



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและประเมินราคาไซโคลน
เวทสครับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ

Computer Program Development for Design and Cost Estimation of Cyclones,
Wet Scrubbers and Afterburners

نامผู้ศึกษา นางสาวระพีพร ธนะบุญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ไพโรจน์ บวรเจดิกิจ, D.Tech.Sci.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วชิระ จงบุรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาติ เข้มไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและประเมินราคาไซโคลน เวทสครับเบอร์
และ เตาเผาก๊าซและไอ

Computer Program Development for Design and Cost Estimation of Cyclones, Wet Scrubbers
and Afterburners

โดย

นางสาวระพีพร ชนะนุ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระพีพร ฐานะ 2554: การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและ
ประเมินราคาไซโคลน เวทสครับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ ปรินญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ไพโรจน์ดี บรรเจิดกิจ,
D.Tech.Sci. 247 หน้า

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบและ
ประเมินราคา ไซโคลน (Cyclones) เวทสครับเบอร์ (Wet Scrubbers) และเตาเผาก๊าซและไอ
(Afterburners หรือ VOC Incinerators) โดยใช้ภาษาวิชวลเบสิก เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการ
ออกแบบ และลดขั้นตอนในการคำนวณด้วยมือ ขั้นตอนและวิธีการออกแบบอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ใน
งานวิจัย แต่ถูกนำมาบรรจุอยู่ในโปรแกรมเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน โดยการออกแบบไซโคลนจะ
หาจากประสิทธิภาพรวมที่ต้องการในการกำจัดฝุ่น โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลางของไซโคลน การออกแบบเวทสครับเบอร์ที่เน้นในการกำจัดฝุ่น จะใช้แบบจำลอง
ที่ใช้ในการทำนายสัดส่วนของอนุภาคที่เวทสครับเบอร์ไม่สามารถดักจับไว้ได้ ส่วนเวทสครับ
เบอร์ที่เน้นในการกำจัดก๊าซและไอ คือ Packed Bed Column จะใช้แบบจำลองทฤษฎีฟิล์มสองชั้น
และใช้ไดอะแกรม U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation ในการหาขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลางและความดันสูญเสีย การออกแบบเตาเผาก๊าซและไอจะกำหนดอุณหภูมิในห้องเผา
ไหม้ จากนั้นคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงโดยใช้หลักการสมดุลมวลและพลังงาน แล้วจึงคำนวณหา
ขนาดของเตาเผา การประเมินราคาของอุปกรณ์แบ่งออกเป็นเงินลงทุนทั้งหมดและค่าใช้จ่ายรายปี
ที่เกิดจากการเดินระบบ ซึ่งราคาอุปกรณ์ที่คำนวณได้จะนำมาเปรียบเทียบให้เป็นราคา ณ ปัจจุบัน
โดยการคูณด้วยดัชนีปรับเปลี่ยนราคา ส่วนค่าใช้จ่ายรายปีจะขึ้นกับขนาดและสภาวะการทำงาน
ของอุปกรณ์หลัก รวมทั้งตัวแปรที่ขึ้นกับอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ

สรุปผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คือ ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการ
ออกแบบ ไซโคลน เวทสครับเบอร์ และ เตาเผาก๊าซและไอ ภายในโปรแกรมประกอบไปด้วย
โปรแกรมย่อยในการคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ ค่าความดันสูญเสีย พลังงานและทรัพยากร
อื่นๆที่ใช้ในการเดินระบบ เงินลงทุนทั้งหมด และค่าใช้จ่ายรายปี

Rapeeporn Tananu 2011: Computer Program Development for Design and Cost Estimation of Cyclones, Wet Scrubbers and Afterburners. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Ms. Peerakarn Banjerdkij, D.Tech.Sci. 247 pages.

The objective of the research was to develop the computer program assisting with Design and cost estimating for cyclones, wet scrubbers and afterburners or VOC incinerators. By using Visual Basic language, computing and designing time was greatly reduced when compared to hand calculation. The program utilized standard design methods that were described in the research, but are now contained in a simple to use program. Cyclone design involved using trial-and-error methods. Body diameter of the cyclone generally was pre-selected. Wet scrubber design for particulate removal utilized models to predict the penetration for given particulate size. Design of Packed Bed Column working as wet scrubbers for gas removal used the Two-Film Theory and U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation to obtain the column diameter and pressure drop. Afterburner design required prior specification of the operating temperatures. Fuel consumption was calculated by using material and energy balance and then calculating the size of afterburner. Cost estimating, total capital investment and total annual cost were all calculated. Equipment costs were calculated using equipment vendor supplied equations and adjusting to present day cost by using a cost index. Annual cost items were computed from known data on the equipment size and operating mode, as well as from facility and control device parameters.

The final result of the research was a computer program for the design cyclones, wet scrubbers and afterburners or VOC incinerators. Included in the computer program were easy to use subprograms for sizing equipment, determining pressure drop, horse power and other resources for operating equipment, calculation of total capital investment and annual cost.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดีขอขอบคุณ ผศ.กษกร สุรเนาวรัตน์ ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ในทางปฏิบัติ ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ ควบคุมดูแล และตรวจทานแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณ ดร.พิรกานต์ บรรเจิดกิจ ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี และ รศ.ดร.จักรกฤษณ์ ศิวัชเดชเทพ ที่ให้เกียรติรับเชิญมาเป็นคณะกรรมการในการสอบและช่วยแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง มีเนื้อหาที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ทำยนี้ขอขอบคุณมารดา และบุตรชายของข้าพเจ้า สำหรับกำลังใจสนับสนุน ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้

ระพีพร ธนะนุ
ตุลาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	88
อุปกรณ์	88
วิธีการ	88
ผลและวิจารณ์	110
ผล	110
วิจารณ์	139
สรุปและข้อเสนอแนะ	145
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	146
ภาคผนวก	150
ภาคผนวก ก การคำนวณออกแบบและประเมินราคาของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศ ด้วยมือ	151
ภาคผนวก ข แผนภาพ Psychrometric Chart และค่าคงที่ของตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ใช้บรรจุใน Packed Bed Column (Packing Constant)	214
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของก๊าซและของเหลว	220
ภาคผนวก ง คุณสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	229
ภาคผนวก จ เปรียบเทียบการคำนวณโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากโปรแกรมที่พัฒนา กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ	232
ภาคผนวก ฉ ค่าพารามิเตอร์แนะนำและข้อจำกัดพารามิเตอร์บางค่าในการคำนวณ ออกแบบอุปกรณ์	236

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข สรุปพารามิเตอร์ที่ใส่เข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของ โปรแกรม	241
ภาคผนวก ข ดัชนีปรับเปลี่ยนราคา	247

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงขนาด (สัดส่วน) ของไซโคลนมาตรฐาน	10
2	HTU สำหรับตัวกลางประเภทพลาสติก	38
3	แสดงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการออกซิไดซ์ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 80% เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา	50
4	ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้ในการคูณเพื่อคำนวณหาราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ ราคาใน การติดตั้งทางตรงและทางอ้อมของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศโดยทั่วไป	63
5	แสดงแฟกเตอร์แรงงาน (Labor Factor) เพื่อประมาณค่าแรงในการควบคุมการ ทำงานของระบบแต่ละชนิด	66
6	ข้อมูลและแฟกเตอร์ที่ใช้ในการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีของอุปกรณ์บำบัดมลพิษ อากาศ	69
7	ค่าคงที่ในการประเมินราคาพัฒนาแต่ละชนิด	74
8	รายการค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้ออุปกรณ์และแฟกเตอร์ที่ใช้ในการคูณ	76
9	แฟกเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาราคาเวนตูรีที่ทำจากวัสดุแต่ละชนิด	77
ตารางผนวกที่		
ก1	แสดงข้อมูลการแจกแจงขนาดของฝุ่น	152
ก2	ผลการคำนวณประสิทธิภาพย่อย ประสิทธิภาพรวมของไซโคลน	155
ก3	แสดงผลการคำนวณความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละช่วงขนาด และความเข้มข้น ของฝุ่นรวมทั้งหมดที่เข้าและออกจากไซโคลน	157
ก4	แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพย่อย/รวมในการกำจัดฝุ่นของเวนตูรี สกรับเบอร์	160
ก5	แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวนตูรีสกรับเบอร์	164
ก6	แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดในเวนตูรีสกรับเบอร์	165
ก7	แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดในการเดินระบบเวนตูรี สกรับเบอร์	166

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก8 แสดงผลกาคำนวณประสิทธิภาพย่อย/รวม ในการกำจัดฝุ่นของสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง	170
ก9 แสดงผลการความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง	173
ก10 แสดงผลกาคำนวณประสิทธิภาพย่อย/รวม ในการกำจัดฝุ่นของสกรับเบอร์แบบไหลตามขวาง	175
ก11 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากสกรับเบอร์แบบไหลตามขวาง	178
ก12 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดใน Packed Bed Column	198
ก13 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดใน Packed Bed Column	199
ก14 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดในเตาเผาโดยใช้ความร้อน	206
ก15 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดในเตาเผาโดยใช้ความร้อน	207
ข1 ค่า Packing Factor ของตัวกลาง	217
ข2 คุณสมบัติการแพร่กระจายของก๊าซมลพิษบางชนิดในอากาศและในของเหลว	218
ข3 ค่าคงที่ α , β , γ , ϕ , b ของตัวกลางที่ใช้บรรจุใน Packed Bed Column	219
ค1 ค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของอากาศ	221
ค2 คุณสมบัติของน้ำ	225
ค3 ค่าความหนาแน่นและความหนืดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	226
ค4 ความหนาแน่นของสารละลายซัลฟิวริก	227
ง1 อุณหภูมิติดไฟของสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิด (Autoignition temperature)	230
ง2 ค่า Lower Explosive Limit (LEL) และค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิด	231
ฉ1 พารามิเตอร์ที่แนะนำในการออกแบบอุปกรณ์เวทีสกรับเบอร์ ทั้ง 3 ชนิด	238
ฉ2 พารามิเตอร์ที่แนะนำในการออกแบบ Packed Bed Column	239
ฉ3 พารามิเตอร์ที่แนะนำสำหรับใช้ในการออกแบบเตาเผาแบบใช้ความร้อนและเตาเผาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	240
ช1 ดัชนีปรับเปลี่ยนราคา	247

