ (ฟุต/ นาทีก)	ความดันตกคร่อม (นิ้วน้ำ/ฟุต)	Allowable bed depth (18/2) (ฟุต)	Required cross section area of bed (Q/1) (ตารางฟุต)	Required bed depth (ปริมาตร ถ่านกัมมันต์/4) (ฟุต)
20	0.50	35.93	11.09	1.17
30	0.91	19.82	7.40	1.75

ตารางที่ 14 (ต่อ)

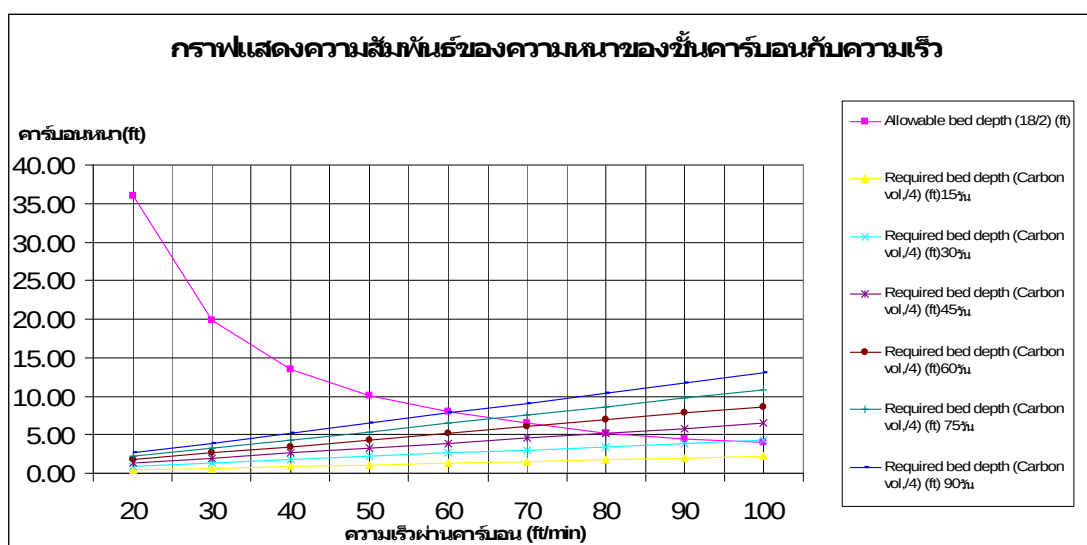
1	2	3	4	5
ความเร็วของ อากาศที่ไหลผ่าน ถ่านกัมมันต์ (ฟุต/ นาที)	ความดันตกคร่อม (นิ้วน้ำ/ฟุต)	Allowable bed depth (18/2) (ฟุต)	Required cross section area of bed (Q/1) (ตารางฟุต)	Required bed depth (ปริมาตร ถ่านกัมมันต์/4) (ฟุต)
40	1.33	13.49	5.55	2.34
50	1.78	10.12	4.44	2.92
60	2.26	7.96	3.70	3.51
70	2.74	6.57	3.17	4.09
80	3.45	5.22	2.77	4.68
90	4.06	4.44	2.47	5.26
100	4.55	3.95	2.22	5.85



ภาพที่ 21 แสดงความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านที่ความดันลด
ออกแบบ 18 นิ้วน้ำ อัตราการไหลของอากาศเสีย 221.89 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที โดย
ปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับเท่ากับ 60 วัน

จากกราฟ ได้ความลึก 5.90 ฟุต และความเร็ว 75 ฟุตต่อนาที ดังนั้น พื้นที่หน้าตัด จะได้ 2.96 ตารางฟุต ซึ่งความลึกของชั้นสารดูดซับนั้นมากกว่า 3 ฟุต

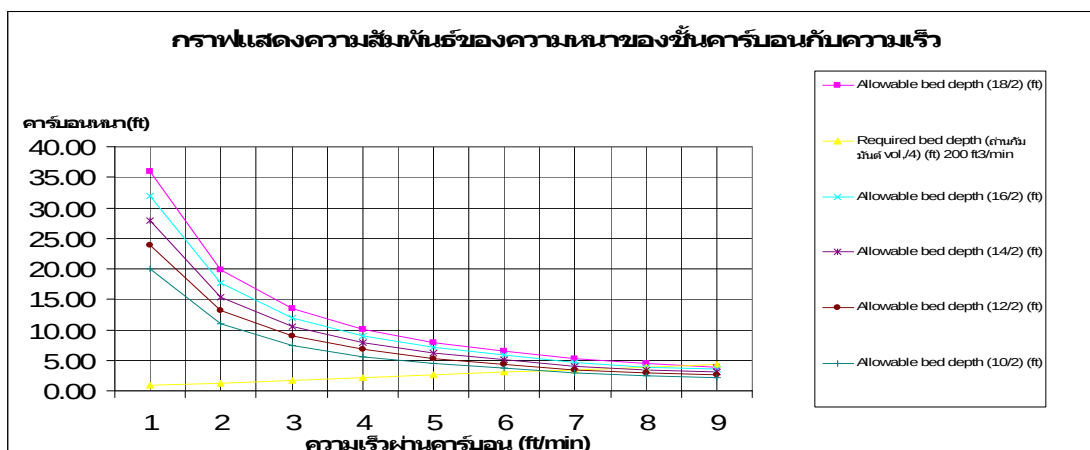
จึงทำการสร้างกราฟใหม่เพื่อออกแบบให้ได้ความหนาของชั้นสารดูดซับใกล้เคียง 3 ฟุต หรือน้อยกว่า โดยกำหนดระยะเวลาในการดูดซับที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ที่อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ดังนี้



ภาพที่ 22 แสดงความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านที่ความดันลด ออกแบบ 18 นิ้วน้ำ อัตราการไหลของอากาศเสีย 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับที่ออกแบบเป็น 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

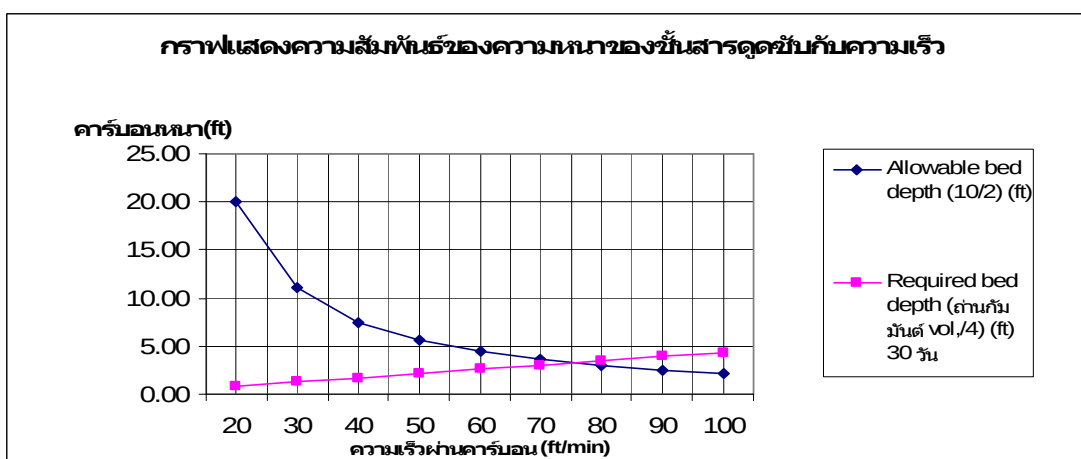
จากกราฟด้านบนพบว่าหากลดระยะเวลาดูดซับลงความหนาของสารดูดซับจะลดน้อยลง

จากนั้นได้ทำการทดลองหาจุดออกแบบที่ 30 วัน เนื่องจากจุดตัดกราฟอยู่ใกล้ความหนาของชั้นดูดซับ 3 ฟุตมากที่สุด โดยปรับเปลี่ยนความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับจาก 18, 16, 14, 12 และ 10 นิ้วน้ำ



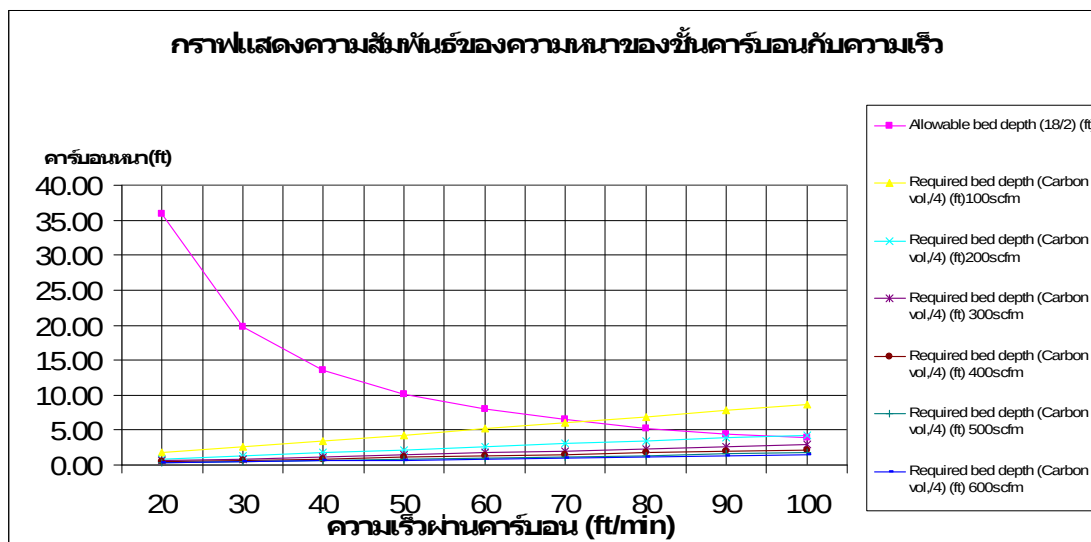
ภาพที่ 23 แสดงระยะเวลาในการดูดซับ 30 วัน อัตราการไหลของอากาศเสีย 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อ นาที โดยปรับเปลี่ยนความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับที่ออกแบบเป็น 18, 16, 14, 12 และ 10 นิ้วน้ำ

จากกราฟด้านบนภายใต้ระยะเวลาดูดซับ 30 วัน (คงที่) พบว่าการออกแบบให้ total pressure drop ชั้นสารดูดซับน้อยลงก็ทำให้ความหนาของชั้นสารดูดซับน้อยลง ดังนั้น ที่อัตราการไหลของอากาศเสียเท่ากับ 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับ 10 นิ้วน้ำ ได้ความลึกของชั้นดูดซับ 3.13 ฟุต พื้นที่หน้าตัด 2.67 ตารางฟุต ความเร็ว 75 ฟุตต่อนาที



ภาพที่ 24 แสดงระยะเวลาในการดูดซับ 30 วัน อัตราการไหลของอากาศเสีย 200 ลูกบาศก์ฟุตต่อ นาที และความดันตกคร่อมสารดูดซับ 10 นิ้วน้ำ

ทดลองออกแบบใช้ระยะเวลาการดูดซับ 30 วัน ความดันตกคร่อมเท่ากับ 18 นิ้วน้ำ โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเสีย 100-600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที



ภาพที่ 25 แสดงระยะเวลาในการดูดซับ 30 วัน ความดันตกคร่อมสารดูดซับ 18 นิ้วน้ำ โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเสียผ่านชั้นสารดูดซับเป็น 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากกราฟด้านบนพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเสียเพิ่มมากขึ้นชั้นความลึกของสารดูดซับก็ลดน้อยลงและนำอัตราการไหลดังกล่าวมาหาขนาดของเครื่องอัดอากาศได้ ดังนี้

ตารางที่ 15 ตารางแสดงขนาดของเครื่องอัดอากาศที่อัตราการไหล 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยกำหนดขนาดท่อส่ง 4 นิ้ว ความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับ 18 นิ้วน้ำ

อัตราการไหลของอากาศเสีย, ft ³ /min	ขนาดของเครื่องอัดอากาศ, kW (80%)	ขนาดแรงม้าของเครื่องอัด อากาศ
100	0.293	0.393
200	0.586	0.785
300	0.879	1.178

ตารางที่ 16 (ต่อ)

ลำดับที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วยนับ	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
6	ประเก็น	7	ตัว	50	350
7	Blower	1	เครื่อง	18,000	18,000
8	ถังบรรจุสารดูดซับ	1	ถัง	50,000	50,000
9	ค่าแรงการก่อสร้างทั้งหมด	-	-	-	50,000
รวม					164,350

วิจารณ์

สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นอันตรายทั้งกับผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม และแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่รอบๆ ตัวเรา ทั้งจากเครื่องใช้อำนวยความสะดวกต่างๆ และจากโรงงานอุตสาหกรรม

จึงทำการศึกษาการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งจะทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยสามารถประมาณการได้จากการคำนวณ และจากการคำนวณทำให้ทราบปริมาณของสารอินทรีย์ที่แพร่กระจายในบรรยากาศที่จะต้องแก้ไขโดยการออกแบบระบบบำบัดอากาศเสียก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การคาดการณ์ได้ยากนั้น คือ ระบบบำบัดน้ำเสียนั้นชนิดและปริมาณของเสียที่เข้ามาในระบบนั้นไม่คงที่ ต่างจากถังเก็บสารเคมีชนิดเดียวที่ทราบองค์ประกอบของสารที่บรรจุอยู่ในถังเก็บอย่างชัดเจน ทั้งคุณสมบัติของสาร ปริมาณ และระยะเวลาในการกักเก็บ ค่อนข้างคงที่ ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ง่ายกว่าระบบบำบัด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากถังเก็บกากของเสียจากระบบบำบัดนั้น พบว่ามีสาร Benzene เท่ากับ 8.73 มิลลิกรัมต่อลิตร Ethylbenzene Stylyne เท่ากับ 0.55 มิลลิกรัมต่อลิตร Toluene เท่ากับ 4.08 มิลลิกรัมต่อลิตร o-Xylene เท่ากับ 0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร m&p-Xylene เท่ากับ 0.27 มิลลิกรัมต่อลิตร Phenol เท่ากับ 0.083 มิลลิกรัมต่อลิตร และ m&p-Cresol เท่ากับ 0.013 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำไปคำนวณอัตราการระเหยได้เท่ากับ $5.29\text{E-}03$ Mg/yr, $3.26\text{E-}05$, $1.55\text{E-}04$, $1.32\text{E-}03$, $8.16\text{E-}06$, $7.17\text{E-}06$, $7.30\text{E-}14$ และ $8.73\text{E-}16$ Mg/yr ตามลำดับ และนำไปออกแบบระบบดูดซับโดยกำหนดให้มีความเร็วของอากาศเสียไหลผ่านชั้นดูดซับในช่วง 20-100 ฟุตต่อนาที และแรงดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับไม่เกิน 18-20 นิ้วน้ำ พบว่าสามารถออกแบบได้หลายแบบ เช่น ออกแบบระบบให้มีระยะเวลาดูดซับ 30 วัน และปรับอัตราการไหลในช่วง 100-600 ft^3/min จุดตัดที่ได้ชั้นความลึกของสารดูดซับน้อยที่สุด คือ 200 ft^3/min และถ้าออกแบบระบบให้มีอัตราการไหลของสารเท่ากับ 221.89 ft^3/min แล้วปรับระยะเวลาการดูดซับตั้งแต่ 15-90 วัน พบว่าจุดตัดที่ได้ชั้นความลึกของสารดูดซับน้อยที่สุด คือ 45 วัน จากการปรับอัตราการไหลข้างต้นก็จะทำให้ขนาดของเครื่องอัดอากาศเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยส่งผลถึงราคาในการสร้างระบบดูดซับด้วย การออกแบบระบบดูดซับนี้มีข้อจำกัด 2 เรื่อง คือ ความเร็วของอากาศเสียไหลผ่านชั้นดูดซับในช่วง 20 ถึง 100 ฟุตต่อนาที และแรงดันตกคร่อมชั้นดูดซับไม่เกิน 18-20 นิ้วน้ำ ทั้งนี้การออกแบบสามารถปรับค่าต่างๆ ได้ตามความต้องการ แต่หากนำอัตราการระเหยนี้ไปคำนวณเพื่อออกแบบด้วยการระเหยตามธรรมชาตินั้นอาจเกิดปัญหาการไหลแบบไม่กระจายทั่วถึงจึงยากต่อการคาดการณ์

การระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากระบบบำบัดน้ำเสียนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บ ขนาดของถังเก็บ คุณสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิด อุณหภูมิของของเสีย อุณหภูมิบริเวณของถังเก็บ อัตราการไหลในการส่งของเสีย ระยะเวลาในการกักเก็บ วิธีการส่งของเสียเข้ามาเก็บในถังเก็บสารเคมีเป็นแบบต่อเนื่องหรือเป็นแบบส่งระยะเวลาหนึ่งแล้วก็หยุดส่ง เหล่านี้เป็นต้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นต้องควบคุมทุกกระบวนการตั้งแต่การเลือกใช้วัตถุดิบในการผลิต เทคโนโลยีในกระบวนการผลิต การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ให้พร้อมใช้งาน

ตลอดเวลา รวมถึงลักษณะการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน ทั้งนี้การออกแบบระบบควบคุมขั้นนั้นจัดเป็น การช่วยแก้ไขปัญหามุ่งเน้นขั้นตอนสุดท้ายที่จะมีการปล่อยอากาศจากระบบการผลิตสู่บรรยากาศ

ข้อเสนอแนะ

1. การคำนวณปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ออกจากถังเก็บสารเคมีนั้นเป็นการประมาณ การอย่างคร่าวๆ หากต้องการทราบค่าที่แท้จริงต้องทำการตรวจวัดจริงด้วยเครื่องมือตามมาตรฐาน จึงจะได้ค่าที่แท้จริง

2. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บกาก ของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียเท่านั้นและหากต้องการศึกษาการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหย ง่ายที่จากหน่วยบำบัดอื่นๆ เช่น ในรถบรรทุกของเสีย หรือรางส่งน้ำเสีย ก็จะใช้สมการในการ คำนวณที่แตกต่างกันไปอีก

3. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากระบบบำบัดน้ำเสีย เท่านั้น จึงไม่ครอบคลุมหน่วยอื่นๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการผลิต ถังเก็บสารเคมี ต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต ในการทำงานจริงควรต้องศึกษาทุกหน่วยที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ เพื่อจะได้ทราบปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปล่อยออกมาทั้งระบบซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อ การประเมินว่าในสภาพแวดล้อมในการทำงานนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4. การออกแบบระบบบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้น ต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ ในทุกๆ ด้าน ทั้งในเชิงเทคโนโลยี ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ และความปลอดภัย ในการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นพภาพร พานิช และคณะ. 2547. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, ศูนย์บริการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มนตรี พิรุณเกษตร. 2550. กลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์วิทย์พัฒน์, กรุงเทพฯ.

วรารุช เสือดี. สารประกอบอินทรีย์แนวทางการจัดทำบัญชีการปล่อยและการควบคุม. โครงการเพิ่มศักยภาพการบริหารจัดการสารประกอบอินทรีย์ระเหยในบริเวณพื้นที่มาบตาพุด จังหวัดระยอง. มุลินธิสิ่งแวดล้อมไทย

วิฑูรย์ สิมะโชคดี และ วีรพงษ์ เณิมจิระรัตน์. 2548. วิศวกรรมและการบริหารความปลอดภัยในโรงงาน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ ทรงกิตติ. ม.ป.ป. สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน. กรมโรงงานอุตสาหกรรม

Daniel, A. C. and F. L. Joseph. 2002. **Chemical Process Safety Fundamentals with Applications.** Prentice Hall PVR Prentice Hall, Inc.

Frank, R. S. and E. W. Nancy. 2005. **Safety Engineering Principles and Practices.** Government Institutes, an imprint of The Scarecrow Press, Inc.

Prakasam, T., W. Jay and L. Cecil. 2003. **VOC Emissions from Wastewater Treatment Plants.** United States of America

U.S. EPA Contract No. 68D10118. 1994. **AIR EMISSIONS MODELS FOR WASTE AND WASTEWATER.** Research Triangle Park, North Carolina.

<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch07/final/c07s01.pdf>

http://www.wbdg.org/ccb/ARMYCOE/COEDG/dg_1110_1_2.pdf

<http://monitor.onep.go.th/document/voc.htm>

http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_basic.htm

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณอัตราภาระเหี้ยทั้งหมดและการออกแบบระบบดูดซับ

ข้อมูลผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในถังเก็บของเสียอันตรายของระบบบำบัดน้ำเสีย

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลของสารแต่ละชนิด

	mg/l	น้ำหนักโมเลกุล (kg/k-mole)	HL at 25°C (atm-m ³ /mole)	P _{Sn} (mm HG)
Benzene	8.73	78.1	5.550E-03	95.2
Ethylbenzene	0.55	106.2	7.881E-03	10
Styrene	3.62	104.2	2.605E-03	7.3
Toluene	4.08	92.4	6.420E-03	30
o-Xylene	0.44	106.2	4.878E-03	7
M&p-Xylene	0.27	106.16	7.440E-03	9.5
Phenol	0.083	94.1	1.300E-06	0.341
M&p-Cresol	0.013	108.1	7.000E-07	0.11

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลของถังเก็บของเสียอันตรายที่ได้จากระบบบำบัด

ข้อมูล	ระบบ SI	ระบบอังกฤษ	หน่วย
V	15.18	4010.10060	Gallon
N	2 ครั้งต่อสัปดาห์	104.28571	ครั้งต่อปี
K _n		2.72603	ไม่มีหน่วย
K _C		1	ไม่มีหน่วย
P _A		14.7	Psia
D	1.61	5.28215	ฟุต
H	3	9.84252	ฟุต
T	29	84.2	°F
F _p		1	ไม่มีหน่วย
c		0.237582476	ไม่มีหน่วย

คำนวณหาความดันไอจริงของของเหลว

$$\text{จากสูตร } P_V = \sum P_{Vi}$$

โดยที่ P_V หมายถึง ความดันไอจริงของถึงเก็บ, (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

P_{Vi} หมายถึง ความดันไอของแต่ละสารบริสุทธิ์, (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

และคำนวณหาความดันไอจริงของของเหลวในน้ำเสียที่เป็นของเหลวผสมกันได้โดยใช้ Henry's law ดังสมการต่อไปนี้ เนื่องจาก Raoult's law นั้นจะใช้กับสารบริสุทธิ์เท่านั้น

$$\text{จากสูตร } P_{Vi} = \sum (H_i) \cdot (C_i)$$

โดยที่ P_{Vi} หมายถึง ความดันไอจริง, (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

H_i หมายถึง ค่าคงที่ของแต่ละสารตามกฎของ Henry, (atm-m³/g-mole)

C_i หมายถึง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละสารในน้ำ, (กรัม-โมลต่อลบ.ม.)

เนื่องจากความเข้มข้น ที่ตรวจวัดได้มีหน่วยเป็น mg/l ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับ g/m³ และแปลงหน่วยจาก g/m³ เป็น g-mole ด้วยนำเอาความเข้มข้นหารด้วยน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสาร

แทนค่า

Benzene

$$P_{V1} = \left(5.5502 \times 10^{-03} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{8.73 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{78.1 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{ psia}}{1 \text{ atm}}$$

$$= 9.11988 \times 10^{-03} \text{ psia}$$

Ethylbenzene

$$P_{V2} = \left(7.8806 \times 10^{-03} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{0.55 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{106.2 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{psia}}{1 \text{atm}}$$

$$= 5.99950 \times 10^{-04} \text{psia}$$

Styrene

$$P_{V3} = \left(2.6048 \times 10^{-03} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{3.62 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{104.2 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{psia}}{1 \text{atm}}$$

$$= 1.33025 \times 10^{-03} \text{psia}$$

Toluene

$$P_{V4} = \left(6.42010 \times 10^{-03} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{4.08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{92.4 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{psia}}{1 \text{atm}}$$

$$= 4.16723 \times 10^{-03} \text{psia}$$

o-Xylene

$$P_{V5} = \left(4.87800 \times 10^{-03} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{0.44 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{106.2 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{psia}}{1 \text{atm}}$$

$$= 2.97089 \times 10^{-04} \text{psia}$$

m&p-Xylene

$$P_{V6} = \left(7.44020 \times 10^{-03} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{0.27 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{106.16 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{ psia}}{1 \text{ atm}}$$

$$= 2.78166 \times 10^{-04} \text{ psia}$$

Phenol

$$P_{V7} = \left(1.30000 \times 10^{-06} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{0.083 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{94.1 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{ psia}}{1 \text{ atm}}$$

$$= 1.68558 \times 10^{-08} \text{ psia}$$

m&p-Cresol

$$P_{V8} = \left(7.00000 \times 10^{-07} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g} \cdot \text{mole}} \right) \cdot \left(\frac{0.013 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{108.1 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{mole}}} \right) \cdot \frac{14.7 \text{ psia}}{1 \text{ atm}}$$

$$= 1.23747 \times 10^{-09} \text{ psia}$$

ดังนั้น $P_V = 9.11988 \times 10^{-03} \text{ psia} + 5.99950 \times 10^{-04} \text{ psia} + 1.3302 \times 10^{-03} \text{ psia} +$

$$4.16723 \times 10^{-03} \text{ psia} + 2.97089 \times 10^{-04} \text{ psia} + 2.78166 \times 10^{-04} \text{ psia} +$$

$$1.68558 \times 10^{-08} \text{ psia} + 1.23747 \times 10^{-09} \text{ psia}$$

$$= 1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}$$

คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของไอระเหยรวม

จากสูตร $M_V = \sum M_{vi} \cdot Y_i$

โดยที่ M_v หมายถึง น้ำหนักโมเลกุลของไอระเหยทั้งหมด, (กรัมต่อกรัม-โมล)

M_{vi} หมายถึง น้ำหนักโมเลกุลของสาร i ในน้ำเสีย, (กรัมต่อกรัม-โมล)

Y_i หมายถึง mole fraction ของไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิด, (ไม่มีหน่วย)

แทนค่า

Benzene

$$M_{V1} = \left(\frac{9.11988 \times 10^{-03} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 78.1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 45.1011 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Ethylbenzene

$$M_{V2} = \left(\frac{5.99950 \times 10^{-04} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 106.2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 4.03347 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Styrene

$$M_{V3} = \left(\frac{1.33025 \times 10^{-03} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 104.2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 8.77702 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Toluene

$$M_{V4} = \left(\frac{4.16723 \times 10^{-03} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 92.4 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 24.3818 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

0-Xylene

$$M_{V5} = \left(\frac{2.97089 \times 10^{-04} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 106.2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 1.9978 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

m&p-Xylene

$$M_{V6} = \left(\frac{2.78167 \times 10^{-04} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 106.16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 1.8699 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Phenol

$$M_{V7} = \left(\frac{1.68558 \times 10^{-08} \text{ psia}}{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}} \right) \times 94.1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 1.0044 \times 10^{-04} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

m&p-Cresol

$$M_{V8} = \frac{(1.2567 \text{E} - 06 \text{ psia})}{1.17088 \text{ psia}} \times 108.1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 8.47 \times 10^{-06} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