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การไหลของกระแสก๊าซในไซโคลน	7
2	แสดงส่วนประกอบของไซโคลน	7
3	ชนิดท่อทางเข้าของไซโคลนที่ก๊าซไหลเข้าตามแนวเส้นสัมผัส	8
4	ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนมาตรฐาน	11
5	เวนทูรีสกรับเบอร์	17
6	เวทสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง	17
7	เวทสกรับเบอร์แบบไหลตามขวาง	18
8	ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two-Film-Theory)	24
9	แสดงชนิดของตัวกลาง	30
10	กราฟแสดงเส้นการปฏิบัติการในหอดูดซึม	31
11	กราฟแสดงการกำหนดอัตราการไหลของของเหลว	32
12	ไดอะแกรมเพื่อใช้ในการประมาณค่าความดันสูญเสีย (U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation Diagram)	36
13	ผลของอุณหภูมิกับเวลาและความเร็วของปฏิกิริยา	42
14	เตาเผาแบบใช้ความร้อนโดยตรง (Thermal Oxidizer)	46
15	เตาเผาแบบใช้ความร้อนโดยตรง โดยมีการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่	47
16	Regenerative Incinerator	47
17	เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	48
18	ตัวเร่งปฏิกิริยารูปทรงรวงผึ้ง (Honey Comb Catalyst)	49
19	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณออกแบบไซโคลน	85
20	โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาคุณสมบัติในตัวกลางที่ผู้ใช้เลือก เพื่อบรรจุใน Packed Bed Column	86
21	โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาความดันสูญเสียในเวนทูรี สกรับเบอร์	87
22	แผนผังการทำงานโดยรวมของโปรแกรม	89
23	แผนผังการคำนวณการออกแบบไซโคลน	91
24	แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณออกแบบเวนทูรีสกรับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แผนผังการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทางเพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น	96
26	แผนผังการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวางเพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น	98
27	แผนผังการคำนวณออกแบบเวนทูรีสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ	101
28	แผนผังการคำนวณออกแบบสครับเบอร์แบบไหลสวนทางเพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น	102
29	แผนผังการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวางเพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ	103
30	แผนผังการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ	105
31	แผนผังขั้นตอนการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ	108
32	หน้าต่างล็อกอินเข้าสู่โปรแกรม	110
33	เมนูหลักของโปรแกรม (Main Menu)	111
34	หน้าต่างข้อมูลการกระจายขนาดฝุ่นและคุณลักษณะของอากาศเสีย	112
35	การออกแบบไซโคลนโดยการกำหนดประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นที่ต้องการ	113
36	หน้าต่างการประเมินราคาไซโคลน (Cyclone Cost)	114
37	หน้าต่างแสดงข้อมูลการกระจายขนาดของฝุ่นและคุณลักษณะของอากาศเสีย	116
38	Psychrometric chart	117
39	การออกแบบเวนทูรีสครับเบอร์ (Venturi Scrubber)	117
40	เวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทาง (Countercurrent spray chamber)	118
41	เวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวาง (Crossflow spray chamber)	118
42	แสดงผลการประเมินราคาเวนทูรีสครับเบอร์	120
43	ข้อมูลของอุปกรณ์เดิมที่มีการใช้งานจริง	122
44	หน้าต่างการออกแบบเวนทูรีสครับเบอร์เพื่อใช้ในการดูดซึมก๊าซ	122
45	หน้าต่างการออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทางเพื่อใช้ในการดูดซึมก๊าซ	123
46	การออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวางเพื่อใช้ในการดูดซึมก๊าซ	123
47	การออกแบบ Packed Bed Column	125
48	U.S. Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation Diagram	126
49	การคำนวณหาความสูงของ Transfer unit	126
50	แสดงผลการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column	127

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	การประเมินราคา Packed Bed Column	128
52	การออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ	131
53	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	131
54	การคำนวณ Oxygen content และ LEL mixture	132
55	แสดงผลการคำนวณ Oxygen content และ LEL mixture	132
56	การประมาณค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้	133
57	ผลการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน	133
58	ผลการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	134
59	การคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอแบบใช้ความร้อน	135
60	การคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	136
61	รายงานการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน	137
62	รายงานการประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน	138
63	ค่าความดันสูญเสียกับขนาดของไซโคลน	140
64	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาโดยใช้ความร้อน	143
65	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	144
ภาพผนวกที่		
ข1	Psychrometric Chart at normal temperature	215
ข2	Psychrometric Chart at high temperature	216
ค1	ไดอะแกรมแสดงค่าความหนืดของสารละลายซัลฟิวริก (H_2SO_4)	228
จ1	ข้อมูลการกระจายฝุ่น คุณสมบัติ และลักษณะอากาศเสีย	233
จ2	ผลการคำนวณออกแบบไซโคลนจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	233
จ3	ผลการคำนวณออกแบบไซโคลนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดย NSF	234
จ4	ผลการคำนวณค่าความดันสูญเสียจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น	234
ช1	สรุปพารามิเตอร์ที่ใส่เข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม	242

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

$^{\circ}\text{F}$	=	องศาฟาเรนไฮต์
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
in.H ₂ O	=	ความสูงในหน่วยนิ้วของน้ำ
kmol	=	กิโลโมล
m ³	=	ลูกบาศก์เมตร
m ²	=	ตารางเมตร
Pa	=	ปาสคาล
l	=	ลิตร
kPa	=	กิโลปาสคาล
kW	=	กิโลวัตต์
mm.Hg	=	ความสูงในหน่วยมิลลิเมตรปรอท
m	=	เมตร
s	=	วินาที
hr	=	ชั่วโมง
min	=	นาที
atm	=	Atmospheric pressure
μm	=	ไมโครเมตร

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและประเมินราคาไซโคลน เวทสครับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ

Computer Program Development for Design and Cost Estimation of Cyclones, Wet Scrubbers and Afterburners

คำนำ

ปัญหามลพิษทางอากาศจากภาคอุตสาหกรรมมีทั้งปัญหาที่ก่อมลภาวะอยู่ภายในโรงงานเอง และที่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกโรงงาน โดยบรรดามลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกมีหลายชนิด ได้แก่ ปัญหาเรื่องฝุ่นเขม่า ควันดำ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวบรวมและการบำบัดมลพิษทางอากาศมีหลากหลายขึ้นกับชนิดของมลพิษที่ต้องการบำบัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดฝุ่นได้แก่ ไซโคลน เวทสครับเบอร์ ถุงกรอง ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดมลพิษที่มีลักษณะเป็นก๊าซและไอ เช่น เตาเผา เวทสครับเบอร์ หอดูดซับ ในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์บำบัดมลพิษทางอากาศสามารถคำนวณออกแบบโดยใช้วิธีการคำนวณด้วยมือ ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาด เนื่องจากการออกแบบมลพิษทางอากาศมีความซับซ้อน บางอุปกรณ์ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูกและต้องมีการปรับแก้ ทำให้ใช้เวลานาน ปัจจุบันจึงมีการผลิตโปรแกรมต่างๆ เพื่อการคำนวณและช่วยในการออกแบบอุปกรณ์บำบัดมลพิษทางอากาศเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ แต่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนิยมออกแบบเพื่อใช้สำหรับคำนวณออกแบบเพียงอุปกรณ์เดียว หรือสำหรับประเมินหาค่าพารามิเตอร์บางค่าเท่านั้น เช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบไซโคลน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการหาความดันสูญเสียในอุปกรณ์เวนทูรีสครับเบอร์ เป็นต้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นทำให้ผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูล เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกคำนวณออกแบบรวมทั้งทำการประเมินราคาได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยลดระยะเวลาและข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยมือได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณออกแบบระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ 3 ชนิด คือ ไซโคลน เวทสกรับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ
2. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการเดินระบบ ไซโคลน เวทสกรับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการประเมินราคาในการลงทุนทั้งหมดและค่าใช้จ่ายรายปีในการเดินระบบ ไซโคลน เวทสกรับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ

การตรวจเอกสาร

อากาศและมลพิษอากาศ

อากาศบริสุทธิ์ประกอบไปด้วย ไนโตรเจน 78.09% โดยปริมาตรและออกซิเจน 20.09% โดยปริมาตร ส่วนที่เหลืออีก 0.97% ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ฮีเลียม อาร์กอน คริปทอน ซีนอน ก๊าซอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงไปตามกาลและเวลา โดยปกติมีไอน้ำอยู่ในอากาศประมาณ 1-3% และยังประกอบด้วยฝุ่นละอองซึ่งมีขนาดตั้งแต่ขนาดหลายไมโครเมตรจนถึงไมครอน (วงศัพนันท์ และคณะ, 2540)

มลพิษทางอากาศ (Air Pollution) หมายถึงภาวะของอากาศ ที่มีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่มากพอและเป็นระยะเวลานานพอ ที่จะทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สัตว์ พืช และวัสดุต่างๆ สารดังกล่าวอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบ ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์ อาจอยู่ในรูปก๊าซ หยดของเหลว หรืออนุภาคของแข็งก็ได้ สารมลพิษอากาศหลักที่สำคัญๆ ได้แก่ ฝุ่นละออง (PM) ตะกั่ว (Pb) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และก๊าซโอโซน (O₃)

ระบบมลพิษอากาศ (Air Pollution Control System) มีส่วนประกอบ 3 ส่วนที่มีความสัมพันธ์กันคือ แหล่งกำเนิดสาร (Emission Sources) อากาศหรือบรรยากาศ (Atmosphere) และผู้รับผลกระทบ (Receptors) จากส่วนประกอบของระบบมลพิษอากาศที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าปริมาณและมลพิษที่ถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิด (Emissions) สภาพอุตุนิยมวิทยา (Meteorology) และสภาพภูมิประเทศ (Topography) เป็นตัวกำหนดปริมาณและความเข้มข้นของสารเจือปน

ประเภทและแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ

ประเภทของมลพิษอากาศจะแตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกมลพิษอากาศจากสภาวะของสารได้ดังนี้

1. มลพิษที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate)

ฝุ่นละออง หมายถึงอนุภาคที่เป็นของแข็ง หรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศหรือก๊าซ โดยทั่วไปแบ่งประเภทของอนุภาคตามดังนี้

1.1 ฝุ่น (Dust) ประกอบด้วยอนุภาคของแข็งใหญ่กว่าคอลลอยด์อาจลอยอยู่ในอากาศชั่วคราวหนึ่ง

1.2 ละอองไอ (Aerosol) ได้จากการฟุ้งกระจายของของเหลว หรือของแข็งในตัวกลางซึ่งเป็นก๊าซรวมถึงหมอก ควัน ละอองน้ำ และอาจมีขนาดตั้งแต่ 100 μm ลงไปจนถึง 0.1 ไมครอน อนุภาคที่เล็กกว่า 5 μm จะสามารถแขวนลอยได้อย่างสมบูรณ์ อนุภาคที่ใหญ่กว่า 5 μm จะตกลงสู่พื้น

1.3 จีเถ้า (Ash) หรือจีเถ้าที่ปลิวออกมาจากไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ได้แก่เชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์และแร่ธาตุต่างๆ

1.4 หมอก (Smog) ละอองไอซึ่งฟุ้งกระจายเป็นของเหลว ในทางอุตุนิยมวิทยา หมอกคือน้ำแข็งที่ฟุ้งกระจาย

1.5 ไอเสีย (Fume) ประกอบด้วยอนุภาคที่เกิดจากการกลั่นตัว หรือปฏิกิริยาเคมี ส่วนใหญ่แล้วขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เช่น ควันบุหรืและไอระเหยของโลหะออกไซด์ที่กลั่นตัว

1.6 ละอองน้ำ (Mist) ในทางอุตุนิยมวิทยาละอองน้ำหมายถึง การฟุ้งกระจายอย่างบางเบาของหยดน้ำซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่จะหล่นลงมาจากอากาศ ละอองน้ำอาจมาจากการกลั่นตัวของก๊าซหรือไอระเหย