ดังนั้น

$$M_V = 45.10011 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} + 4.03447 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} + 8.77702 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} + 24.3818 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$$

$$+ 1.99783 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} + 1.86988 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} + 1.004 \text{E}^{-04} \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} + 8.47 \text{E}^{-06} \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$$

$$= 86.1622 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$$

คำนวณอัตราการระเหยทั้งหมด

จากสูตร
$$L_W = 2.40 \times 10^{-5} \times M_V \times P_V \times \Psi \times N \times K_n \times K_c$$

โดยที่ L_W = การระเหยจากการปฏิบัติงาน; (ปอนด์ต่อปี)

M_V = น้ำหนักโมเลกุลของไอในถังเก็บของเสียอันตราย; (ปอนด์ต่อปอนด์โมล)

P_V = ความดันไอจริงที่สถานะของเหลว; (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

N = จำนวนครั้งการเก็บต่อปี; (ไม่มีหน่วย)

Ψ = ความจุของถังเก็บ; (แกลลอน)

K_n = อัตราคูณการเก็บ; (ไม่มีหน่วย คำนวณได้จาก $K_n = \frac{180 + N}{N}$)

K_c = อัตราคูณการระเหย; (ไม่มีหน่วย สำหรับน้ำมันดิบ $K_c = 0.84$ และสำหรับสารอินทรีย์อื่นที่เป็นของเหลว $K_c = 1$)

ความสูญเสียที่เกิดจากการระเหยที่อุณหภูมิปกติและความกดอากาศไม่คงที่ บริเวณที่ตั้งของถังปิดชนิดฝาถังอยู่กับที่ทำให้เกิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกสู่บรรยากาศผ่านระบายอากาศของถัง ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ระดับของของเสียอันตรายในถังเก็บมีการเปลี่ยนแปลง และสามารถหาความสูญเสียนี้ได้จากสมการด้านล่าง

$$L_b = 2.26 \times 10^{-2} \times M_V \times \left(\frac{P_V}{P_{atm} - P_V} \right)^{0.68} \times D^{1.73} \times H^{0.51} \times T^{0.5} \times F_P \times c \times K_C$$

โดยที่ L_b = การระเหยขณะไม่มีการปฏิบัติงาน; (ปอนด์ต่อปี)

M_V = น้ำหนักโมเลกุลของไอในถังเก็บของเสียอันตราย; (ปอนด์ต่อปอนด์โมล)

P_V = ความดันไอจริงที่สถานะของเหลว; (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

P_{atm} = ความดันบรรยากาศเฉลี่ยที่จุดตั้งถังเก็บ; (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง; (ฟุต)

H = ความสูงเฉลี่ยของไอในถังเก็บ; (ฟุต ประมาณการ โดยคิดที่ 50% ของถัง)

T = อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในหนึ่งวันโดยเฉลี่ย; (องศาฟาเรนไฮต์ ประมาณการที่ 20 องศาฟาเรนไฮต์)

K_p = อัตราอุณหภูมิของสี; (ไม่มีหน่วย สามารถดูได้จากตารางด้านล่าง)

c = ตัวคูณสำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก; (ไม่มีหน่วย สำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ≥ 30 ฟุต, $c = 1$ และสำหรับถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง < 30 ฟุต, $c = 0.0771D - 0.0013D^2 - 0.1334$)

K_c = อัตราอุณหภูมิการระเหย; (ไม่มีหน่วย สำหรับน้ำมันดิบ $K_c = 0.65$ และสำหรับสารอินทรีย์อื่นที่เป็นของเหลว $K_c = 1.0$)

ตารางผนวกที่ ก3 ตัวคูณสีต่างๆ ของถังเก็บ

Tank color	Roof	Shell	Paint factors (F_p)	
			Paint condition	
			Good	Poor
White		White	1.00	1.15
Aluminum (specular)		White	1.04	1.18
White		Aluminum(specular)	1.16	1.24
Aluminum (specular)		Aluminum(specular)	1.20	1.29
White		Aluminum(diffuse)	1.30	1.38
Aluminum (diffuse)		Aluminum (diffuse)	1.39	1.46
White		Gray	1.30	1.38
Light gray		Light gray	1.33	1.44a
Medium gray		Medium gray	1.40	1.58a

จากสูตร

$$L_W = 2.40 \times 10^{-5} \times M_V \times P_V \times \varphi \times N \times K_n \times K_c$$

$$\text{โดยที่ } 2.40 \times 10^{-5} \text{ ทำให้เป็น Mg/turnover} \Rightarrow \left(\frac{2.40 \times 10^{-5}}{2205 \frac{\text{lb}}{\text{Mg}}} \right) = 0.0000000109$$

$$L_b = 2.26 \times 10^{-2} \times M_V \times \left(\frac{P_V}{P_{atm} - P_V} \right)^{0.68} \times D^{1.73} \times H^{0.51} \times T^{0.5} \times F_P \times c \times K_C$$

$$\text{โดยที่ } 2.26 \times 10^{-2} \text{ ทำให้เป็น Mg/turnover} \Rightarrow \left(\frac{2.26 \times 10^{-2}}{2205 \text{ lb/Mg}} \right) = 0.0000102$$

$$\text{Total loss} = \text{Working loss} + \text{Breathing loss}$$

Benzene

$$\begin{aligned} L_W &= 0.0000000109 \times 45.101 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (9.11989 \times 10^{-03} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ &\quad \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1 \\ &= 5.10375 \times 10^{-03} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_b &= [0.0000102 \times 45.101 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times \left(\frac{9.11989 \times 10^{-03} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 9.11989 \times 10^{-03} \text{ psia}} \right)^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \\ &\quad \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ o F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\ &= 3.79756 \times 10^{-04} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\text{Total loss} = 5.48350 \times 10^{-03} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

Ethylbenzene

$$\begin{aligned} L_W &= 0.0000000109 \times 4.034 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (5.99949 \times 10^{-04} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ &\quad \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1 \\ &= 3.00341 \times 10^{-05} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_b &= [0.0000102 \times 4.034 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times \left(\frac{5.99949 \times 10^{-04} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 5.99949 \times 10^{-04} \text{ psia}} \right)^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \\ &\quad \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ o F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\ &= 5.33652 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\text{Total loss} = 3.53706 \times 10^{-05} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

Styrene

$$\begin{aligned} L_W &= 0.0000000109 \times 8.777 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (1.33025 \times 10^{-03} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ &\quad \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1 \\ &= 1.44875 \times 10^{-04} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_b &= [0.0000102 \times 8.777 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (\frac{1.33025 \times 10^{-03} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 1.33025 \times 10^{-03} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \\ &\quad \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^\circ\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\ &= 1.99251 \times 10^{-05} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\text{Total loss} = 1.64827 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

Toluene

$$\begin{aligned} L_W &= 0.0000000109 \times 24.382 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (4.167229 \times 10^{-03} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ &\quad \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1 \\ &= 1.26074 \times 10^{-03} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_b &= [0.0000102 \times 24.382 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (\frac{4.167229 \times 10^{-03} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 4.167229 \times 10^{-03} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \\ &\quad \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^\circ\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\ &= 1.20500 \times 10^{-04} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \end{aligned}$$

$$\text{Total loss} = 1.38124 \times 10^{-03} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

o-Xylene

$$L_W = 0.0000000109 \times 1.998 \frac{\text{lb}}{\text{lb - mol}} \times (2.97089 \times 10^{-04} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1 \\ = 7.36477 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$L_b = [0.0000102 \times 1.988 \frac{\text{lb}}{\text{lb - mol}} \times (\frac{2.97089 \times 10^{-04} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 2.97089 \times 10^{-04} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \\ \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^\circ\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\ = 1.63859 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$\text{Total loss} = 9.00335 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

m&p-Xylene

$$L_W = 0.0000000109 \times 1.87 \frac{\text{lb}}{\text{lb - mol}} \times (2.78167 \times 10^{-04} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1 \\ = 6.45402 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$L_b = [0.0000102 \times 1.87 \frac{\text{lb}}{\text{lb - mol}} \times (\frac{2.78167 \times 10^{-04} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 2.78167 \times 10^{-04} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \\ \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^\circ\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\ = 1.46652 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$\text{Total loss} = 7.92054 \times 10^{-06} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

Phenol

$$L_W = 0.0000000109 \times (1.004 \times 10^{-04}) \frac{\text{lb}}{\text{lb - mol}} \times (1.68558 \times 10^{-08} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal} \\ \times 104.28571 \times 2.72603 \times 1$$

$$= 2.10062 \times 10^{-14} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$L_b = [0.0000102 \times (1.004 \times 10^{-04}) \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (\frac{1.68558 \times 10^{-08} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 1.68558 \times 10^{-08} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^\circ\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1$$

$$= 1.06762 \times 10^{-13} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$\text{Total loss} = 1.27768 \times 10^{-13} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

m&p-Cresol

$$L_W = 0.0000000109 \times (8.47 \times 10^{-06} \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}}) \times (1.23747 \times 10^{-09} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal}$$

$$\times 104.28571 \times 2.72603 \times 1$$

$$= 1.30062 \times 10^{-16} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$L_b = [0.0000102 \times (8.47 \times 10^{-06} \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}}) \times (\frac{1.23747 \times 10^{-09} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 1.23747 \times 10^{-09} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}] \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^\circ\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1$$

$$= 1.54265 \times 10^{-15} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$\text{Total loss} = 1.65471 \times 10^{-15} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

ดังนั้น Total loss รวม มีค่าเท่ากับ

$$L_W = 0.0000000109 \times 86.16 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}) \times 4010.10060 \text{ gal}$$

$$\times 104.28571 \times 2.72603 \times 1$$

$$= 1.68842 \times 10^{-02} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}$$

$$L_b = [0.0000102 \times 86.16 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mol}} \times (\frac{1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}}{14.7 \text{ psia} - 1.57926 \times 10^{-02} \text{ psia}})^{0.68} \times 6.06955^{1.73} \text{ ft}]$$

$$\begin{aligned}
 & \times 6.84522^{0.51} \text{ ft} \times 84.2^{0.5} \text{ }^{\circ}\text{F} \times 1 \times 0.316 \times 1 \\
 & = 1.05420 \times 10^{-03} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}} \\
 \text{Total loss} & = 1.79385 \times 10^{-02} \frac{\text{Mg}}{\text{yr}}
 \end{aligned}$$

คำนวณความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

$$\text{จากสมการ } \ln W_e = \ln(W_o \rho_L) - K \frac{\left[RT \ln \left(\frac{P_{Sn}}{P_{pn}} \right) \right]^2}{\beta^2}$$

โดยที่	W_e	หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ, กรัมของมลพิษ/กรัมของถ่านกัมมันต์
	W_o	หมายถึง เนื้อที่การดูดซับสูงสุดสำหรับการจับสารมลพิษ, ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม
	K	หมายถึง ค่าคงที่ของสารดูดซับ, (mole/cal) ²
	P_{Sn}	หมายถึง ความดันไออิ่มตัวของสารมลพิษที่อุณหภูมิแก๊ส T, K
	P_{pn}	หมายถึง ความดันไอที่จุดสมดุลของสารมลพิษที่ T, K
	ρ_L	หมายถึง ความหนาแน่นของสารมลพิษในสถานะของเหลว, กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร
	R	หมายถึง ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ, 1.987 cal/g.mole K
	β	หมายถึง ค่า affinity coefficient
	T	หมายถึง อุณหภูมิสมบูรณ์

ท1 Affinity coefficient

$$\text{จากสมการ } \beta = \frac{\left[\left(\frac{n_i^2 - 1}{n_r^2 - 1} \right) / \left(\frac{n_i^2 + 2}{n_r^2 + 2} \right) \right] M_i / \rho_{Li}}{\left[\left(\frac{n_i^2 - 1}{n_r^2 - 1} \right) / \left(\frac{n_i^2 + 2}{n_r^2 + 2} \right) \right] M_r / \rho_{Lr}}$$

- โดยที่ n_i หมายถึง ดัชนีการหักเหแสง ของแก๊สหรือไอที่เราต้องการหาค่า β วัดจาก ความยาวคลื่น sodium D
- n_r หมายถึง ดัชนีการหักเหแสงของแก๊สหรือไอที่เราทราบค่า K และ W_0 วัดจาก ความยาวคลื่น sodium D
- M_i หมายถึง น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สหรือไอที่เราต้องการหาค่า
- M_r หมายถึง น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สหรือไอที่เราทราบค่า K และ W_0
- ρ_{Li} หมายถึง ความหนาแน่นสถานะของเหลวของแก๊สหรือไอสารที่เราต้องการ หาค่า
- ρ_{Lr} หมายถึง ความหนาแน่นสถานะของเหลวของแก๊สหรือไอสารที่เราทราบค่า K และ W_0

ตารางผนวกที่ ก4 ค่า n_i ของสารต่างๆ

Compound	Refraction Index, n_i
Benzene	1.498
Ethylbenzene	1.496
Styrene	1.544
Toluene	1.494
o-Xylene	1.505
m&p-Xylene	1.495
Phenol	1.542
m&p-Cresol	1.539

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าที่ใช้ในการคำนวณ Affinity coefficient

	Benzene	Ethyl- benzene	Styrene	Toluene	o – Xylene	m&p – Xylene	Phenol	m&p – Cresol
n_i	1.498	1.496	1.544	1.494	1.505	1.495	1.542	1.539
n_r	1.383	1.383	1.383	1.383	1.383	1.383	1.383	1.383
M_i	78.1	92.4	78.1	92.4	106.2	106.16	106.2	106.16
M_r	100.21	100.21	100.21	100.21	100.21	100.21	100.21	100.21
ρ_{Li}	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86
ρ_{Lr}	0.6838	0.6838	0.6838	0.6838	0.6838	0.6838	0.6838	0.6838