1.7 ควัน (Smoke) ได้แก่อนุภาคเล็กๆที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ขนาดของฝุ่นที่มีขนาดช่วง 1 ถึง 10 μm เป็นขนาดของฝุ่นที่มีความสำคัญในการควบคุมมลพิษอากาศ เนื่องจากฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้หรือกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่มีขนาดในช่วงนี้ นอกจากนี้ฝุ่นที่มีขนาดเล็กหรือเท่ากับ 10 μm จัดว่าเป็น Respirable Dust ซึ่งเมื่อหายใจเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ ส่วนฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1 μm เรียกว่า Submicron Particles เป็นฝุ่นที่ถูกจับยากมากที่สุด

2. มลพิษที่มีลักษณะเป็นก๊าซและไอ (Gaseous)

มลพิษที่มีลักษณะเป็นก๊าซและไอ แบ่งออกเป็นมลพิษที่เป็นตัวของก๊าซเองที่เป็นพิษ ได้แก่ SO_2 NO_x O_3 CO เป็นต้น และไอระเหยของสารอินทรีย์ได้แก่ ก๊าซโซลีน (Gasoline), สี (Paint Solvents) และน้ำยาทำความสะอาด (Dry Cleaning Agent)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOC) หมายถึง สารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีไฮโดรเจน ออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบกันเป็นพวกอลิฟาติก (Aliphatics) หรืออโรมาติก (Aromatics) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์ และ คีโตน) และกลุ่มแอลกอฮอล์ที่สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้องที่มีความดันมากกว่า 0.14 mmHg ที่ 25 °C เป็นตัวทำละลายที่ดี โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 2 -12 ในต่างประเทศมีการให้คำจำกัดความของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น ประเทศญี่ปุ่น สารอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปก๊าซสามารถปล่อยหรือแพร่กระจายในอากาศได้ สหรัฐอเมริกา สารอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับแสงแดด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมมลพิษอากาศ

อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ (Air Pollution Control Equipments) หรืออุปกรณ์ทำความสะอาดอากาศ (Air Clean Devices) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการควบคุมหรือบำบัดมลพิษอากาศก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศสามารถแบ่งออกได้ตามชนิดของมลพิษที่ปนเปื้อนได้ 2 ประเภทได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดอนุภาคและอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดก๊าซและไอ

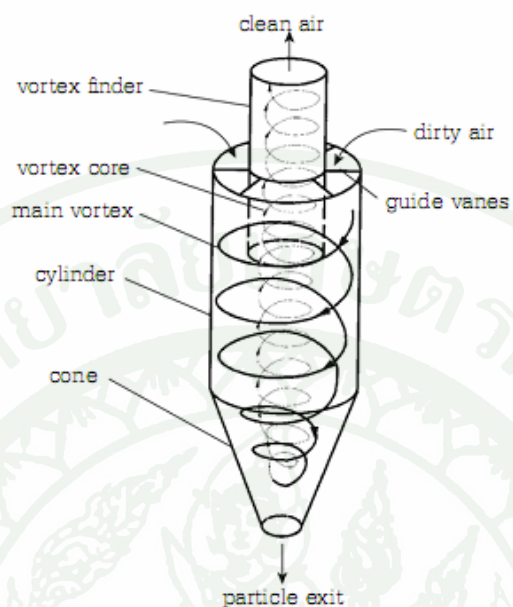
อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดอนุภาคที่สำคัญ ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมที่ใช้หลักการทางกลศาสตร์ คือ ห้องตกตะกอน (Settling Chambers) และไซโคลน (Cyclones) นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่ใช้หลักการอื่นๆ เช่น ถุงกรอง (Fabric Filters) สครับเบอร์ (Scrubbers) และเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitators) เป็นต้น

ส่วนอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดก๊าซและไอจะใช้ วิธีการดูดซับ ดูดซึม และการเปลี่ยนรูปของสาร โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

1. ไชโคลน (Cyclones)

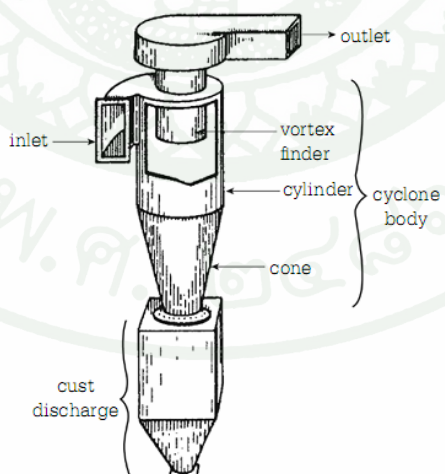
ไชโคลนเป็นเครื่องมือสำหรับแยกอนุภาคนาโนใหญ่ออกจากกระแสก๊าซโดยใช้แรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสก๊าซหมุนวน (Vortex) การทำงานของไชโคลนจะขึ้นกับความเฉื่อย (Inertia) ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ตามแนวตรง เมื่อก๊าซเปลี่ยนทิศทาง แรงหนีศูนย์กลางจะเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไชโคลนและเคลื่อนที่สู่ถังพัก

1.1 หลักการทำงานของไชโคลน ไชโคลนประกอบไปด้วยรูปร่างทรงกระบอก และมีปลายเป็นรูปโคน อากาศเคลื่อนที่เข้าสู่ไชโคลนในแนวสัมผัสที่ใกล้ส่วนบนของเครื่องด้วยความเร็วประมาณ 20 ถึง 30 m/s เมื่ออากาศเคลื่อนที่เข้ามาในไชโคลนจะเกิดกระแสวน (เรียกว่า Main Vortex) ขึ้น ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคออกไปยังผนังของไชโคลน เมื่อกระแสนี้เคลื่อนที่เกือบถึงปลายโคน อากาศจะหมุนกลับเป็นกระแสวนที่เล็กกว่าเดิม เรียกว่า Core Vortex และเคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนบนของไชโคลนจนออกไปทางท่อออก (Vortex Finder) ที่อยู่ด้านบนของไชโคลน นั่นคือมีกระแสวนสองชั้นเกิดในทิศทางสวนทางกัน สำหรับอนุภาคที่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังไชโคลนจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนปลายของไชโคลนไปยังถังพักเนื่องจากแรงเฉื่อยและแรงถ่วง ส่วนอากาศที่ไม่มีอนุภาคจะหมุนวนขึ้นผ่านท่อออกที่อยู่ส่วนบนของไชโคลน ส่วนใหญ่ไชโคลนจะทำมาจากเหล็กคาร์บอน หรือใช้โลหะหรือใช้เซรามิกก็ได้ถ้าต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และทนต่อการกัดกร่อน แต่พื้นผิวภายในของไชโคลนต้องเรียบ และเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนเคลื่อนที่ ดังนั้นการเดินเครื่องจึงง่าย ไม่ต้องการบำรุงรักษามากนัก และมีต้นทุนต่ำ ไชโคลนใช้งานหลายอย่าง เช่น แยกผลิตภัณฑ์ที่แห้ง หรือใช้ในการดักฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 μm จึงนิยมใช้เป็นอุปกรณ์ในการดักฝุ่นขนาดขนาดใหญ่ (Precleaner) ก่อนส่งไปยังอุปกรณ์ดักฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการดักฝุ่นขนาดเล็ก



ภาพที่ 1 การไหลของกระแสก๊าซในไซโคลน

ที่มา: Yuanhui Zang (2005)

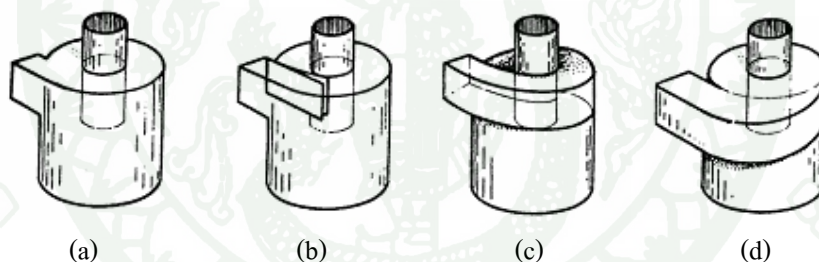


ภาพที่ 2 แสดงส่วนประกอบของไซโคลน

ที่มา: Mycock *et al.* (1995)

1.2 ชนิดของไซโคลน ไซโคลนมีหลายประเภทแตกต่างกันตามหลักเกณฑ์ที่ใช้จำแนก จำแนกตามวิธีการให้ก๊าซเข้าสู่ตัวไซโคลนสามารถแบ่งไซโคลนออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.2.1 ไซโคลนที่ก๊าซไหลเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Entry Cyclone) ทางเข้าอาจเป็นทางเข้าด้านบน (Top Inlet) หรือทางเข้าด้านล่าง (Bottom Inlet) โดยทั่วไปจะเป็นชนิดทางเข้าด้านบน ส่วนทางเข้าด้านล่างนิยมเลือกใช้เก็บฝุ่นละอองที่ปนมากับหยดน้ำหลังจากผ่านสครับเบอร์ ชนิดของท่อทางเข้าด้านบนมีหลายชนิด ที่นิยมใช้มากที่สุดคือท่อเข้าตามแนวเส้นสัมผัส ส่วนชนิดมีการติดตั้ง (แผ่นบังคับการไหล) Deflector Vane จะช่วยลดความปั่นป่วนในกระแสก๊าซ แต่มีผลต่อการเกิดกระแสวนทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นลดลง สำหรับท่อทางเข้าแบบเฮลิคอลล (Helical Entry) ใช้เพื่อลดค่าความดันสูญเสียของไซโคลนและเพิ่มสมรรถนะ ท่อทางเข้าแบบอินโวลูท (Involute Entry) ทำให้เกิดการปั่นป่วนที่ทางเข้าน้อยที่สุด ดังนั้นค่าความดันสูญเสียจึงมีค่าน้อยที่สุด



(a) Tangential Entry Cyclone (b) Tangential Entry with Deflector Vane Cyclone
(c) Helical entry (d) Involute entry

ภาพที่ 3 ชนิดท่อทางเข้าของไซโคลนที่ก๊าซไหลเข้าตามแนวเส้นสัมผัส

ที่มา: Mycock *et al.* (1995)

1.2.2 ไซโคลนที่ก๊าซไหลเข้าตามแนวแกน (Axial Entry Cyclone) ส่วนใหญ่เป็นไซโคลนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าไซโคลนขนาดใหญ่ เนื่องจากกระแสก๊าซถูกหมุนวนในกระแสนวนขนาดเล็กกว่า ดังนั้นกระแสก๊าซมีค่าความเร็ว (Radial Velocity) สูงในไซโคลนขนาดเล็ก ก๊าซจะเข้าและออกจากไซโคลนในแนวแกน กระแสก๊าซที่ไหลเข้าจะผ่านแผ่น Vane เพื่อทำให้เกิดการหมุนวน คล้ายกับในไซโคลนขนาดใหญ่ คือ ก๊าซไหลเข้าจะทำให้เกิดกระแสนวนนอกเคลื่อนที่ไปยังปลายโคน ส่วนก๊าซหมุนกลับเป็นกระแสนวนด้านในเคลื่อนที่ออกทางท่อบน โดยทั่วไปไซโคลนขนาดเล็กนี้ (ขนาดประมาณ 15-30 cm) หลายตัวมาต่อขนานกันเป็นมัลติไซโคลน (Multicyclones) เพื่อรองรับกระแสก๊าซที่มีอัตราการไหลที่

1.3 หลักการออกแบบไซโคลน หลักการออกแบบไซโคลนควรพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้

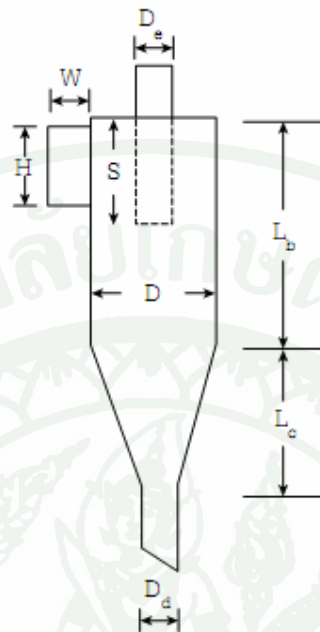
1.3.1 ขนาดรูปร่างของไซโคลน โดยทั่วไปไซโคลนสามารถจับฝุ่นที่มีขนาด 10 μm หรือใหญ่กว่าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไซโคลนมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไปสามารถจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 25 μm โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคได้ไม่เกิน 90 % แต่ถ้าเป็นไซโคลนที่มีประสิทธิภาพสูง (High-Efficiency) จะมีขนาดเล็กจะสามารถจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กถึง 5 μm ได้ ประสิทธิภาพของการจับอนุภาคแยกตามขนาดเรียกว่าประสิทธิภาพย่อย (Grade or Fractional Collection Efficiency) ขนาดและรูปร่างของไซโคลนมีหลายแบบ ตารางที่ 1 แสดงถึงสัดส่วนของไซโคลนมาตรฐานชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงขนาด (สัดส่วน) ของไซโคลนมาตรฐาน

พารามิเตอร์	ประเภทไซโคลนมาตรฐาน					
	ประสิทธิภาพสูง		ทั่วไป		อัตราการไหลสูง	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
ขนาดตัวไซโคลน(D/D)	1	1	1	1	1	1
ความสูงของท่อทางเข้า(H/D)	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
ความกว้างของท่อเข้า(W/D)	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
ขนาดท่อก๊าซออก(D _c /D)	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
ความยาว Vortex Finder (S/D)	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
ความยาวของรูปทรงกระบอก (L _b /D)	1.5	1.4	2	1.75	1.5	1.7
ความยาวของส่วนโคน (L _c /D)	2.5	2.5	2	2	2.5	2
ขนาดท่อระบายอนุภาค(D _d /D)	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

หมายเหตุ (1) และ (5) จากการศึกษาของ Stairmand; 1951 (2), (4) และ (6) จากการศึกษาของ Swift, 1969 (3) จากการศึกษาของ Lapple, 1951

ที่มา : Cooper and Alley (1994)



ภาพที่ 4 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนมาตรฐาน

ที่มา : Cooper and Alley (1996)

1.3.2 ประสิทธิภาพของไซโคลน เนื่องจากการแยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซของไซโคลนจะใช้กลไกแรงหนีศูนย์กลางเป็นหลัก เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี R ด้วยความเร็ว V_G จะมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับ $\omega = V_G/R$ แรงหนีศูนย์กลางจะเท่ากับ $\frac{mV_G^2}{R} = m\omega^2 R$ และความเร่ง (a) เท่ากับ $\frac{V_G^2}{R}$ แทนเมื่อแทนค่าความเร่งลงไปในสมการของ Stokes' law (สมการที่ (1)) เพื่อหาความเร็วในการตกของอนุภาคที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดังสมการ

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_G)}{18\mu_G} a \quad (1)$$

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_G) V_G^2}{18\mu_G R} \quad (2)$$

V_t = อัตราเร็วในการตกของอนุภาคในไซโคลน, m/s

d_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค, kg/m^3

ρ_g = ความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3

V_g = ความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลน, m/s

μ_g = ค่าความหนืดของก๊าซ, kg/m-s

R = รัศมีของกระแสวนด้านนอกสุดของไซโคลน, เมตร

หลักการในการออกแบบไซโคลนคือ เมื่ออากาศซึ่งมีอนุภาคฝุ่นปนอยู่ไหลเข้ามาจะเกิดการหมุนสร้างกระแสวนด้านนอกสุดของไซโคลน (Outer Vortex) โดยเรียกจำนวนรอบของการหมุนนี้ว่า จำนวนรอบของการหมุนประสิทธิผล (Number of Effective Turns) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right] \quad (3)$$

N_e = จำนวนรอบของการหมุนประสิทธิผล

L_b = ความสูงในส่วนทรงกระบอกของตัวไซโคลน, m

L_c = ความสูงส่วนโคนของตัวไซโคลน, m

H = ความสูงของท่อทางเข้าของไซโคลน, m

สามารถหาระยะเวลาที่ก๊าซหมุนวนในไซโคลน (Δt) ได้จากสมการ

$$\Delta t = \frac{2\pi R N_e}{V_g} \quad (4)$$

กำหนดให้ระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมีสูงสุดได้เท่ากับความกว้างของทางเข้าไซโคลน สามารถคำนวณหาความเร็วในการตกของอนุภาคได้จาก

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} \quad (5)$$

W = ความกว้างของทางเข้าไซโคลน, m

แทนค่า Δt จากสมการที่ (4) ในสมการที่ (5) เพื่อแก้ค่า Δt จากนั้นกำหนดให้สมการที่ (5) = (2) เพื่อแก้ V_i แก้สมการเพื่อหาค่า d_p

$$d_p = \left[\frac{9\mu_g W}{\pi N_c V_G (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

d_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m

ค่า d_p ที่ได้จากสมการที่ (6) หมายถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ไซโคลนสามารถกำจัดได้ ดังนั้นฝุ่นหรืออนุภาคที่มีขนาดเท่ากับ d_p หรือ มากกว่าจะถูกไซโคลนกำจัดได้ 100 % ซึ่งต่อมา Lapple ได้ชี้ให้เห็นว่าข้อสรุปดังกล่าวเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากการทำงานจริงของไซโคลนจะมีปัจจัยหรือความไม่แน่นอนมากมายที่ทำให้การหมุนวนของอากาศไม่เป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ และได้เสนอดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงสมรรถนะของไซโคลนขึ้นใหม่เรียกว่า ขนาดตัด (Cut Size, d_{pc})

ขนาดตัด หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นที่สามารถถูกแยกออกจากอากาศภายในไซโคลนด้วยประสิทธิภาพการแยก 50 % โดยขนาดตัด สามารถหาได้จากสมการ

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu_g W}{2\pi N_c V_G (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

ต่อมา Theodore (1980) ได้นำเสนอรูปแบบของสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงขนาดของฝุ่นใด ๆ กับอัตราส่วน ดังสมการ

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pi}} \right)^2} \quad (8)$$

η_i = ประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนในการกำจัดฝุ่นในช่วงขนาดที่สนใจ, %

d_{pi} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของช่วงขนาดที่สนใจ, μm

ประสิทธิภาพรวมของอนุภาคที่ไซโคลนสามารถกักเก็บได้หาได้จาก

$$\eta_o = \sum \eta_i w_i \quad (9)$$

η_o = ประสิทธิภาพรวมในการกำจัดฝุ่นของไซโคลน, %

w_i = สัดส่วนมวลร้อยละของอนุภาคฝุ่นในช่วงขนาดที่สนใจ, %

ในการแบ่งช่วงของอนุภาคฝุ่นเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นจะสามารถทำได้เมื่อทราบลักษณะการกระจายขนาดของฝุ่น โดยจำนวนของช่วงที่แบ่งสามารถกำหนดให้มากหรือน้อยก็ได้ แต่การแบ่งหลายช่วงจะส่งผลให้การคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นมีความถูกต้องมากกว่า

อุณหภูมิของอากาศถือเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นของไซโคลน หากอุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้น ค่าความหนืดของอากาศจะมีค่าสูงขึ้น (ต่างจากของเหลว) ส่งผลให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของฝุ่นเข้าสู่ผนังของไซโคลน จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นลดลง โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศมีค่าสูงเกิน 1000 °F

1.3.3 การคำนวณค่าความดันสูญเสียหรือความดันลด (Pressure Drop) การออกแบบไซโคลนนอกจากจะคำนึงถึงประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นแล้ว ยังต้องคำนึงถึงค่าความดันสูญเสียด้วย สมการที่ใช้ประเมินค่าความดันสูญเสียของไซโคลนได้ถูกเสนอโดยนักวิจัยมากมายแต่สมการเหล่านี้มีความซับซ้อนมากในที่นี้จะกล่าวถึงสมการที่น่าเสนอโดย Lapple (1951)

$$H_v = K \left(\frac{HW}{D_c^2} \right) \quad (10)$$

H_v = ค่าความดันสูญเสียที่แสดงในเทอมของ จำนวนเฮคของความเร็ว

K = ค่าคงที่มีค่าเป็น 16 สำหรับไซโคลนที่มีทางเข้าปกติ และ 7.5 สำหรับทางเข้าที่ติดตั้งแผ่นบังค้ำบการไหล (Inlet Vane)

W = ความกว้างของทางเข้าของไซโคลน, m

H = ความสูงของทางเข้าของไซโคลน, m

D_c = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของไซโคลน, m

ค่าความดันสูญเสียที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหาความดันสูญเสียทั้งหมดของก๊าซหรืออากาศที่ผ่านไซโคลนโดยแทนค่าในสมการ

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g V_g^2 H_v \quad (11)$$

ΔP = ค่าความดันสูญเสียของก๊าซที่ผ่านไซโคลน, N/m^2 หรือ Pa

ค่าความดันสูญเสียสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ดังสมการ

$$W = Q_g \Delta P \quad (12)$$

Q_g = อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลน, m^3/s

W = พลังงานที่ใช้, Watt

เนื่องจากค่าความดันสูญเสียจะขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลนดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าอัตราเร็วของก๊าซหรืออากาศที่เหมาะสมคือ 20 – 70 ft/s (Theodore, 1998) โดยทั่วไปจะกำหนดให้ความเร็วของก๊าซมีค่าประมาณ 50-60 ft/s อย่างไรก็ตามค่าอัตราเร็วของก๊าซไม่ควรเกิน 100 – 120 ft/s เนื่องจากจะทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพของไซโคลนมีค่าลดลง

ในการออกแบบไซโคลนจะใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial-and -Error) โดยจะทำการสุ่มเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวไซโคลนจากนั้นทำการคำนวณหาขนาดตัดและหาประสิทธิภาพ หากประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นที่ได้มีค่าต่ำจะทำการสุ่มเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนใหม่ที่มีขนาดเล็กกว่าเดิมจนกระทั่งได้ประสิทธิภาพการคัดแยกฝุ่นตามต้องการ

2. อุปกรณ์กำจัดฝุ่นแบบเปียก หรือ เวทสครับเบอร์ (Wet Scrubbers)

อุปกรณ์กำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet Collectors) หรือ เวทสครับเบอร์ (Wet Scrubbers) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ของเหลวในการดักฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถจับก๊าซ