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 \beta_{\text{Benzene}} &= \frac{[(1.498^2 - 1)/(1.498^2 + 2)] \times 78.1 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
 &= 0.770 \\
 \beta_{\text{Ethylbenzene}} &= \frac{[(1.496^2 - 1)/(1.496^2 + 2)] \times 106.2 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
 &= 1.043 \\
 \beta_{\text{Styrene}} &= \frac{[(1.544^2 - 1)/(1.544^2 + 2)] \times 104.2 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
 &= 1.069 \\
 \beta_{\text{Toluene}} &= \frac{[(1.494^2 - 1)/(1.494^2 + 2)] \times 92.4 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
 &= 0.904
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\beta_{\text{O-Xylene}} &= \frac{[(1.505^2 - 1)/(1.505^2 + 2)] \times 92.4 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
&= 1.047 \\
\beta_{\text{m \& pX-ylene}} &= \frac{[(1.495^2 - 1)/(1.495^2 + 2)] \times 106.16 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.86 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
&= 1.053 \\
\beta_{\text{Phenol}} &= \frac{[(1.542^2 - 1)/(1.542^2 + 2)] \times 94.1 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 1.07 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
&= 0.810 \\
\beta_{\text{m \& p-Cresol}} &= \frac{[(1.539^2 - 1)/(1.539^2 + 2)] \times 108.1 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 1.03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{[(1.383^2 - 1)/(1.383^2 + 2)] \times 100.21 \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}} / 0.6838 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \\
&= 0.962
\end{aligned}$$

หาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

$$\ln W_e = \ln(W_o \rho_L) - K \frac{\left[RT \ln \left(\frac{P_{Sn}}{P_{pn}} \right) \right]^2}{\beta^2}$$

ตารางผนวกที่ ก6 ค่าต่างๆ สำหรับคำนวณความสามารถในการดูดซับ

	Benzene	Ethylbenzene	Styrene	Toluene	หน่วย
W_o	0.404	0.404	0.404	0.404	cm^2/g
K	1.44E-08	1.44E-08	1.44E-08	1.44E-08	$(\text{mole}/\text{cal})^2$
P_{Sn}	95.2	10	7.3	30	mm HG
P_{pn}	747.8664947	0.018341095	0.432416384	11.67290697	mm HG
ρ_L	0.87	0.87	0.9	0.87	g/m^3
R	1.987	1.987	1.987	1.987	cal/g. mole
β	0.770	1.043	1.069	0.904	ไม่มีหน่วย
T	298.15	298.15	298.15	298.15	Kelvin
W_o	0.404	0.404	0.404	0.404	cm^2/g
K	1.44E-08	1.44E-08	1.44E-08	1.44E-08	$(\text{mole}/\text{cal})^2$
P_{Sn}	7	9.5	0.341	0.11	mm HG
P_{pn}	0.005801345	0.004038742	7.28371E-07	1.86041E-09	mm HG
ρ_L	0.88	0.86	1.07	1.03	g/m^3
R	1.987	1.987	1.987	1.987	cal/g. Mole
β	1.047	1.053	0.810	0.962	ไม่มีหน่วย
T	298.15	298.15	298.15	298.15	Kelvin

แทนค่า

Benzene

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 0.87 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) - 1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K} \right) \ln \left(\frac{95.2 \text{ mmHg}}{0.4715 \text{ mmHg}} \right) \right]^2}{(0.770)^2} \right]$$

$$W_e = 0.28 \frac{\text{kg. Benzene}}{\text{kg. ถ่านกัมมันต์}}$$

Ethylbenzene

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 0.87 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{10 \text{ mmHg}}{0.0310 \text{ mmHg}} \right) \right]^2}{(1.043)^2}$$

$$W_e = 0.30 \frac{\text{kg. Ethylbenzene}}{\text{kg. ถ่านกัมมันต์}}$$

Styrene

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 0.9 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{7.3 \text{ mmHg}}{0.06877 \text{ mmHg}} \right) \right]^2}{(1.069)^2}$$

$$W_e = 0.33 \frac{\text{kg. Styrene}}{\text{kg. ถ่านกัมมันต์}}$$

Toluene

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 0.87 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{30 \text{ mmHg}}{0.21545 \text{ mmHg}} \right) \right]^2}{(0.904)^2}$$

$$W_e = 0.30 \frac{\text{kg. Toluene}}{\text{kg. ถ่านกัมมันต์}}$$

o-Xylene

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 0.88 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{7 \text{mmHg}}{0.01536 \text{mmHg}} \right) \right]^2}{(1.03128)^2}$$

$$W_e = 0.30 \frac{\text{kg.o - Xylene}}{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}$$

m&p-Xylene

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 0.86 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{9.5 \text{mmHg}}{0.01438 \text{mmHg}} \right) \right]^2}{(1.05306)^2}$$

$$W_e = 0.29 \frac{\text{kg.m \& p - Xylene}}{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}$$

Phenol

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 1.07 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{0.341 \text{mmHg}}{8.7146 \times 10^{-07} \text{mmHg}} \right) \right]^2}{(0.75152)^2}$$

$$W_e = 0.12 \frac{\text{kg.Phenol}}{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}$$

m&p-Cresol

$$\ln W_e = \left[\ln \left(0.404 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times 1.03 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \right] -$$

$$1.44 \times 10^{-08} \left(\frac{\text{mole}}{\text{cal}} \right)^2 \times \frac{\left[(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{mole}} \times 298.15 \text{K}) \ln \left(\frac{0.11 \text{mmHg}}{6.3978 \times 10^{-08} \text{mmHg}} \right) \right]^2}{(0.89686)^2}$$

$$W_e = 0.13 \frac{\text{kg.m \& p - Cresol}}{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}$$

คำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์

$$\text{ปริมาณถ่านกัมมันต์} = \text{กิโลของสารนั้นๆ} \times \frac{100 \text{ กิโลถ่านกัมมันต์}}{\text{ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์}}$$

(12)

ตารางผนวกที่ ก7 ตารางค่าต่างๆ ที่ในการคำนวณปริมาณถ่านกัมมันต์

	Total loss (kg/min)	ความสามารถในการ ดูดซับต่อกิโล ถ่านกัมมันต์	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ ต้องใช้ต่อหน้าที่
Benzene	1.04E-05	0.28	3.77E-05
Ethylbenzene	6.73E-08	0.30	2.24E-07
Styrene	3.14E-07	0.33	9.50E-07
Toluene	2.63E-06	0.30	8.69E-06
o-Xylene	1.71E-08	0.30	5.73E-08
M&p-Xylene	1.51E-08	0.29	5.26E-08
Phenol	2.43E-16	0.12	2.02E-15
M&p-Cresol	3.15E-18	0.13	2.33E-17
Total	3.41E-05	0.26	4.77E-05

Benzene

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{1.04 \times 10^{-05} \text{ kg.Benzene}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{28 \text{ kg.Benzene}} \\ &= 3.77 \times 10^{-05} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

Ethylbenzene

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{6.73 \times 10^{-08} \text{ kg.Ethylbenzene}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{30 \text{ kg.Ethylbenzene}} \\ &= 2.24 \times 10^{-07} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

Styrene

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{3.14 \times 10^{-07} \text{ kg.Styrene}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{33 \text{ kg.Styrene}} \\ &= 9.50 \times 10^{-07} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

Toluene

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{2.63 \times 10^{-06} \text{ kg.Toluene}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{30 \text{ kg.Toluene}} \\ &= 8.69 \times 10^{-06} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

o-Xylene

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{1.71 \times 10^{-08} \text{ kg.o - Xylene}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{30 \text{ kg.o - Xylene}} \\ &= 5.73 \times 10^{-08} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

m&p-Xylene

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{1.51 \times 10^{-08} \text{ kg.m \& p - Xylene}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{29 \text{ kg.m \& p - Xylene}} \\ &= 5.26 \times 10^{-08} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

Phenol

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{2.43 \times 10^{-16} \text{ kg.Phenol}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{12 \text{ kg.phenol}} \\ &= 2.02 \times 10^{-15} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

m&p-Cresol

$$\begin{aligned}\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้} &= \frac{3.15 \times 10^{-18} \text{ kg.m \& p - Cresol}}{\text{min}} \times \frac{100 \text{ kg.ถ่านกัมมันต์}}{13 \text{ kg.m \& p - Cresol}} \\ &= 2.33 \times 10^{-17} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

Total

มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ทั้งหมด

$$\begin{aligned}&= 3.77 \times 10^{-05} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} + 2.24 \times 10^{-07} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} \\ &\quad + 9.50 \times 10^{-07} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} + 8.69 \times 10^{-06} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} \\ &\quad + 5.73 \times 10^{-08} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} + 5.26 \times 10^{-08} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} \\ &\quad + 2.02 \times 10^{-15} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} + 2.33 \times 10^{-17} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} \\ &= 4.77 \times 10^{-05} \frac{\text{kg.ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}}\end{aligned}$$

ต้องการออกแบบระบบโดยเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ ใหม่ทุกๆ 2 เดือน

$$\begin{aligned} \text{จะได้} &= \frac{4.77 \times 10^{-05} \text{ kg. ถ่านกัมมันต์}}{\text{min}} \times \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ day}} \times 60 \text{ day} \\ &= 4.12 \text{ kg. ถ่านกัมมันต์ ต่อ 2 เดือน} \end{aligned}$$

ที่ Safety factor 100 %

$$\begin{aligned} \text{จะได้} &= 4.12 \text{ kg. ถ่านกัมมันต์ ต่อ 2 เดือน} \times 2 \\ &= 8.25 \text{ kg. ถ่านกัมมันต์ ต่อ 2 เดือน} \\ &\sim 10 \text{ kg. ถ่านกัมมันต์ ต่อ 2 เดือน} \end{aligned}$$

คำนวณปริมาตรของ ถ่านกัมมันต์ 10 kg.

$$\begin{aligned} \text{หาปริมาตรของ Carbon} &= \frac{\text{มวลของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้}}{\text{Bulk - Density}} & (13) \\ &= 10 \text{ kg. ถ่านกัมมันต์} \times \frac{1 \text{ m}^3}{480 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \\ &= 0.02 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ถังบรรจุมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.48 ม. ความสูงเท่ากับ 0.85 ม.

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ถังมีปริมาตร} &= \pi \times r^2 \times h \\ &= \pi \times 0.24^2 \text{ m} \times 0.85 \text{ m} \\ &= 0.02 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หาความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์} &= \frac{0.02 \text{ m}^3}{\pi \times 0.24^2 \text{ m}} \\ &= 0.12 \text{ m} \end{aligned}$$

การออกแบบ เช่นนี้ เป็นการออกแบบโดยการระเหยตามธรรมชาติ ซึ่งไม่มีความเร็ว
จึงอาจทำให้เกิดปัญหาการไหลที่มีกระจายเข้าสู่ชั้นของสารดูดซับอย่างไม่ทั่วถึง

การออกแบบโดยการกำหนดความเร็วของอากาศเสีย

ตารางภาคผนวกที่ ก8 ค่าต่างๆ ที่ใช้คำนวณ Mole fraction

	Total loss (g/min)	M _v (kg/kmol)
Benzene	1.04E-02	78.1
Ethylbenzene	6.73E-05	106.2
Styrene	3.14E-04	104.2
Toluene	2.63E-03	92.4
o -Xylene	1.71E-05	106.2
m&p - Xylene	1.51E-05	106.16
Phenol	2.43E-13	94.1
m&p - Cresol	3.15E-15	108.1

ห1 Mole fraction

$$\frac{\text{kmol}}{\text{min}} = \frac{\text{Total loss}}{M_V}$$

Benzene

$$\frac{1.04 \text{E} - 02 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{78.1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 1.34 \text{E} - 07 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

Ethylbenzene

$$\frac{6.73\text{E} - 05 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{106.2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 6.34\text{E} - 10 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

Styrene

$$\frac{3.14\text{E} - 04 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{104.2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 3.01\text{E} - 09 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

Toluene

$$\frac{2.63\text{E} - 03 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{92.4 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 2.84\text{E} - 08 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

o-Xylene

$$\frac{1.71\text{E} - 05 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{106.2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 1.61\text{E} - 10 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

m&p-Xylene

$$\frac{1.51\text{E} - 05 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{106.16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 1.42\text{E} - 10 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

Phenol

$$\frac{2.43\text{E} - 13 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{94.1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 2.58\text{E} - 18 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

m&p-Cresol

$$\frac{3.15\text{E} - 15 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{108.1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 2.91\text{E} - 20 \frac{\text{kmol}}{\text{min}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{รวม} &= 1.34\text{E} - 07 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} + 6.34\text{E} - 10 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} + 3.01\text{E} - 09 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} + 2.84\text{E} - 08 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} \\ &\quad + 1.61\text{E} - 10 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} + 1.42\text{E} - 10 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} + 2.58\text{E} - 18 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} + 2.91\text{E} - 20 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} \\ &= 1.66\text{E} - 07 \frac{\text{kmole}}{\text{mole}} \end{aligned}$$

คำนวณหา kmol ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$\text{จาก } \text{kmol} = \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times \text{ระยะเวลาที่ของเสียมีปริมาณครึ่งหนึ่งของถังเก็บ}$$

ระยะเวลาที่ของเสียอันตรายมีปริมาณครึ่งหนึ่งของถังเก็บสามารถหาได้จากถังเก็บของเสียอันตรายมีระยะเวลาส่งถ่ายไปกำจัด 2 ครั้งต่อสัปดาห์ เท่ากับ 3.5 วัน จะมีการจัดส่งไปกำจัด 1 ครั้ง และระยะเวลาประมาณการที่ของเสียจะมีปริมาณครึ่งหนึ่งของถังเก็บ เท่ากับ 1.75 วัน ดังนั้นจะเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาที่ของเสียจะมีปริมาณ 50% ของถังเก็บ} &= \frac{3.5 \text{ วัน}}{2} \times 24 \text{ ชม.} \times 60 \text{ นาที} \\ &= 2520 \text{ นาที} \end{aligned}$$

แทนค่า

Benzene

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 1.34\text{E} - 07 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 3.37\text{E} - 04 \text{ kmol}\end{aligned}$$