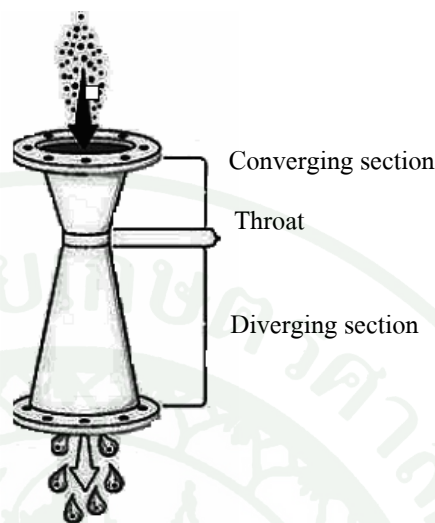
หรืออาจผสมพินจากกระแสดำหรืออากาศได้ในขณะเดียวกัน โดยการฉีดของเหลวเป็นละอองฝอยสู่กระแสดำ หรือให้กระแสดำไหลผ่านฟิล์มของของเหลวด้วยความเร็วสูง หรือไหลผ่านชั้นวัตถุที่มีของเหลวเคลือบที่ผิว เมื่อฝุ่นหรืออนุภาคเคลื่อนที่ใกล้ละอองหรือหยดน้ำจะสัมผัสกับละอองหยดน้ำด้วย กลไกหลัก 3 อย่าง คือ การกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย การสกัดกั้น และการแพร่ โดยทั่วไปการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยเป็นกลไกการจับฝุ่นที่สำคัญที่สุดของเวทสครับเบอร์ เมื่อกระแสดำมีความเร็วมากกว่า 0.3 m/s หยดน้ำที่จับฝุ่นไว้เหล่านี้จะแยกออกจากกระแสดำโดยแรงโน้มถ่วงหรือทำให้กระแทกแผ่นกั้น (Baffles) หรือโดยแรงเหวี่ยง

ระบบสครับเบอร์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ปัม พัดลม อุปกรณ์ป้อนสารเคมี ระบบท่อ และอุปกรณ์ในการตรวจวัด (Instrument) สำหรับสครับเบอร์ที่ใช้ในการจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$) นิยมติดตั้งอุปกรณ์หล่อเย็นก๊าซก่อนเข้าสู่สครับเบอร์และอุปกรณ์หล่อเย็นของเหลวเพื่อให้ควบแน่น สำหรับเครื่องดักละอองน้ำมีหลายชนิดได้แก่ ไชโคลน, Chevron, Mesh Pads และ Woven Pads

ชนิดของเวทสครับเบอร์ เวทสครับเบอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่

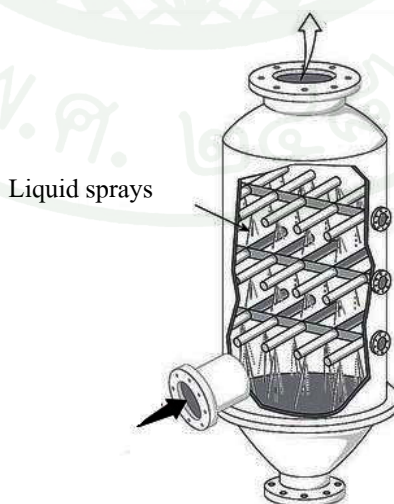
2.1.1 สครับเบอร์แบบใช้กระแสดำทำให้ของเหลวเป็นละอองฝอย (Gas – Atomized Scrubbers) เช่น เวนท์ริสครับเบอร์ (Venturi Scrubber) ซึ่งเป็นอุปกรณ์จับฝุ่นแบบเปียกที่นิยมใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงมากในการจับฝุ่นขนาดเล็ก โดยเฉพาะขนาดเล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$ และยังสามารถใช้ในการดูดซับก๊าซได้ ส่วนประกอบหลักของเวนท์ริสครับเบอร์ได้แก่ ส่วนคอด (Converging Section) ส่วนคอ (Throat) และส่วนขยาย (Diverging Section)

หลักการทำงานคือ กระแสดำจะเคลื่อนเข้าสู่เวนท์ริ และมีของเหลวพ่นตรงคอดหรือที่ตรงส่วนคอ ซึ่งเป็นบริเวณที่ก๊าซมีอัตราการไหลที่สูงที่สุด ความเร็วของก๊าซที่ส่วนคอจะมีค่าประมาณ 60-244 m/s ซึ่งจะทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองฝอย และมีความเร็ว อนุภาคจะถูกจับด้วยแรงกระทบเนื่องจากความเฉื่อยกับหยดน้ำ เนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ของหยดน้ำและอนุภาคในส่วนค้อมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการจับมีค่าสูงและมีค่าความดันสูญเสียที่สูงด้วย หลังจากก๊าซไหลเข้าสู่ส่วนขยายของเวนท์ริ ความเร็วของก๊าซจะลดลงเนื่องจากแรงหน่วง และไหลผ่านเครื่องดักละอองเช่น ไชโคลน เพื่อแยกฝุ่นหรือของเหลวออกจากกระแสดำก่อนระบายออกทางปล่องดังแสดงในภาพที่ 5

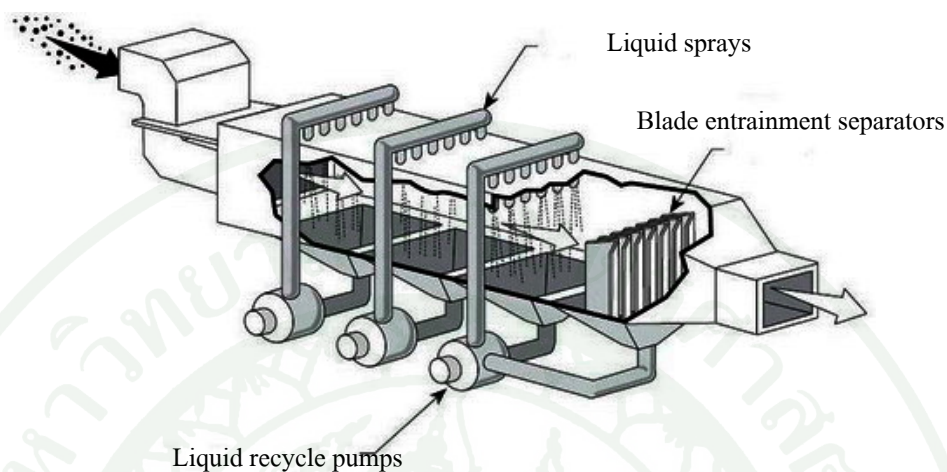


ภาพที่ 5 เวนทิวรีสครับเบอร์

2.1.2 สครับเบอร์แบบสเปรย์ (Spray Tower Scrubbers) เป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บฝุ่นอย่างง่ายพลังงานต่ำ มีรูปร่างทรงกระบอก บริเวณทางออกของก๊าซจะติดตั้งเครื่องดักละอองน้ำ (Demister) เพื่อกำจัดหยดน้ำที่เหลือและที่ถูกก๊าซลอยพัดขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือที่ราคาไม่แพง สามารถใช้กับก๊าซที่มีปริมาณฝุ่นมากได้โดยไม่มีการอุดตันเหมาะสำหรับการกำจัดฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า $8\ \mu\text{m}$ และยังสามารถกำจัดมลพิษที่เป็นก๊าซได้ในเวลาเดียวกัน สครับเบอร์แบบสเปรย์สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทได้แก่ สครับเบอร์แบบไหลสวนทาง (ภาพที่ 6) และสครับเบอร์แบบไหลตามขวาง (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 เวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทาง



ภาพที่ 7 เวทสกริปเบอร์แบบไหลตามขวาง

หลักการทำงาน กลไกหลักในการดักจับอนุภาคในอุปกรณ์เวทสกริปเบอร์ คือ กลไกการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย (Inertial impaction) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$K_p = C \frac{\rho_p d_{pi}^2 V_p}{9\mu_G D_d} = \frac{d_a^2 V_p}{9\mu_G D_d} \quad (13)$$

K_p = ค่าพารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อย

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค, g/cm^3

d_{pi} = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาค, cm

V_p = ความเร็วของอนุภาค, cm/s

μ_G = ความหนืดของก๊าซ, poise

D_d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหยดของเหลว, cm

d_a = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิกของอนุภาค, cm

C = Cunningham Correction Factor

จากค่าพารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อยสามารถหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของหยดของเหลว 1 หยดได้จาก

$$\eta_d = \left(\frac{K_p}{K_p + 0.7} \right)^2 \quad (14)$$

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของสกรับเบอร์จะใช้วิธีการคำนวณหาสัดส่วนของอนุภาคหรือฝุ่นที่ไม่สามารถถูกดักด้วยสกรับเบอร์ (P_i) ก่อน และเนื่องจากอนุภาคหรือฝุ่นที่ป้อนมาในกระแสดำชิมีหลากหลายขนาด ดังนั้นจึงต้องหาค่า P_i ที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคหรือฝุ่นได้ดังนี้

$$\eta_i = 1 - P_{ii} \quad (15)$$

η_i = สัดส่วนของประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคหรือฝุ่น ณ ขนาดที่พิจารณาของสกรับเบอร์

P_{ii} = สัดส่วนอนุภาค ณ ขนาดที่พิจารณาที่ไม่สามารถดักจับด้วยสกรับเบอร์

ดังนั้นประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของสกรับเบอร์จะเท่ากับ

$$\eta = \left(\sum (1 - P_{ii}) \times W_i \right) \times 100 \quad (16)$$

W_i = สัดส่วนมวลร้อยละของอนุภาคฝุ่นในช่วงขนาดที่สนใจ, %

2.2 การคำนวณออกแบบ ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของสกรับเบอร์ จะใช้วิธีการคำนวณหาสัดส่วนของอนุภาคที่สามารถทะลุผ่านออกไปจากสกรับเบอร์ (P_i) ก่อน และเนื่องจากอนุภาคที่ป้อนมาในกระแสดำชิมีหลากหลายขนาด ดังนั้นจึงต้องหาค่า P_i ที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค (P_{ii}) สมการที่ (17), (19), (20) ใช้ในการคำนวณหาค่า P_{ii} ของสกรับเบอร์แต่ละชนิด

2.3.1 เว้นทรีสกรับเบอร์ (Calvert, 1972)

$$P_{ii} = \exp \left\{ \frac{Q_L V_G \rho_L D_d}{55 Q_G \mu_G} \left[-0.7 - K_{pf} + 1.4 \ln \left(\frac{K_{pf} + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + K_{pf}} \right] \frac{1}{K_p} \right\} \quad (17)$$

โดยขนาดหยดของของเหลวสามารถหาได้จากสมการของ Nukiyama-Tanasawa (1983)

$$D_d = \frac{58600}{V_G} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \left(\frac{\mu_L}{(\sigma \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \left(1000 \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5} \quad (18)$$

P_u = สัดส่วนอนุภาคที่ไม่สามารถดักจับด้วยสกรับเบอร์

Q_L = อัตราการไหลของของเหลว, m^3/s

V_G = อัตราการไหลของก๊าซ, cm^3/s

ρ_L = ความหนาแน่นของของเหลว, g/cm^3

μ_G = ความหนืดของก๊าซ, poise

D_d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดของเหลว, μm

Q_G = อัตราการไหลของก๊าซ, m^3/s

K_p = พารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อย

f = ค่าคงที่ มีค่าเท่า 0.25 สำหรับอนุภาคที่ไม่รวมตัวกับน้ำ และ 0.5 สำหรับอนุภาคที่รวมตัวกับน้ำได้ดี

σ = ความตึงผิวของของเหลว, dyne/cm

μ_L = ความหนืดของของเหลว, poise

2.3.2 เวทสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง (Calvert, 1977)

$$P_u = \exp\left(\frac{-3Q_L Z V_{td} \eta_d}{4Q_{Grd}(V_{td} - V_G)}\right) \quad (19)$$

V_{td} = ความเร็วการตกของหยดน้ำ, cm/s

η_d = ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของหยดน้ำ 1 หยด

Z = ความสูงของระยะสัมผัส, cm

r_d = ขนาดความยาวรัศมีของหยดของของเหลว, cm

2.3.3 เวทสกรับเบอร์แบบไหลตามขวาง

$$P_u = \exp\left(\frac{-3Q_L Z \eta_d}{4Q_{Grd}}\right) \quad (20)$$

ได้มีการสร้างสมการต่างๆ สำหรับหาค่าความดันสูญเสียของสกรับเบอร์ชนิดต่างๆ Calvert *et al.* (1972) ได้พิจารณาว่าพลังงานทั้งหมดที่สูญเสียในกระแสก๊าซเพื่อใช้เร่งหยดน้ำให้มีความเร็วเท่ากับกระแสก๊าซ ซึ่งแสดงในสมการที่ (21) ซึ่งคิดเฉพาะค่าความดันสูญเสียที่เกิดเฉพาะ

บริเวณของคอกวนทิวรีเท่านั้น ไม่ได้คิดแรงเสียดทานที่ผนังของเวทสกรับเบอร์และโมเมนต์ของก๊าซกลับคืนในส่วนที่ขยาย

$$\Delta P = 1.0 \times 10^{-3} V_G^2 \frac{Q_L}{Q_G} \quad (21)$$

ΔP = ความดันสูญเสียที่เกิดในส่วนคอกของเวนทิวรี, cm.H₂O

V_G = ความเร็วของก๊าซในส่วนคอกของเวนทิวรี, cm/s

Q_L = อัตราการไหลของของเหลว, cm³/s

Q_G = อัตราการไหลของก๊าซ, cm³/s

เนื่องจากในสมการข้างต้นได้พิจารณาว่าหยดน้ำทั้งหมดถูกเร่งให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วของก๊าซในส่วนคอ และ โมเมนต์ของหยดน้ำไม่ได้เปลี่ยนเป็นความดันในส่วนที่ขยายน้ำ แต่ในความเป็นจริงความเร็วของหยดน้ำไม่อาจเท่าความเร็วของก๊าซได้เนื่องจากมี Residence Time ไม่เพียงพอ Yung *et al.* (1977) ได้พิจารณาประเด็นดังกล่าวและได้สมการสำหรับการหาความดันสูญเสียหรือความดันลดในเวนทิวรีสกรับเบอร์ดังนี้

$$\Delta P = 2\rho_L V_G^2 \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \left(1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right) \quad (22)$$

โดยที่

$$X = \frac{3l C_b \rho_G}{16 D_a \rho_L} \quad (23)$$

X = ความยาวส่วนคอที่ไม่มีหน่วยของเวนทิวรีสกรับเบอร์

D_a = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำ, cm

C_b = สัมประสิทธิ์แรงลาก

l = ความยาวของส่วนคอกของเวนทิวรี, cm

สมการนี้ได้มีการตรวจสอบกับผลการทดลองของ Boll โดยใช้สมการของ Nukiyama – Tanasawa คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำ (Sauter Mean) พบว่าค่าที่คำนวณได้ สอดคล้องกับผลการทดลอง (Yung *et al.*, 1977)

3. เวทสหรับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซและไอ

3.1 ทฤษฎีการดูดซึม(Absorption) การดูดซึมเป็นวิธีการที่แพร่หลายสำหรับการบำบัด ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต การดูดซึมด้วยของเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อก๊าซในของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลทางเคมีหรือการละลายที่อิ่มตัว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นขณะสมดุลทำให้เกิดการขับเคลื่อนของการดูดซึม อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับค่าของสารที่ถูกดูดซึม (ของเหลวหรือสารละลาย) การละลาย หรือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี และยังขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของระบบก๊าซและของเหลว (เช่น การแพร่ ความหนืด ความหนาแน่น) และสถานะของระบบดูดซึม (เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซและของเหลว) การดูดซึมจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำลง พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของของเหลวต่อก๊าซมีค่าสูงขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซในไอเสียมี่ค่าความเข้มข้นมากขึ้น ระบบการดูดซึมแบ่งออกเป็นสองแบบดังนี้

3.1.1 ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Systems) ในระบบนี้ก๊าซที่ต้องการกำจัดจะต้องมีความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) โดยใช้ปริมาณน้ำที่พอเพียงพอกับก๊าซมลพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต สำหรับก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะต้องใช้น้ำในการบำบัดปริมาณมากจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้น้ำในการบำบัด ก๊าซที่เหมาะสมสำหรับการใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เช่น ก๊าซไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) และไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric) เป็นต้น และยังใช้น้ำที่มีค่าความเป็นด่างสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติเป็นกรดสูงขึ้น ในบางครั้งจึงมีการใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีค่าพีเอชสูง หรือเติมสารเคมีที่มีค่าความเป็นด่างลงในน้ำเพื่อเพิ่มพีเอชของน้ำให้สูงขึ้น เช่นการเติมโซดาไฟ หรือปูนขาว เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนที่มีความสามารถในการละลายน้ำดีเท่านั้น

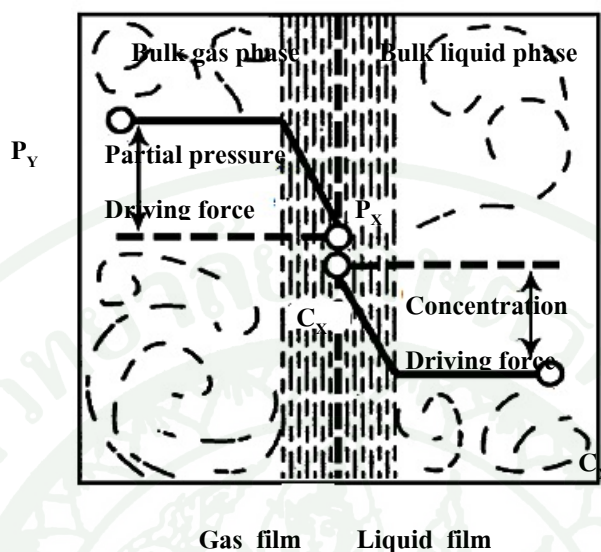
3.1.2 ระบบที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Nonaqueous Systems) ในระบบนี้จะใช้ของเหลวเป็นสารเคมี เช่น ไดเมทิลอนาลีน (Dimethylaniline) และ เอมีน(Amines) เป็นตัวทำละลายแทนน้ำ ข้อจำกัดของการใช้สารละลายชนิดนี้คืออาจจะใช้ได้เฉพาะกับกระแสอากาศที่มีสาร

ปนเปื้อนชนิดที่เป็นก๊าซหรือไอเท่านั้น เพราะหากว่ามีอนุภาคหรือฝุ่นเจือปน อาจเกิดการรวมตัวระหว่างตัวทำละลายดังกล่าวกับอนุภาคหรือฝุ่นกลายเป็นกากตะกอนซึ่งยากต่อการกำจัดในภายหลัง สารละลายอินทรีย์เหล่านี้เหมาะสำหรับการใช้บำบัดไอของสารอินทรีย์ เพราะไอของสารอินทรีย์จะละลายและผสมกันได้ดีกับสารละลายเหล่านี้ และเมื่อต้องการนำไอของสารอินทรีย์เหล่านี้มาใช้ใหม่ก็สามารถสกัดออกมาได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าตัวดูดซึมมีความสำคัญมากในกระบวนการดูดซึม ดังนั้นการเลือกจึงมีหลักในการเลือกสารที่จะนำมาเป็นตัวดูดซึมหรือตัวทำละลายดังนี้

1. เลือกสารที่ก๊าซหรือไอที่ต้องการดูดซึมละลายได้ดีในตัวทำละลายนั้น
2. ตัวทำละลายที่เลือกควรมีอัตราการระเหยที่ต่ำ เพื่อลดการสูญเสียตัวทำละลาย
3. ตัวทำละลายไม่ควรเป็นสารที่มีความสามารถในการกัดกร่อน
4. ตัวทำละลายควรมีราคาไม่แพงและหาง่าย
5. ตัวทำละลายควรมีความหนืดต่ำเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมและลดการเกิดการไหลท่วม (flooding)
6. ตัวทำละลายควรเป็นสารที่ไม่มีพิษไม่ติดไฟไม่ทำปฏิกิริยาเคมีและมีจุดเยือกแข็งต่ำ

แบบจำลองที่ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการอธิบายกระบวนการดูดซึม คือแบบจำลองทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two-Film-Theory) เป็นแบบจำลองที่แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของมวลจากชั้นที่เป็นก๊าซหรืออากาศผ่านชั้นที่เป็นรอยต่อระหว่างก๊าซและของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 8 (Perry, 1973)



ภาพที่ 8 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two-Film-Theory)

ที่มา: Perry (1973)

โดยอัตราการเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อนจะเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนย้ายในชั้นอากาศ (หรือของเหลว) คูณกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษในชั้นอากาศ (หรือของเหลว)

$$R_Y = K_Y(P_Y - P_X) \quad (24)$$

$$R_Y = K_X(C_Y - C_X) \quad (25)$$

โดยที่

R_Y = อัตราการเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อนในอากาศ, $\text{kmol/hr-m}^2\text{-Pa}$

K_Y = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อนในชั้นบางๆ ในอากาศ, $\text{kmol/hr-m}^2\text{-Pa}$

K_X = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อนในชั้นบางๆ ของของเหลว, $\text{kmol/hr-m}^2\text{-Pa}$

P_Y = ค่าความดันย่อยของสารปนเปื้อนในชั้นอากาศ, Pa

P_X = ค่าความดันย่อยของสารปนเปื้อนในชั้นของเหลว, Pa

C_Y = ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในชั้นอากาศ, kmol/l

C_X = ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในชั้นของชั้นบางๆ ของชั้นของเหลว, kmol/l

ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารปนเปื้อน จะแสดงถึงค่าความต้านทานการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนหรือตัวถูกละลายผ่านชั้นบางๆของของเหลวและอากาศ สมการทั้งสองนี้มีความแตกต่างในการใช้งาน และเนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นของสารในตำแหน่งชั้นบางๆของของเหลวและอากาศ ได้ จึงได้มีการอธิบายการเคลื่อนที่ที่สภาวะสมดุล และมีการรวมค่าความต้านทานของทั้งสองชั้นบางๆเข้าด้วยกัน ซึ่งถ้าเส้นสมดุลเป็นเส้นตรง อัตราการดูดซึมจะเป็นดังนี้

$$R_Y = K_{OY}(P_Y - P_{Xeq}) \quad (26)$$

$$R_Y = K_{OX}(C_{Yeq} - C_X) \quad (27)$$

K_{OY} = สัมประสิทธิ์พื้นฐานของการเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในอากาศ, $\text{kmol/hr-m}^2\text{-Pa}$