Ethylbenzene

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 6.34\text{E} - 10 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 1.60\text{E} - 06 \text{ kmol}\end{aligned}$$

Styrene

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 3.01\text{E} - 09 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 7.58\text{E} - 06 \text{ kmol}\end{aligned}$$

Toluene

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 2.84\text{E} - 08 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 7.17\text{E} - 05 \text{ kmol}\end{aligned}$$

o-Xylene

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 1.61\text{E} - 10 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 4.06\text{E} - 07 \text{ kmol}\end{aligned}$$

m&p-Xylene

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 1.42\text{E} - 10 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 3.58\text{E} - 07 \text{ kmol}\end{aligned}$$

Phenol

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 2.58\text{E} - 18 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 6.51\text{E} - 15 \text{ kmol}\end{aligned}$$

m&p-Cresol

$$\begin{aligned}\text{kmol} &= 2.91\text{E} - 20 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \times 2520 \text{ min} \\ &= 7.34\text{E} - 17 \text{ kmol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Total VOCs} &= 1.34\text{E} - 07 \text{ kmol} + 6.34\text{E} - 10 \text{ kmol} + 3.01\text{E} - 09 \text{ kmol} + 2.84\text{E} - 08 \text{ kmol} \\ &\quad + 1.61\text{E} - 10 \text{ kmol} + 1.42\text{E} - 10 \text{ kmol} + 2.58\text{E} - 18 \text{ kmol} + 2.91\text{E} - 20 \text{ kmol} \\ &= 1.66\text{E} - 07 \text{ kmol}\end{aligned}$$

คำนวณหา kmol ของอากาศ ตาม Ideal gas law จาก

$$n = \frac{P_{\text{air}}}{R_{\text{air}} T_{\text{air}}}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}n &= \frac{(1.013 \times 10^3 \text{ Pa}) \times 7.58^3}{8.314 \frac{\text{L} \cdot \text{kPa}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 298 \text{ K}} \times 10^6 \\ &= 0.3099 \text{ kmol}\end{aligned}$$

คำนวณหาความเข้มข้น ppmV

$$\text{ppmV} = \frac{\text{kmole}_{\text{VOC}}}{\text{kmole}_{\text{air}} + \text{kmole}_{\text{TotalVOCs}}} \times 10^6$$

แทนค่า

Benzene

$$\text{ppmV} = \frac{1.34 \text{E} - 07 \text{kmole Benzene}}{0.3099 \text{kmole air} + 1.66 \text{E} - 07 \text{kmole TotalVOCs}} \times 10^6$$

$$= 43.1$$

Ethylbenzene

$$\text{ppmV} = \frac{6.34 \text{E} - 10 \text{kmole Ethylbenzene}}{0.3099 \text{kmole air} + 1.66 \text{E} - 07 \text{kmole TotalVOCs}} \times 10^6$$

$$= 2.04 \text{E} - 03$$

Styrene

$$\text{ppmV} = \frac{3.01 \text{E} - 09 \text{kmole Styrene}}{0.3099 \text{kmole air} + 1.66 \text{E} - 07 \text{kmole TotalVOCs}} \times 10^6$$

$$= 9.71 \text{E} - 03$$

Toluene

$$\text{ppmV} = \frac{2.84 \text{E} - 08 \text{kmole Toluene}}{0.3099 \text{kmole air} + 1.66 \text{E} - 07 \text{kmole TotalVOCs}} \times 10^6$$

$$= 9.18 \text{E} - 02$$

o-Xylene

$$\text{ppmV} = \frac{1.61 \text{E} - 10 \text{kmole o - Xylene}}{0.3099 \text{kmole air} + 1.66 \text{E} - 07 \text{kmole TotalVOCs}} \times 10^6$$

$$= 5.20 \text{E} - 02$$

m&p-Xylene

$$\text{ppmV} = \frac{1.42\text{E} - 10 \text{ kmole m \& p - Xylene}}{0.3099 \text{ kmole air} + 1.66\text{E} - 07 \text{ kmole Total VOCs}} \times 10^6$$

$$= 4.58\text{E} - 04$$

Phenol

$$\text{ppmV} = \frac{2.58\text{E} - 10 \text{ kmole Phenol}}{0.3099 \text{ kmole air} + 1.66\text{E} - 07 \text{ kmole Total VOCs}} \times 10^6$$

$$= 8.34\text{E} - 12$$

m&p-Cresol

$$\text{ppmV} = \frac{2.91\text{E} - 20 \text{ kmole m \& p - Cresol}}{0.3099 \text{ kmole air} + 1.66\text{E} - 07 \text{ kmole Total VOCs}} \times 10^6$$

$$= 9.40\text{E} - 14$$

$$\text{ดังนั้น ppmV} = 4.31\text{E} - 01 + 2.04\text{E} - 03 + 9.71\text{E} - 03 + 9.18\text{E} - 02 + 5.20\text{E} - 04$$

$$+ 4.58\text{E} - 04 + 8.34\text{E} - 12 + 9.40\text{E} - 14$$

$$= 5.36\text{E} - 01$$

กำหนดให้

อัตราการไหลของอากาศเสีย เท่ากับ 221.89 ft³/min (6 m³/min)

ความดัน 1 บรรยากาศ

อุณหภูมิ 25 °C

1 kg. mole ของ Ideal gas มีปริมาตร 22.4 m³ ที่ 0 °C และ 1 atm ที่ 25 °C จึงมีปริมาตร 24.45 m³

ระยะเวลาในการออกแบบระบบดูดซับ 2 เดือน

หาปริมาณและมวลของสารต่างๆ

$$\text{อัตราการไหลของอากาศเสีย} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \text{ความเข้มข้นของไอสารพิษ} \times \text{เวลา} = \text{ปริมาณ}(\text{m}^3)$$

Benzene

ปริมาณของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{4.31\text{E} - 01(\text{Benzene})}{10^6} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 13.4 \text{m}^3$$

มวลของสาร

$$13.4 \text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{m}^3} \times \frac{78.1 \text{kg}}{\text{kg.mole}} = 42.8 \text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$42.8 \text{kg} \times \frac{100 \text{kg.carbon}}{28 \text{kg.Benzene}} = 155 \text{kg}_\text{carbon}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$155 \text{kg}_\text{carbon} \times 1.2 \times \frac{1 \text{m}^3}{480 \text{kg}} = 3.87\text{E} - 01 \text{m}^3 \text{ต่อถัง}$$

Ethylbenzene

ปริมาณของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{2.04\text{E} - 03(\text{Ethylbenzene})}{10^6 (\text{air})} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 6.36\text{E} - 02 \text{m}^3$$

มวลของสาร

$$6.36 \text{E} - 02 \text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{m}^3} \times \frac{106.2 \text{kg}}{\text{kg.mole}} = 0.276 \text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$0.276 \text{kg} \times \frac{100 \text{kg.carbon}}{30 \text{kg.Ethylbenzene}} = 0.918 \text{kg_carbon}$$

ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเผื่อเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$0.918 \text{kg_carbon} \times 1.2 \times \frac{1 \text{m}^3}{480 \text{kg}} = 2.29 \text{E} - 03 \text{m}^3 \text{ ต่อถัง}$$

Styrene

ปริมาตรของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{9.71 \text{E} - 03 (\text{Styrene})}{10^6 (\text{air})} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 0.302 \text{m}^3$$

มวลของสาร

$$0.302 \text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{m}^3} \times \frac{104.2 \text{kg}}{\text{kg.mole}} = 1.29 \text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$1.29 \text{kg} \times \frac{100 \text{kg.carbon}}{33 \text{kg.Styrene}} = 3.9 \text{kg_carbon}$$

ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$3.90 \text{ kg_carbon} \times 1.2 \times \frac{1 \text{ m}^3}{480 \text{ kg}} = 9.75 \text{ E} - 03 \text{ m}^3 \text{ ต่อถัง}$$

Toluene

ปริมาตรของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{9.18 \text{ E} - 02 (\text{Toluene})}{10^6 (\text{air})} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 2.58 \text{ m}^3$$

มวลของสาร

$$2.58 \text{ m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{ m}^3} \times \frac{92.4 \text{ kg}}{\text{kg.mole}} = 10.8 \text{ kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$10.8 \text{ kg} \times \frac{100 \text{ kg.carbon}}{30 \text{ kg.Toluene}} = 35.7 \text{ kg_carbon}$$

ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$35.7 \text{ kg_carbon} \times 1.2 \times \frac{1 \text{ m}^3}{480 \text{ kg}} = 8.92 \text{ E} - 02 \text{ m}^3 \text{ ต่อถัง}$$

o-Xylene

ปริมาตรของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{5.20\text{E} - 04(\text{o} - \text{Xylene})}{10^6 (\text{air})} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 1.62\text{E} - 02 \text{m}^3$$

มวลของสาร

$$1.62\text{E} - 02 \text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{m}^3} \times \frac{106.2 \text{kg}}{\text{kg.mole}} = 7.03\text{E} - 02 \text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$7.03\text{E} - 02 \text{kg} \times \frac{100 \text{kg.carbon}}{30 \text{kg.o} - \text{Xylene}} = 0.235 \text{kg}_\text{carbon}$$

ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$0.235 \text{kg}_\text{carbon} \times 1.2 \times \frac{1 \text{m}^3}{480 \text{kg}} = 5.88\text{E} - 04 \text{m}^3 \text{ต่อถัง}$$

m&p-Xylene

ปริมาตรของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{4.58\text{E} - 04(\text{m} \& \text{p} - \text{Xylene})}{10^6 (\text{air})} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 1.42\text{E} - 02 \text{m}^3$$

มวลของสาร

$$1.42 \text{E} - 02 \text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{m}^3} \times \frac{106.16 \text{kg}}{\text{kg.mole}} = 6.19 \text{E} - 02 \text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$6.19 \text{E} - 02 \text{kg} \times \frac{100 \text{kg.carbon}}{29 \text{kg.m \& p - Xylene}} = 0.216 \text{kg_carbon}$$

ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$0.216 \text{kg_carbon} \times 1.2 \times \frac{1 \text{m}^3}{480 \text{kg}} = 5.39 \text{E} - 04 \text{m}^3 \text{ต่อถัง}$$

Phenol

ปริมาตรของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{8.34 \text{E} - 12 (\text{Phenol})}{10^6 (\text{air})} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times 60 \text{ day} = 2.59 \text{E} - 10 \text{m}^3$$

มวลของสาร

$$2.59 \text{E} - 10 \text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45 \text{m}^3} \times \frac{94.1 \text{kg}}{\text{kg.mole}} = 9.98 \text{E} - 10 \text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$9.98 \text{E} - 10 \text{kg} \times \frac{100 \text{kg.carbon}}{12 \text{kg.Phenol}} = 8.29 \text{E} - 09 \text{kg_carbon}$$

ปริมาตรของคาร์บอนที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$8.29\text{E} - 09\text{kg_carbon} \times 1.2 \times \frac{1\text{m}^3}{480\text{kg}} = 2.07\text{E} - 11\text{m}^3 \text{ ต่อถัง}$$

m&p-Cresol

ปริมาตรของสาร

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{9.40\text{E} - 14(\text{m \& p - Cresol})}{10^6(\text{air})} \times \frac{60\text{ min}}{1\text{ hr}} \times \frac{24\text{ hr}}{\text{day}} \times 60\text{ day} = 2.92\text{E} - 12\text{m}^3$$

มวลของสาร

$$2.92\text{E} - 12\text{m}^3 \times \frac{\text{kg.mole}}{24.45\text{m}^3} \times \frac{108.1\text{kg}}{\text{kg.mole}} = 1.29\text{E} - 11\text{kg}$$

ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้

$$1.29\text{E} - 11\text{kg} \times \frac{100\text{kg.carbon}}{13\text{kg.m \& p - Cresol}} = 9.58\text{E} - 11\text{kg_carbon}$$

ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้โดยออกแบบเพื่อความปลอดภัย 1.2

$$9.58\text{E} - 11\text{kg_carbon} \times 1.2 \times \frac{1\text{m}^3}{480\text{kg}} = 2.39\text{E} - 13\text{m}^3 \text{ ต่อถัง}$$

ดังนั้น ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ทั้งหมด = 1.55E + 02kg. + 9.18E - 01kg. + 3.90E + 00kg.

+ 3.57E + 01kg. + 2.35E - 01kg. + 2.16E - 01kg.

+ 8.29E - 09kg. + 9.58kg.

= 195.9kg.

ปริมาตรถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ต่อถังโดยคิดเพื่อค่าความปลอดภัย 1.2

$$\begin{aligned}
 &= 3.87\text{E} - 01\text{m}^3 + 2.29\text{E} - 03\text{m}^3 + 9.75\text{E} - 03\text{m}^3 \\
 &\quad + 8.92\text{E} - 02\text{m}^3 + 5.88\text{E} - 04\text{m}^3 + 5.39\text{E} - 04\text{m}^3 \\
 &\quad + 2.07\text{E} - 11\text{m}^3 + 2.39\text{E} - 13\text{m}^3 \\
 &= 0.49\text{m}^3
 \end{aligned}$$

ออกแบบใหม่

โดยที่หมายเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 หมายถึง ค่าในสมการ (แนวดิ่ง) ในตารางภาคผนวกที่ ก9

- 1 เป็นความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านถังดูดซับ (ft/min)
- 2 เป็นความดันตกคร่อมชั้นถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐาน (inc.H₂O/ft)
- 3 เป็นความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ (ft) หาได้จาก ความดันตกคร่อมชั้นถ่านกัมมันต์จริง/2
- 4 เป็นพื้นที่หน้าตัดของชั้นถ่านกัมมันต์ (ft²) หาได้จากอัตราการไหลของอากาศเสีย/1
- 5 เป็นพื้นที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ (ft) หาได้จากปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้/4

กำหนดให้

1. อัตราการไหลของอากาศเสีย เท่ากับ 211.89 ft³/min
2. มวลถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ เท่ากับ 17.30 ft³ (จากการคำนวณด้านบน 0.49 m³)
3. ค่าความดันตกคร่อมชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 18 inc.H₂O/ft

แทนค่า ที่ความเร็ว 20 – 100 ฟุตต่อนาที ตามลำดับ

Allowable bed depth หาได้จาก ความดันตกคร่อมชั้นถ่านกัมมันต์จริง / 2

$$\frac{18\text{Inc.WG}}{0.50\frac{\text{Inc.WG}}{\text{ft}}} = 35.93\text{ ft}$$

$$\frac{18\text{Inc.WG}}{0.91\frac{\text{Inc.WG}}{\text{ft}}} = 19.82\text{ ft}$$

$$\frac{18\text{Inc.WG}}{1.33\frac{\text{Inc.WG}}{\text{ft}}} = 13.49\text{ ft}$$

$$\frac{18 \text{ Inc. WG}}{1.78 \frac{\text{Inc. WG}}{\text{ft}}} = 10.12 \text{ ft}$$

$$\frac{18 \text{ Inc. WG}}{2.26 \frac{\text{Inc. WG}}{\text{ft}}} = 7.96 \text{ ft}$$

$$\frac{18 \text{ Inc. WG}}{2.74 \frac{\text{Inc. WG}}{\text{ft}}} = 6.57 \text{ ft}$$

$$\frac{18 \text{ Inc. WG}}{3.45 \frac{\text{Inc. WG}}{\text{ft}}} = 5.22 \text{ ft}$$

$$\frac{18 \text{ Inc. WG}}{4.06 \frac{\text{Inc. WG}}{\text{ft}}} = 4.44 \text{ ft}$$

$$\frac{18 \text{ Inc. WG}}{4.55 \frac{\text{Inc. WG}}{\text{ft}}} = 3.95 \text{ ft}$$

Required cross section area of bed หาได้จากอัตราการใช้ของอากาศเสีย / 1

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{20 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 11.09 \text{ ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{30 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 7.40 \text{ ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{40 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 5.55 \text{ ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{50 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 4.44 \text{ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{60 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 3.70 \text{ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{70 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 3.17 \text{ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{80 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 2.77 \text{ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{90 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 2.47 \text{ft}^2$$

$$\frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{100 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 2.22 \text{ft}^2$$

Required bed depth หาได้จากปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ / 4

$$\frac{17.30 \text{ft}^3}{11.09 \text{ft}^2} = 1.56 \text{ft}$$

$$\frac{17.30 \text{ft}^3}{7.40 \text{ft}^2} = 2.34 \text{ft}$$

$$\frac{17.30 \text{ft}^3}{5.55 \text{ft}^2} = 3.12 \text{ft}$$

$$\frac{17.30 \text{ft}^3}{4.44 \text{ft}^2} = 3.90 \text{ft}$$

$$\frac{17.30\text{ft}^3}{3.70\text{ft}^2} = 4.68\text{ft}$$

$$\frac{17.30\text{ft}^3}{3.17\text{ft}^2} = 5.46\text{ft}$$

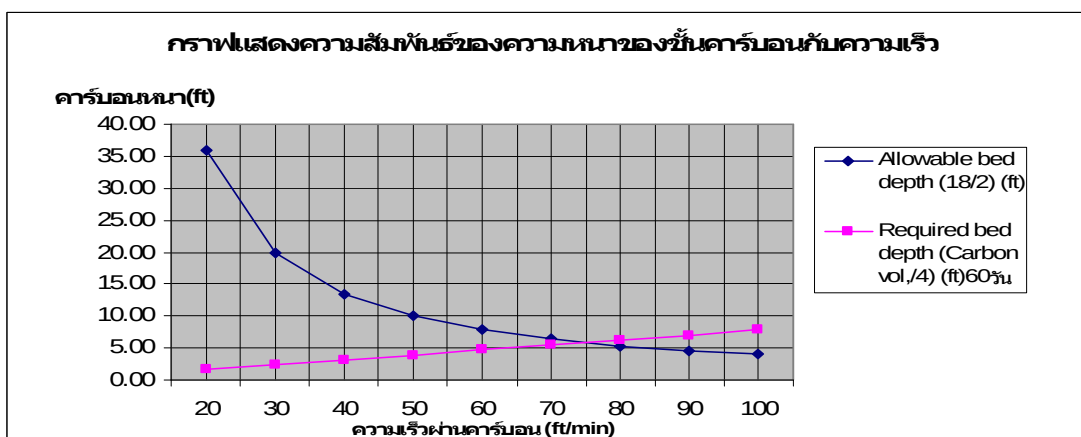
$$\frac{17.30\text{ft}^3}{2.77\text{ft}^2} = 6.24\text{ft}$$

$$\frac{17.30\text{ft}^3}{2.47\text{ft}^2} = 7.02\text{ft}$$

$$\frac{17.30\text{ft}^3}{2.22\text{ft}^2} = 7.79\text{ft}$$

ตารางผนวกที่ 9 ตารางออกแบบระบบดูดซับโดยกำหนดเปลี่ยนสารดูดซับ 60 วัน

1	2	3	4	5
ความเร็วของ อากาศที่ไหลผ่าน ถ่านกัมมันต์ (ฟุต/ นาที่)	ความดันตกคร่อม (นิ้วน้ำ/ฟุต)	Allowable bed depth (18/2) (ฟุต)	Required cross section area of bed (Q/1) (ตาราง ฟุต)	Required bed depth (ปริมาตร ถ่านกัมมันต์/4) (ฟุต)
20	0.50	35.93	11.09	1.56
30	0.91	19.82	7.40	2.34
40	1.33	13.49	5.55	3.12
50	1.78	10.12	4.44	3.90
60	2.26	7.96	3.70	4.68
70	2.74	6.57	3.17	5.46
80	3.45	5.22	2.77	6.24
90	4.06	4.44	2.47	7.02
100	4.55	3.95	2.22	7.79



ภาพผนวกที่ ก1 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็ว
ระยะเวลาในการดูดซับ 60 วัน

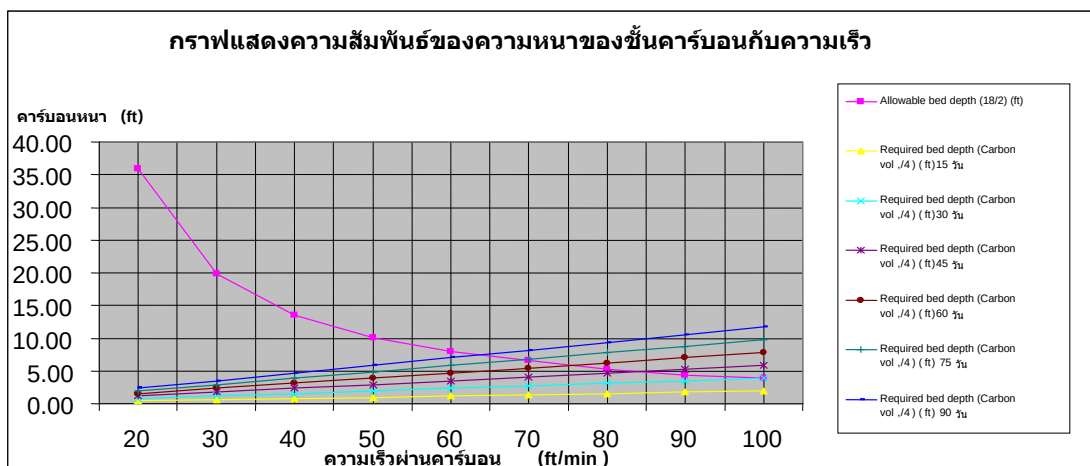
จากกราฟ ได้ความลึก 6.5 ฟุต (1.98 เมตร) และความเร็ว 75 ฟุตต่อนาที (0.38 เมตรต่อวินาที)

$$\text{พื้นที่หน้าตัด เท่ากับ } \frac{221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{75 \frac{\text{ft}}{\text{min}}} = 2.83 \text{ ft}^2 \text{ (0.26 ตารางเมตร)}$$

จากการคำนวณข้างต้น เมื่อนำมาคำนวณปริมาตรถ่านกัมมันต์ที่ต้องการในการดูดซับระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเพื่อความปลอดภัย 20 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังตารางด้านล่าง

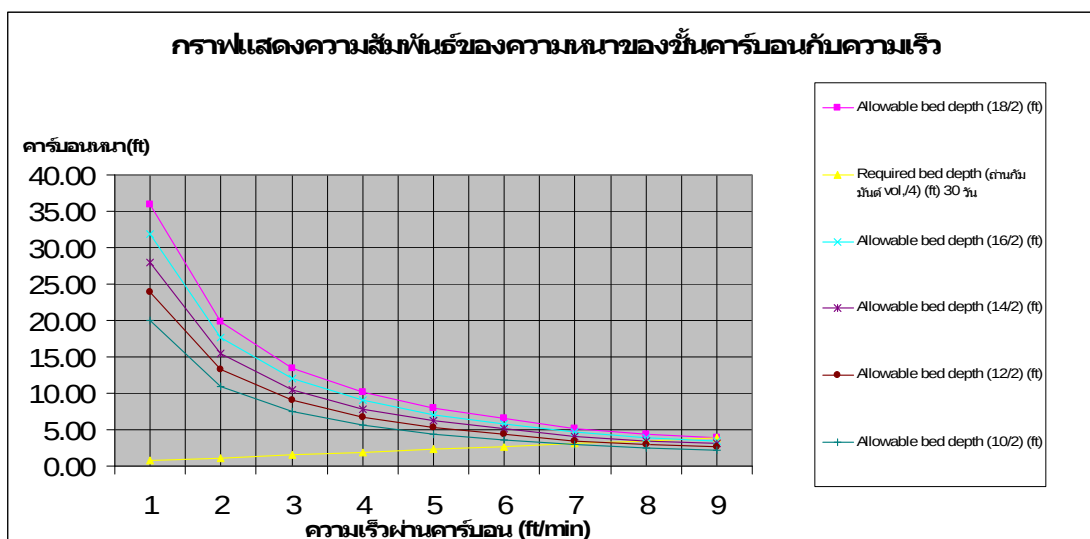
ตารางผนวกที่ ก10 ปริมาตรถ่านกัมมันต์ที่ใช้ตามระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

	ระยะเวลาของการดูดซับ					
	15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน	90 วัน
ปริมาตรถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ (ลูกบาศก์ฟุต)	4.324	8.648	12.971	17.295	21.619	25.943



ภาพผนวกที่ ก2 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสารดูดซับกับความเร็วที่ระยะเวลาในการดูดซับต่างๆ

จากภาพภาคผนวกที่ ก4 จะเห็นว่าที่ระยะเวลา 45 วัน เป็นจุดตัดที่ต่ำที่สุดดังนั้นจึงทดลองนำค่าปริมาตรของการดูดซับ 45 วัน มาสร้างกราฟที่ความอัตราการไหลของอากาศเสียที่ 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 ลูกบาศก์ฟุตต่ออนาที ได้ดังภาพด้านล่าง



ภาพผนวกที่ ก3 แสดงความลึกของชั้นสารดูดซับกับความเร็วของอากาศเสียที่ไหลผ่านที่ระยะเวลาในการดูด 30 วัน และความดันตกคร่อมสารดูดซับต่างๆ

จากกราฟพบว่าที่ระยะเวลาการดูดซับ 45 วัน ที่อัตราการไหลของอากาศเสียต่างๆ นั้น มีจุดตัดที่แตกต่างกัน ที่อัตราการไหลของอากาศเสียต่ำๆ จะได้ความลึกของชั้นสารดูดซับมากกว่าที่อัตราการไหลของอากาศเสียสูงๆ

จากภาพผนวกที่ ก3 และ ก4 หากต้องการออกแบบระบบให้มีชั้นความลึกของสารดูดซับน้อยกว่า 3 ฟุต จะต้องปรับระยะเวลาในการดูดซับให้น้อยลงและออกแบบระบบดูดซับให้ความดันตกคร่อมชั้นสารดูดซับน้อยกว่า 18 นิ้วน้ำ เท่านั้นก็จะได้ความลึกตามที่ต้องการ

ออกแบบระบบดูดซับ

ตั้งสมมุติฐาน

1. ในการคำนวณกำหนดให้คุณสมบัติของไอระเหยที่ออกมานั้นมีคุณสมบัติเหมือนกับอากาศ ที่ 25 °C
2. จำนวน Loss ของถังดูดซับเฉพาะส่วนที่ตกคร่อม Carbon ส่วนถัง Adsorber และ Vessel ไม่คิด เนื่องจากมี Loss น้อยมาก
3. จำนวนความเร็วอัตราการไหลผ่านชั้นคาร์บอนที่ 75 ft/min (0.38 m/s)
4. ใช้ท่อเหล็กคาร์บอนขนาด 4 นิ้ว
5. ความดันในถัง (P_1) เท่ากับ 101.3 kPa
6. ความดันที่ปลายทางออกของ Blower (P_2) เท่ากับ 110 kPa

จาก

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_P - h_{loss}$$

กำหนดให้ $V = 70 \text{ ft/min}$ (35.56 cm/s)

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

$$D = 0.1023 \text{ m (ท่อขนาด 4 นิ้ว)}$$

$$Q = 360 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$A = 0.0082 \text{ m}^2$$

ตารางผนวกที่ ก11 ค่า K ที่ใช้ในการคำนวณความสูญเสียรอง

	จำนวน	K	Loss (m)
Elbow 4", 90°	6	0.3	5.166
Gate valve 4"	1	0.15	0.430
ปากทางเข้าท่อ	2	0.78	4.477
ปากทางออกท่อ	1	1	2.870
รวม			12.943

ตารางผนวกที่ ก12 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C

	อากาศที่ 25 °C	หน่วย
ความหนาแน่น	1.184	kg/m ³
ความหนืดพลวัต	0.0000185	N-S/m ²

หา Velocity ในท่อ

$$\text{จาก } Q = VA \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 \text{แทนค่า } V &= \frac{Q}{A} \\
 V &= \frac{360 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{\frac{\pi}{4} (0.1023^2) \text{m}} \\
 &= 27,009.52 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\
 &= 7.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

หา Total head loss, $h_{\text{loss,t}}$

$$h_{\text{loss,t}} = h_{\text{loss,f}} + h_{\text{loss,m}} + h_{\text{loss,carbon}}$$

หา $h_{\text{loss,m}}$

$$\text{จาก } h_{\text{loss,m}} = K \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

โดยที่ $h_{\text{loss,m}}$ หมายถึง head สูญเสีย รวบรวม

h_{m1} หมายถึง head สูญเสีย รวบรวมจากข้อต่อ 90 องศา จำนวน 6 ตัว

h_{m2} หมายถึง head สูญเสีย รวบรวมจากเกจวาล์ว จำนวน 1 ตัว

h_{m3} หมายถึง head สูญเสีย รวบรวมจากปากทางเข้าท่อ จำนวน 2 ตัว

h_{m4} หมายถึง head สูญเสีย รวบรวมจากปากทางออกท่อ จำนวน 1 ตัว

$$\begin{aligned} h_{\text{m1}} &= 0.3 \times \frac{(7.5)^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \times 6 \text{ joint} \\ &= 5.17 \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{m2}} &= 0.15 \times \frac{(7.5)^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \times 1 \text{ joint} \\ &= 0.43 \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{m3}} &= 0.78 \times \frac{(7.5)^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \times 2 \text{ joint} \\ &= 0.48 \text{m} \end{aligned}$$

$$h_{m4} = 1 \times \frac{(7.5)^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9.807 \frac{m}{s^2}} \times 1 \text{ joint}$$

$$= 2.87m$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } h_{\text{loss},m} &= h_{m1} + h_{m2} + h_{m3} + h_{m4} \\ &= 5.17m + 0.430m + 4.477m + 2.870m \\ &= 12.94m \end{aligned}$$

หา $h_{\text{loss},f}$

$$\text{จาก } h_{\text{loss},f} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

หา Re

$$\text{จาก } Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Re &= \frac{(1.184 \frac{kg}{m^3}) \times (11.192 \frac{m}{s}) \times (0.1023 m)}{1.85 \times 10^{-05} \frac{N \cdot s}{m^2}} \\ &= 49,121.31 \end{aligned}$$

เนื่องจากค่า Re มากกว่า 4,000 จึงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
จากตารางความขรุขระสัมมูลของท่อเหล็กเหนียวเท่ากับ 0.046 mm

หาความขรุขระสัมพัทธ์

$$\text{จาก ความขรุขระสัมพัทธ์} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ความขรุขระสัมพัทธ์} &= \frac{0.046\text{mm}}{102.3\text{mm}} \\ &= 0.0004496 \end{aligned}$$

จากแผนภูมิได้ จะได้ $f = 0.038$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } h_{\text{loss},f} &= 0.038 \times \frac{8\text{m}}{0.1023\text{m}} \times \frac{7.5^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \\ &= 1.137\text{m} \end{aligned}$$

ออกแบบโดยกำหนดให้ Pressure drop ที่ชั้น Carbon เท่ากับ 18 นิ้วน้ำ

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ความดันตกคร่อม} &= 18\text{incs.H}_2\text{O} \times 0.2490819 \\ &= 4.48\text{kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และจาก } h &= \frac{p}{\rho g} \\ &= 0.386\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } h_{\text{loss}} &= 12.943\text{m} + 1.137\text{m} + 0.386\text{m} = 28.802\text{ m} + 1.022\text{ m} + 0.386\text{ m} \\ &= 14.466\text{m} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_P - h_{\text{loss}}$$

โดยที่ P_1 หมายถึง ความดันในถังเก็บสารอินทรีย์ระเหย

P_2 หมายถึง ความดันที่ปลายท่อ Vent ของถังดูดซับ

V_1 หมายถึง ความเร็วในท่อถังเก็บสารอินทรีย์ระเหย

V_2 หมายถึง ความเร็วที่ปลายท่อ Vent ของถังดูดซับ

Z_1 หมายถึง ความสูงอ้างอิงที่จุด P_1

Z_2 หมายถึง ความสูงอ้างอิงที่จุด P_2

ρ หมายถึง ความหนาแน่นของอากาศ

g หมายถึง แรงโน้มถ่วง

h_{loss} หมายถึง ความสูญเสียของระบบทั้งหมด

h_P หมายถึง ความสูญเสียจากเครื่องเป่าลม

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 &= \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_P - h_{\text{loss}, t} \\ h_P &= \frac{\frac{110 \text{ kPa}}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{101.3 \text{ kPa}}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + (-6 \text{ m}) + 14.466 \text{ m}}{1} \\ h_P &= \frac{\frac{110 \text{ kPa}}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{101.3 \text{ kPa}}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + (-6.97 \text{ Pa}) + 167.97 \text{ Pa}}{1} \\ &= 910.26 \text{ Pa} \end{aligned}$$

คำนวณขนาดของเครื่องอัดอากาศ (Blower)

จาก

$$\text{Power} = \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right] \left[\left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] \quad (17)$$

กำหนดให้ Power หมายถึง ขนาดแรงม้าของมอเตอร์ไฟฟ้า (kW)

P_1 หมายถึง ความดันที่ดัน (kPa)

P_2 หมายถึง ความดันที่ปลายทาง (kPa)

Q_1 หมายถึง อัตราการไหลของอากาศทางเข้า (ft^3/min)

k หมายถึง ค่าคงที่ของ Specific heat ratio ของอากาศเท่ากับ 1.4

แทนค่า

$$\text{Power} = \left[(101.3 \text{ kPa}) \left(221.89 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right) \right] \left[\frac{1.4}{(1.4 - 1)} \right] \left[\left(\frac{110 \text{ kPa}}{101.3 \text{ kPa}} \right)^{\frac{(1.41)}{1.4}} - 1 \right]$$

$$= 910.26 \text{ Pa}$$

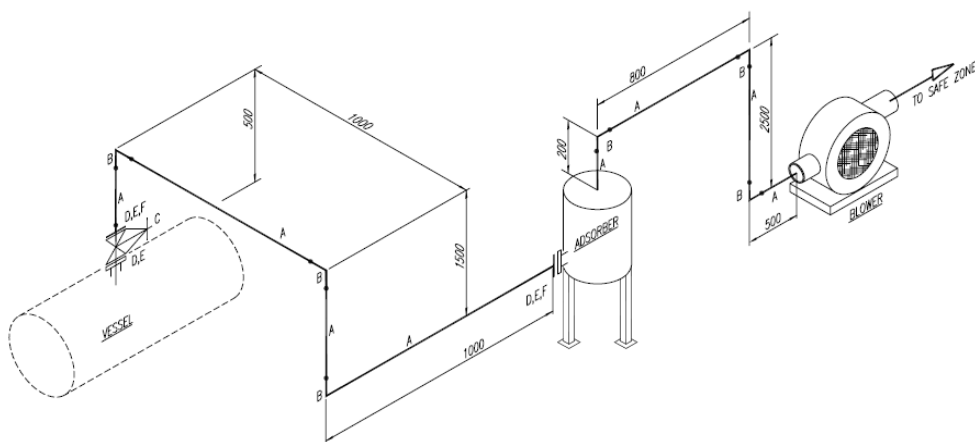
ประมาณการด้วยประสิทธิภาพของมอเตอร์ 80 %

$$\text{ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้า} = \frac{0.52 \text{ kW}}{0.8}$$

$$= 0.65 \text{ kW}$$

จะได้แรงม้าเท่ากับ $\text{HP} = 0.65 \text{ kW} \times 1.34$

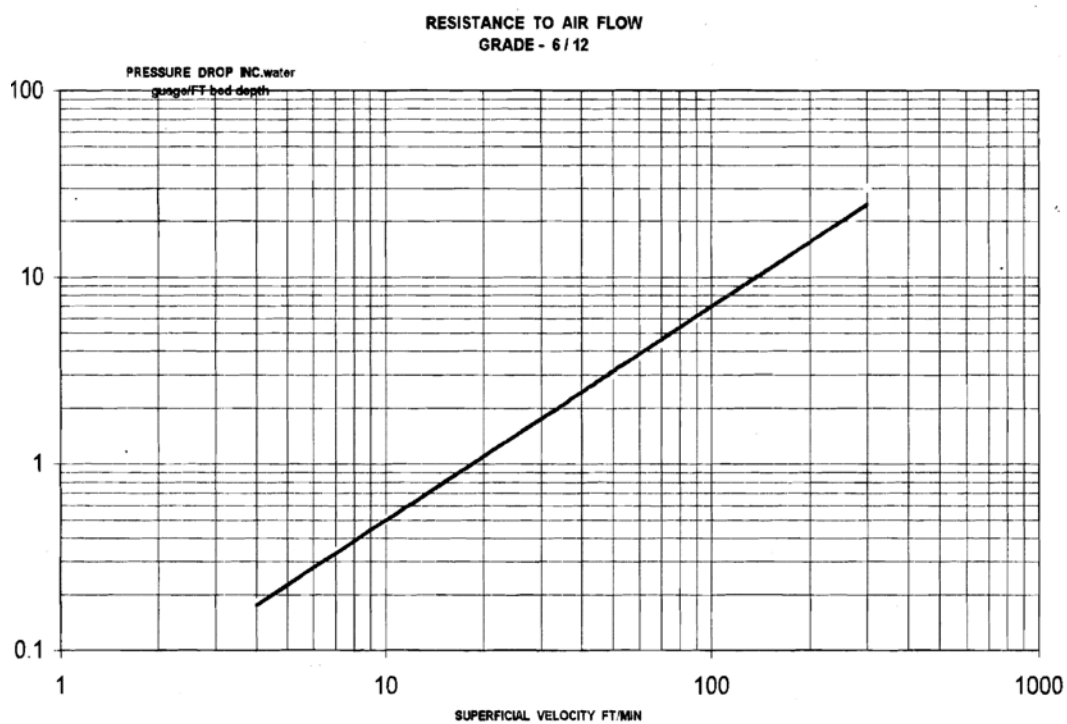
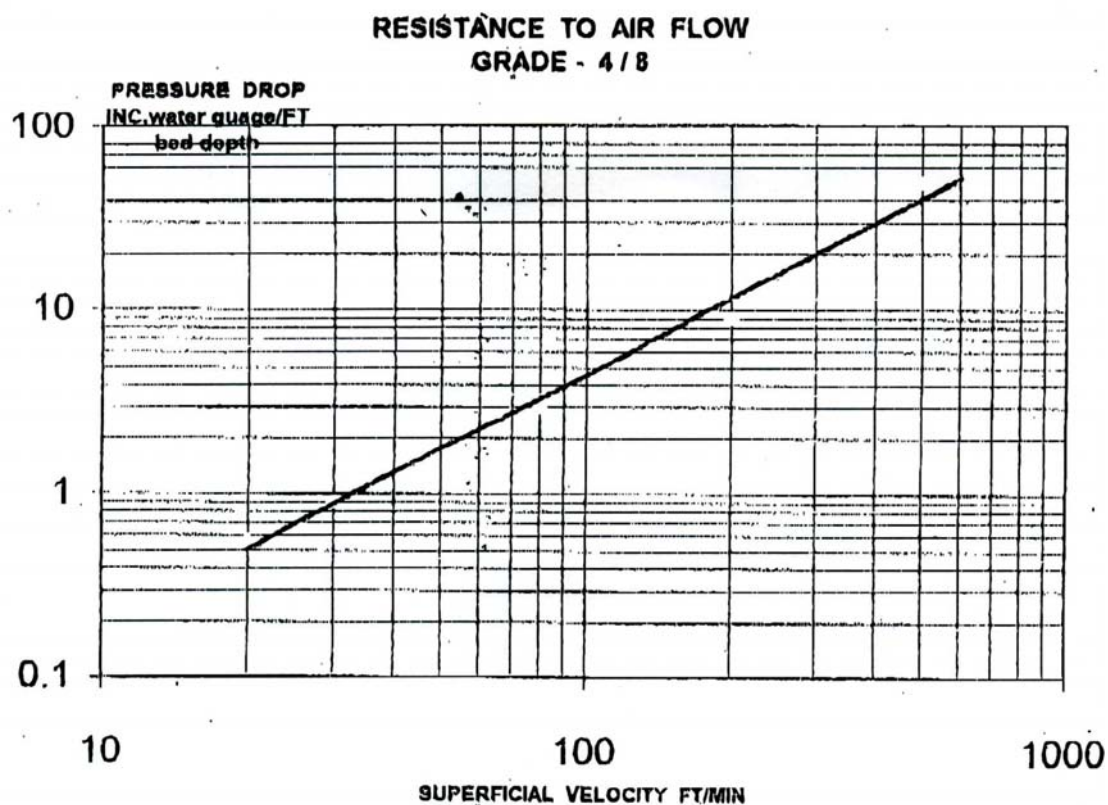
$$\text{HP} = 0.87 \text{ แรงม้า}$$



ภาพผนวกที่ ก4 การออกแบบระบบดูดซับ

ภาคผนวก ข

กราฟความดันตกคร่อมถ่านกัมมันต์



ภาพผนวกที่ ข1 ความดันตกคร่อมถ่านกัมมันต์ grade 4/8 และ 6/12

ภาคผนวก ค

ความเข้มข้นของสารเคมีที่เกินกว่าจะรับได้

ค่าการได้รับสารเคมี Evaluating Exposures to Volatile Toxicants by Monitoring ความเข้มข้นของสารเคมีมากกว่า (TLV-TWA) mix จะถือว่าปริมาณเกินกว่าที่จะรับได้