K_{OX} = สัมประสิทธิ์พื้นฐานของการเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในของเหลว, $\text{kmol/hr-m}^2\text{-Pa}$

C_{Yeq} = ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ณ สภาวะสมดุล, kmol/l

P_{Xeq} = ค่าความดันย่อยของสารปนเปื้อน ณ สภาวะสมดุล, Pa

ที่สภาวะสมดุล ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในอากาศและในของเหลวมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารในชั้นบางๆ ของอากาศและในชั้นบางๆของของเหลวดังนี้

$$\frac{1}{K_{OY}} = \frac{1}{K_Y} + \frac{H}{K_X} \quad (28)$$

$$\frac{1}{K_{OX}} = \frac{1}{K_X} + \frac{1}{HK_X} \quad (29)$$

โดยที่ H คือ ค่าคงที่สมดุลตามกฎของเฮนรี (Henry's Law) คือค่าความชันของเส้นกราฟ ณ สภาวะสมดุล จากสมการถ้าค่า H มีค่าน้อยมาก หมายถึงก๊าซละลาย หรือสารปนเปื้อนสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลาย ดังนั้น $K_{OY} \sim K_Y$ และการละลายจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการที่เกิดขึ้นในชั้นบางๆในส่วนของอากาศ ในทางตรงข้ามถ้าค่า H มีค่ามากจะมีผลทำให้ $K_{OX} \sim K_X$ คือ อัตราการละลายจะถูกควบคุมด้วยชั้นบางๆส่วนที่เป็นของเหลว และกระบวนการที่เกิดขึ้นใน

ของเหลว ส่วนใหญ่ระบบการควบคุมมลพิษอากาศจะอาศัยกระบวนการควบคุมในส่วนที่เป็นชั้นบางๆอากาศเนื่องจากกระบวนการดูดซึมนั้นจะถูกเลือกใช้ก็ต่อเมื่อก๊าซมลพิษหรือสารปนเปื้อนนั้นมีความสามารถในการละลายที่สูงในของเหลวนั้น โดยสมมุติว่าเกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Completely Mixed) ทั้งในส่วนอากาศและส่วนของสารละลายโดยทฤษฎีนี้แสดงให้เห็นว่าในระบบจะมีค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนทะลุผ่านชั้นบางๆของทั้งส่วนอากาศและส่วนของของเหลว

ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารที่ใช้สัญลักษณ์ K_{xa} , K_{xa} เมื่อค่า a แทนพื้นที่ผิวในการดูดซึมต่อปริมาตรของหอดูดซึม โดยหลักการนี้สามารถนำไปหาปริมาตรของหอดูดซึมที่ต้องการได้ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลหาได้จากการทดลองซึ่งนิยมเขียนอยู่ในรูปกราฟการทดลองการละลายของสารปนเปื้อนในอากาศในของเหลว ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นในอากาศและในของเหลว ณ สภาวะสมดุล หรือเขียนเป็นสมการที่ขึ้นกับค่าไม่มีหน่วย เช่น Reynold Number Schemit Number

แม้ว่าทฤษฎีการดูดซึมจะก้าวหน้าไปมากแต่ในบางส่วนยังต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองมาใช้ในการออกแบบ โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์จากการเคลื่อนย้ายมวล

3.2 เวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซและไอและการคำนวณออกแบบ เวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดมลพิษชนิดก๊าซและไอบ่งออกเป็นหลายชนิดได้แก่

3.2.1 สครับเบอร์แบบสเปรย์ (Spray Absorbers) เวทสครับเบอร์แบบสเปรย์นิยมใช้ในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกจากหม้อไอน้ำ เนื่องจากมีค่าความดันสูญเสียที่ต่ำและสามารถใช้ได้กับก๊าซไอเสียที่มีอนุภาคเจือปน ระยะเวลาที่ของเหลวสัมผัสกับก๊าซในสครับเบอร์จะน้อยมากประมาณ 1- 10 s ดังนั้นบางครั้งจึงมีการเติมสารเคมีลงในของเหลวเพื่อช่วยเพิ่มอัตราในการดูดซึม สครับเบอร์แบบสเปรย์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ สครับเบอร์แบบไหลสวนทางและสครับเบอร์แบบไหลตามขวางซึ่งมีรูปร่างและลักษณะของอุปกรณ์เช่นเดียวกันกับเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น

การคำนวณออกแบบอุปกรณ์เวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซและไอบแบบไหลสวนทางมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (Thakore and Bhatt, 2009)

1) คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม โดยกำหนดให้อัตราเร็วของก๊าซสูงสุดที่ไหลผ่านเวทสครับเบอร์ต้องมีค่าไม่เกิน 2.3 m/s เพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดออกไปของละอองของเหลวกับก๊าซที่ออกจากหอดูดซึมจากนั้นคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากสมการ

$$D = \sqrt{\frac{4Q_G}{\pi V_G}} \quad (30)$$

2) คำนวณหาจำนวนของ Transfer units ในส่วนของก๊าซ

$$N_{OG} = \frac{Y_b - Y_t}{Y_t} \quad (31)$$

3) คำนวณหาปริมาตรของหอดูดซึม

$$V = \frac{N_{OG} - G_{mol}}{K_y a} \quad (32)$$

V = ปริมาตรของหอดูดซึม

G_{mol} = อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไอเสีย, kmol/s

$K_y a$ = สัมประสิทธิ์พื้นฐานของการเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในส่วนก๊าซ, kmol/s-m³-Y_b

ขั้นตอนในการออกแบบอุปกรณ์เวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซและไอน้ำแบบไหลตามขวาง ได้แก่

1) คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม โดยกำหนดให้อัตราเร็วของก๊าซและไอน้ำที่ไหลผ่านสครับเบอร์ต้องมีค่าไม่เกิน 7 m/s เพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดออกไปของละอองของเหลวกับก๊าซที่ออกจากหอดูดซึมจากนั้นคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากสมการ

$$D = \sqrt{\frac{4Q_G}{\pi V_G}} \quad (33)$$

2) คำนวณหาจำนวนของ Transfer units ในส่วนของก๊าซ

$$N_{OG} = \ln \frac{Y_b}{Y_t} \quad (34)$$

3) คำนวณหาปริมาตรของหอดูดซึม

$$V = \frac{N_{OG} - G_{mol}}{K_{ya}} \quad (35)$$

เนื่องจากค่า K_{ya} มักเป็นค่าที่ได้จากการทดลองดังนั้นในการออกแบบสครับเบอร์ในการกำจัดก๊าซทั้งสองชนิด การใช้วิธีการคำนวณโดยการจำลองข้อมูลจากอุปกรณ์ที่เดินระบบอยู่จริง และมีช่วงความเข้มข้นของมลพิษเดียวกันเพื่อคำนวณค่า K_{ya} จึงเป็นวิธีการที่สะดวกและง่ายที่สุด

3.2.2 เวนทูรีสครับเบอร์ (Venturi Scrubber) เวนทูรีสครับเบอร์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซมลพิษสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์แชมเบอร์ทั้งสองชนิดข้างต้น แต่มีค่าความดันสูญเสียที่สูงกว่าทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบมากกว่า ในเวนทูรีสครับเบอร์ก๊าซของเหลวจะมีการไหลในทิศทางเดียวกัน สัดส่วนในการดูดซึมก๊าซมลพิษโดยของเหลวสามารถคำนวณได้จากสมการ (Thakore and Bhatt, 2009)

$$E_r = \frac{Y_b - Y_t}{Y_b} = \frac{Mef \left(\frac{1 - mX_t}{Y_t} \right)}{\left(1 + \frac{mG}{L} \right)} \quad (36)$$

Mef คือประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายมวลของสารสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Mef = 1 - e^{-N_{OG}} \quad (37)$$

โดย N_{OG} คือ จำนวนของ Transfer units ในส่วนของก๊าซสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_{OG} = \frac{K_y a R T \theta_c}{p_i} \quad (38)$$

$K_y a$ = สัมประสิทธิ์พื้นฐานของการเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในส่วนก๊าซ, $\text{kmol/s} \cdot \text{m}^3 \cdot Y_b$

R = ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ $8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot ^\circ\text{K}$

T = อุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบ, $^\circ\text{K}$

θ_c = ระยะเวลาที่ก๊าซสัมผัสกับของเหลว, s

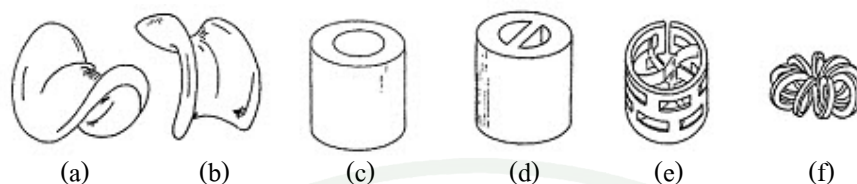
p_i = ความดันในระบบ, Pa

จำนวนของ Transfer units ในส่วนของก๊าซสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (33) ในเวนทูรีสกรีนเบอร์จะกำหนดให้มีค่าประมาณ 1-2

สัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซในเวนทูรีสกรีนเบอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.7\text{-}2.7 \text{ l/m}^3$ อัตราเร็วของก๊าซในส่วนคอมมีค่าอยู่ในช่วง $60\text{--}150 \text{ m/s}$

3.2.3 Packed Bed Column เป็นระบบการดูดซึมพื้นฐานที่นำมาใช้สำหรับการดูดซึมก๊าซ โดยจะมีการฉีดสเปรย์ของเหลวจากด้านบนเหนือชั้นของตัวกลาง (Packing Materials) ซึ่งทำหน้าที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสำหรับให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องกระแสอากาศปนเปื้อนจะเข้ามาทางส่วนล่างของคอลัมน์ และไหลขึ้นผ่านชั้นตัวกลาง ส่วนของเหลวที่เป็นสารดูดซึมจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของชั้นตัวกลาง และไหลลงสู่ด้านล่าง ในทางทฤษฎีวิธีนี้จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดถ้าสามารถที่จะกระจายสารดูดซึมให้ทั่วหอดูดกลืนให้มากที่สุดเพื่อให้กระแสอากาศนั้นสัมผัสกับของเหลวที่เป็นตัวดูดซึมให้มากที่สุด นอกจากนี้ยังต้องใช้คอลัมน์ที่มีความสูงที่เพียงพอ

ตัวกลางในหอดูดซึม (Packing Materials) เป็นหัวใจสำคัญของระบบดูดซึมเพราะทำให้เกิดพื้นที่ในการสัมผัสระหว่างสารปนเปื้อนและตัวละลาย ภาพที่ 9 แสดงถึงตัวกลางแบบต่างๆของหอดูดกลืน วัสดุที่นำมาใช้ในการทำตัวกลางแต่เดิมจะทำมาจากเซรามิกแต่ปัจจุบันมักทำมาจากพลาสติกที่ทนความร้อนที่มีความหนาแน่นสูงจำพวกโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ตัวกลางที่มีลักษณะเฉพาะจะมีการระบุชื่อและขนาดไว้ เช่น ตัวกลางชนิด Raschig ขนาด 50 mm โดยทั่วไปตัวกลางมักจะมีขนาดตั้งแต่ $6.5\text{-}100 \text{ mm}$ หรือ $0.24\text{-}4 \text{ in}$



a) Berl Saddle; (b) Intalox Saddle; (c) Rachig ring; (d) Lessing ring; (e) Pall ring; (f) Tellerette