ตารางผนวกที่ ค1 TLVs and PELs for a Variety of Chemical Substances

Substance	TLV-TWA		OSHA PEL	
	ppm	mg/m ³ , 25°C	ppm	mg/m ³ , 25°C
Acetaldehyde	100	180	200	360
Acetic	10	25	10	25
Acetone	750	1780	1000	2400
Acrolein	0.1	0.25	0.1	0.25
Acrylic acid (skin)	2	6		
Acrylonitrile (skin)	2	4.5	2	4.5
Ammonia	25	18	50	35
Aniline (skin)	2	7.6	5	19
Arsine	0.05	0.2	0.05	0.2
Benzene	10	30	1	3.0
Biphenyl	0.2	1.3	0.2	1.0
Bromine	0.1	0.7	0.1	0.7
Butane	800	1900		
Caprolactum (vapor)	4.3	20		
Carbon monoxide	5000	9000	5000	9000
Carbon monoxide	25	29	50	55
Carbon tetrachloride (skin)	10	62.9	10	62.9
Chlorine	0.5	1.5	1.0	3.0
Choloroform	10	50	50	240
Cyclohexane	300	1030	300	1050
Cyclohexanol (skin)	50	200	50	200
Cyclohexene	300	1010	300	1015
Cyclopentane	600	1720		

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Substance	TLV-TWA		OSHA PEL	
	ppm	mg/m ³ , 25°C	ppm	mg/m ³ , 25°C
Diborane	0.1	0.1	0.1	0.1
1,1 Dichloroethane	100	405	100	405
1,2 Dichloroethylene	200	790	200	790
Diethylamine	5	15	25	75
Diethyl ketone	200	705	10	
Dimethylamine	10	18	100	18
Dioxane (skin)	25	90	400	360
Ethyl acetate	400	1400	10	1400
Ethylamine	5	9.2	100	18
Ethyl benzene	100	435	200	435
Ethyl bomide	5	22	1000	890
Ethyl Chloride	1000	2600	1	2600
Ethylene dichloride	10	40	1	4
Ethylene oxide	1	2	400	2
Ethyl ether	400	1200	10	1200
Ethyl mercaptan	0.5	1.3	0.1	25
Fluorine	1	2	0.75	0.2
Formaldehyde	0.3	0.37	5	1.1
Formic acid	5	9.4	5	9
Furfural (skin)	2	8		20
Gasoline	300	900	500	
Heptane	400	1600	1	2000
Hexachloroethane	1	9.7	500	10
Hexane	50	176	5	1800
Hydrogen chloride	TLV-C5	7.5	10	7
Hydrogen cyanide (skin)	TLV-C10	11	3	11

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Substance	TLV-TWA		OSHA PEL	
	ppm	mg/m ³ , 25°C	ppm	mg/m ³ , 25°C
Hydrogen fluoride	TLV-C3	2.6	1	2.6
Hydrogen peroxide	1	1.4	20	1.4
Hydrogen sulfide	10	14	0.1	28
Iodine	TLV-C 0.1	1	100	1
Isobutyl alcohol	50	150	400	300
Isopropyl alcohol	400	983	500	980
Isopropyl ether	250	1040	0.5	2100
Ketene	0.5	0.9	0.25	0.9
Maleic anhydride	0.25	1	200	1
Maleic acetate	200	606	1000	610
Methyl acetylene	1000	1650	200	1650
Methyl alcohol	200	260	10	260
Methylamine	5	6.4	20	12
Methyl bromide (skin)	5	20	100	80
Methyl chloride	50	105	500	210
Methylene chloride	50	174	200	1740
Methyl ethyl ketone	200	590	100	590
Methyl formate	100	250	0.02	250
Methyl isocyanate (skin)	0.02	0.05	PEL-C	0.05
Methyl mercaPVan	0.5	1	10	20
NaPVhalene	10	50	10	50
Nitric acid	2	5	2	5
Nitric oxide	25	30	25	30
Nitrobenzene (skin)	1	5	1	5
Nitrogen dioxide	3	5.6	5	9
Nirtomethane	100	250	100	250

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Substance	TLV-TWA		OSHA PEL	
	ppm	mg/m ³ , 25°C	ppm	mg/m ³ , 25°C
Nonane	200	1050		
Octane	300	1400	500	2350
Oxalic acid		1		1
Ozone	TLV-C0.1	0.2	0.1	0.2
Pentane	600	1770	1000	2950
Phenol (skin)	5	19	5	19
Phosgene	0.1	0.4	0.1	0.4
Phosphin	0.3	0.4	0.3	0.4
Phosphoric acid		1		1
Phthalic anhydride	1	6.1	2	12
Pyridine	5	16	5	15
Styrene	50	213	100	425
Styrene	2	5.2	5	13
Sulfur dioxide	50	188	200	750
Trichloroethylene	50	270	100	540
Triethylamine	5	12	25	100
Turpentine	100	560	100	560
Vinyl acetate	10	35		
Vinyl chloride	5	13	1	2.56
Xylene	100	435	100	435

ที่มา: Crowl and Louvar (2001)

ภาคผนวก ง
ภาพตารางแปลงหน่วย

ตารางแปลงหน่วยน้ำหนัก (มวล)

Mass Equivalents

หน่วย	pound	ounce	gram	kg	slug	stone	tonne
pound	1	16	453.6	0.453597	0.031	0.0135	0.0004536
ounce	0.0625	1	28.3495	0.028349	0.0019		
gram	0.0022	0.0353	1	0.001			
kg	2.2046	35.274	1,000	1	0.0685	0.157	0.001
slug	32.174	514.785	14,593.9	14.5939	1	2.29825	0.014594
stone	13.988	223.99	6,350.0	6.35	0.4351	1	0.00635
tonne	2,204.6			1,000	68.5213	157.48	1

Metric tonne เรียกทั่วไปว่า Tonne มีค่า = 1000 kg

US ton เรียกทั่วไปว่า Short Ton มีค่า = 0.907185 Metric Tonne

UK ton เรียกทั่วไปว่า Long Ton มีค่า = 1.01605 Metric Tonne

ตารางแปลงหน่วยความยาว

Length Equivalents

หน่วย	inch	ft	yard	mile	cm	m	km
inch	1	0.08333	0.027778		2.54	0.0254	
ft	12	1	0.333333		30.48	0.3048	
yard	36	3	1	0.0005682	91.44	0.9144	0.0009144
mile	63,360	5,280	1,760	1		1609.344	1.609344
cm	0.3937	0.032808	0.010936		1	0.01	
metre	39.3701	3.28084	1.093613	0.0006214	100	1	0.001
km	39,370	3280.8	1,093.613	0.62137	100,000	1,000	1

ตารางแปลงหน่วยพื้นที่

Area Equivalents

หน่วย	inch ²	ft ²	acre	cm ²	m ²
inch ²	1	0.006944		6.4516	0.0006452
ft ²	144	1		929.0304	0.0929
acre		43,560	1		4,047
cm ²	0.155	6.2288		1	0.0001
m ²	1,550.003	10.76391	0.000247	10,000	1

ตารางแปลงหน่วยความเร็ว

Velocity Equivalents

หน่วย	mm/s	ft/min	cm/s	ft/s	m/s
mm/s	1	0.19685	0.1	0.003281	0.001
ft/min	5.08	1	0.508	0.016667	0.00508
cm/s	10	1.9685	1	0.032808	0.01
ft/s	304.8	60	30.48	1	0.3048
m/s	1,000	196.85	100	3.2808	1

ภาพผนวกที่ 1 ภาพตารางการแปลงหน่วย

ตารางแปลงหน่วยความหนาแน่น

Density Equivalents

หน่วย	lb/inch ³	lb/ft ³	gram/cm ³	kg/m ³	slug/ft ³
lb/inch ³	1	1,728	27.6799	27,679.9	53.708
lb/ft ³	0.0005787	1	0.01602	16.01846	0.31081
gram/cm ³	0.03613	62.4281	1	1,000	1.9403
kg/m ³	0.0000361	0.06243	0.001	1	0.00194
slug/ft ³	0.019	32.17	0.51538	515.379	1

ตารางแปลงหน่วยปริมาตร

Volume Equivalents

หน่วย	US.gallon	UK.gallon	inch ³	ft ³	liter	m ³	barrel *
US. gallon	1	0.83267	231	0.13368	3.7853	0.00378	0.02381
Im. gallon	1.2009	1	277.42	0.16054	4.5459	0.00455	0.02859
inch ³	0.004329	0.003604	1	0.000579	0.0164	0.000016	0.0001
ft ³	7.4805	6.2288	1728	1	28.316	0.02832	0.17813
liter	0.26418	0.21997	61.024	0.0353	1	0.001	0.00629
m ³	264.17	219.97	61,023.74	35.3147	1,000	1	6.2899
barrel	42	34.977	9702	5.614	158.983	0.15876	1

* เป็นหน่วยดวางน้ำมัน (Oil barrel), 1 Barrel = 42 US. Gallons

ตารางแปลงหน่วยอัตราการไหล

Volumatic Flow Rate Equivalents

หน่วย	GPM(US)	GPM(UK)	ft ³ /min	ft ³ /sec	m ³ /hr	m ³ /min	liter/sec
GPM(US)	1	0.8327	0.1337	0.00223	0.2271	0.003785	0.06308
GPM(UK)	1.201	1	0.1605	0.002676	0.27275	0.004545	0.0758
ft ³ /min	7.481	6.229	1	0.01667	1.699	0.02832	0.4719
ft ³ /sec	448.83	373.7	60	1	101.94	1.699	28.32
m ³ /hr	4.403	3.666	0.5886	0.00981	1	0.01667	0.2778
m ³ /min	0.2642	0.22	35.3147	0.5886	60	1	16.667
liter/sec	15.85	13.2	2.119	0.0353	3.6	0.06	1

ตารางแปลงหน่วยกำลัง

Power Equivalents

หน่วย	HP	ft-lb/sec	Watt	kW	Btu/hr
HP	1	550	745.7	0.7457	2,544
ft-lb/sec	0.00182	1	1.3558	0.00136	4.626
Watt	0.00134	1	1	0.001	3.412
kW	1.34	737.6	1,000	1	3,412
Btu/hr	0.00039	0.2161	0.2931	0.00029	1

ภาพผนวกที่ ง1 (ต่อ)

ตารางแปลงหน่วยความดัน

Pressure Equivalents

หน่วย	PSI	kPa	kg/cm ²	cm H ₂ O	feet H ₂ O	inches Hg	mm Hg	inches H ₂ O	Atm.	Bar	mPa
PSI	1	6.894757	0.070307	70.306927	2.306723	2.03602	51.71486	27.68068	0.068046	0.0689476	0.00689
kPa	0.1450377	1	0.0101972	10.19745	0.3345618	0.2952997	7.50061	4.01472	0.0096692	0.01	0.001
kg/cm²	14.223343	98.06694	1	1,000.026	32.809312	28.95901	735.5588	393.71181	0.9678416	0.9806649	0.09806
cm H₂O*	0.0142229	0.0980634	0.001	1	0.032808	0.0289581	0.7355372	0.3937	0.0009678	0.0009806	0.00098
feet H₂O*	0.433515	2.968961	0.0304791	30.48	1	0.882646	22.4192	12	0.029499	0.0296896	0.00298
inches Hg*	0.4911542	3.386389	0.0345316	34.53253	1.132957	1	25.4	13.595484	0.0334211	0.0338639	0.00386
mm Hg*	0.0193368	0.1333225	0.0013595	1.359554	0.0446046	0.0393701	1	0.535255	0.0013158	0.0013332	0.00013
inches H₂O*	0.0361263	0.2490819	0.0025422	2.54	0.08333	0.0735539	1.8682683	1	0.0024583	0.0024908	0.000249
Atm.	14.696	101.32535	1.033231	1,033.2633	33.8995	29.9213	760	406.794	1	1.0132535	0.1013
Bar	14.5038	100	1.019716	1019.7466	33.4833	29.53	750.0626	401.8596	0.986923	1	0.1
mPa	145.0377	1,000	10.197	10,197.45	334.56	295.299	7500.61	4014.74	9.669	10	1

* น้ำ (H₂O) ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 68 °F (20 °C) และปรอท (Hg) ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 32 °F (0 °C)

ตารางนี้นอกจากใช้ในการแปลงหน่วยความดัน ยังใช้ได้กับการแปลงหน่วยความแข็งแรงและความดันของวัสดุ (Strength & Stress) ด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสลักเกลียว และขนาดของรูร้อยสลัก

Relationships between size of stud bolts and size of bolt holes

ขนาดของรูร้อยสลัก Size of bolt holes (mm)	ขนาดของสลักเกลียว UNC Size of UNC stud bolts (inch)	ขนาดของสลักเกลียว ISO Size of ISO stud bolts (mm)
15.8	1/2	M 14
19	5/8	M 16
22.2	3/4	M 20
25.4	7/8	M 24
28.5	1	M 27
31.8	1 1/8	M 30
35	1 1/4	M 33
38.1	1 3/8	M 36
41.1	1 1/2	M 39
44.5	1 5/8	M 42
47.8	1 3/4	M 45
50.8	1 7/8	M 48
53.8	2	M 52
60.5	2 1/4	M 56
66.5	2 1/2	M 64
73.2	2 3/4	M 70
79.2	3	M 76
91.9	3 1/2	M 90

ภาพผนวกที่ 31 (ต่อ)

ที่มา: <http://www.foursquare.co.th>

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายศักดิ์เกษม สายไหม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 พฤศจิกายน 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดนครสวรรค์
ประวัติการศึกษา	ครุศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	พนักงานความปลอดภัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ปตท. เคมิคอล จำกัด (มหาชน)
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-