ภาพที่ 9 แสดงชนิดของตัวกลาง

การคำนวณออกแบบ Packed Bed Column มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) หาอัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศเสีย โดยการทำสมดุลมวลของอากาศเสียและของเหลวที่เข้าและออกจากหอดูดซึม

$$LX_i + GY_b = LX_b + GY_i \quad (39)$$

L = อัตราการไหลของของเหลว, kmol/hr

G = อัตราการไหลของอากาศเสีย, kmol/hr

X = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในของเหลวที่ใช้ดูดซึม

Y = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในอากาศเสีย

X_i = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในของเหลวที่ใช้ดูดซึมที่เข้าสู่คอลัมน์

X_b = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในของเหลวที่ใช้ดูดซึมที่ออกจากคอลัมน์

Y_i = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในอากาศเสียที่ออกจากคอลัมน์

Y_b = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในอากาศเสียที่เข้าสู่คอลัมน์

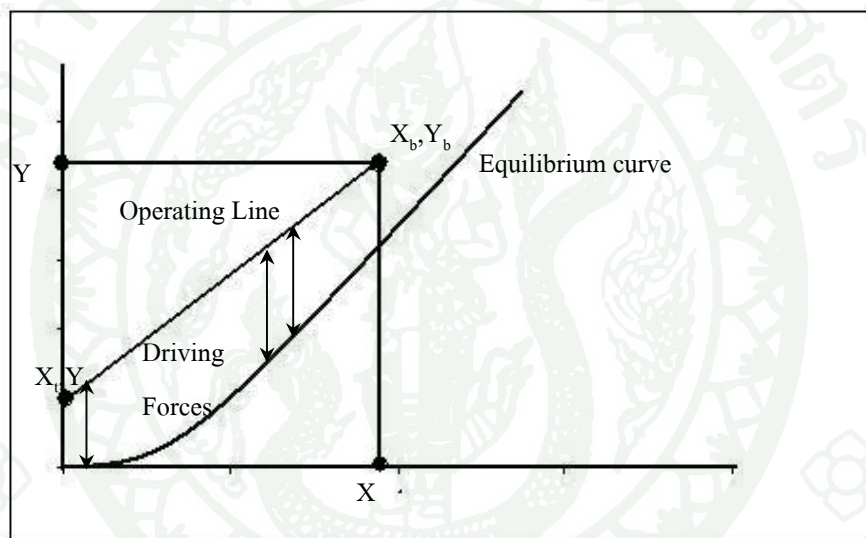
แก้สมการเพื่อหาอัตราการไหลของของเหลวต่ออากาศเสียจะได้สมการที่ (40)

$$(L/G)_{mn} = \frac{\left(\frac{Y_i}{1-Y_i} - \frac{Y_b}{1-Y_b} \right)}{\frac{X_i}{1-X_i} - \frac{X_b^*}{1-X_b^*}} \quad (40)$$

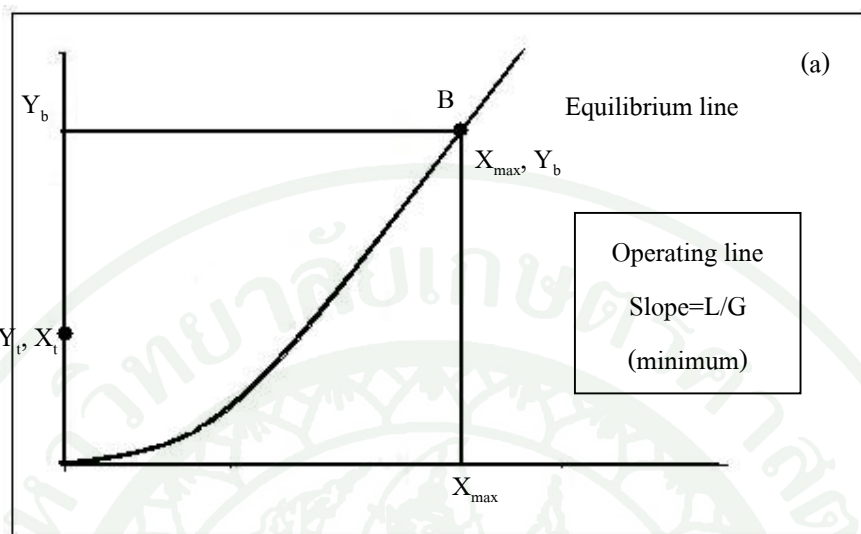
$(L/G)_{\min}$ = อัตราการไหลของของเหลวต่ออากาศเสียต่ำสุดที่ต้องการในการเดินระบบ

X_b^* = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในของเหลวที่ใช้ดูดซึมที่ออกจากคอลัมน์ ณ สภาวะสมดุล

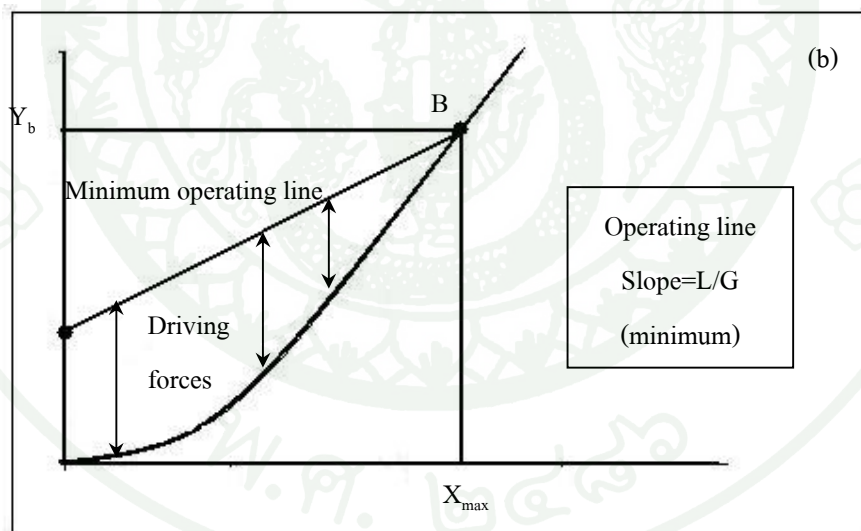
สมการที่ (35) เป็นสมการเส้นตรงเมื่อนำสมการคำนวณแล้วพล็อตบนผังสมดุล (Equilibrium Diagram) จะแสดงถึงสภาพการทำงานในหอดูดซึม ภาพที่ 10 แสดงถึงผังสมดุลและเส้นกราฟการทำงานของระบบ ความชันของเส้นตรงนี้คือ อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้ดูดซึมต่ออัตราการไหลของอากาศเสีย (Liquid-to-Gas-Ratio) หรือ L/G



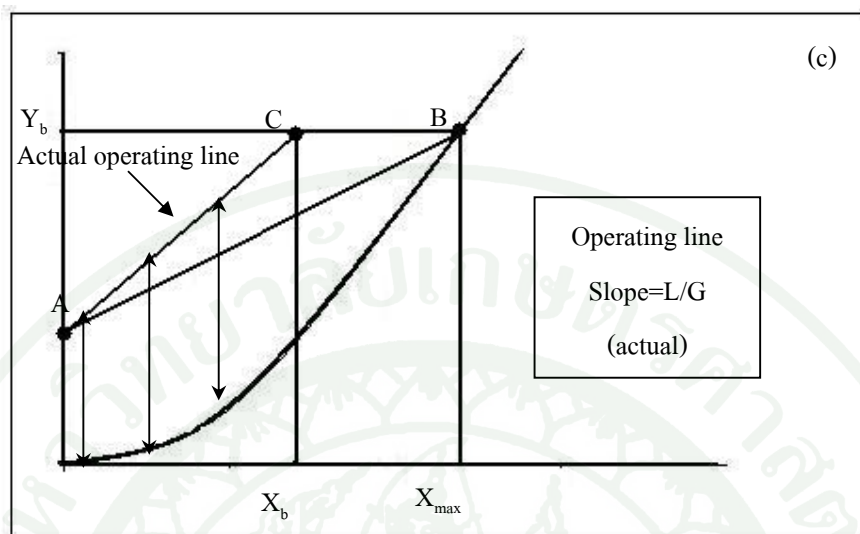
ภาพที่ 10 กราฟแสดงเส้นการปฏิบัติการในหอดูดซึม



ภาพที่ 11 กราฟแสดงการกำหนดอัตราไหลของของเหลว



ภาพที่ 11 (ต่อ)



ภาพที่ 11 (ต่อ)

2) หาปริมาณของเหลวที่ต้องการในระบบ ในการออกแบบหอดูดซึมโดยส่วนมากจะใช้อัตราการไหลของอากาศเสียที่ต้องการบำบัดและความเข้มข้นของสารมลพิษที่จะเข้าสู่ระบบ (Y_b) เป็นตัวกำหนดสภาพการทำงาน เมื่อเราทราบความเข้มข้นต่ำสุดที่มาตรฐานสามารถยอมให้ระบายออกมาได้ (Y) และความเข้มข้นของมลพิษในสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม (X) หรือสันนิษฐานให้เท่ากับศูนย์ถ้าสารละลายนั้นไม่ใช่สารละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากการนำข้อมูลนี้ไปเทียบกับเส้นกราฟของสมดุลมวลทำให้เราสามารถประมาณอัตราไหลต่ำสุดของสารละลายที่ใช้เป็นตัวดูดซึมที่ต้องการเพื่อเคลื่อนย้ายมลพิษจากอากาศเสียไปอยู่ในสารละลายจนกระทั่งสารมลพิษในอากาศเสียมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ภาพที่ 10 แสดงเส้นสมดุลสำหรับหอดูดซึมแบบไหลสวนทาง ภาพที่ 11 (a) เป็นเส้นสมดุลสำหรับหอดูดซึมแบบไหลสวนทาง เมื่อใช้อัตราการไหลของของเหลวหรือสารละลายดูดกลืนที่น้อยที่สุด ความเข้มข้นของมลพิษในอากาศเสียที่เข้าสู่ระบบ (Y_b) ต้องสมดุลกับความเข้มข้นของสารมลพิษในสารละลายที่ใช้ดูดซึม ($X_{\max}$) ของเหลวที่ออกจากระบบจะอิ่มตัวและไม่สามารถละลายสารมลพิษได้อีก นอกจากต้องเพิ่มของเหลวเข้าไปในระบบ ซึ่งอธิบายได้ด้วยจุด B บนเส้นสมดุล

ความชันของเส้นที่ลากระหว่างจุด A และ B แสดงถึงอัตราการไหลต่ำสุด แสดงถึงอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดดังในรูปที่ 11 (b) แรงขับเคลื่อนการละลายจะลดลงเป็นศูนย์ที่จุด B ความชันของเส้น AB มีค่าเท่ากับ $(L/G)_{\min}$

สำหรับการใช้งานจริง ไม่นิยมใช้ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่ออากาศเสียที่ต่ำที่สุด $(L/G)_{\min}$ โดยทั่วไปนิยมเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวอีก 25- 100 % จากที่ค่าที่ต้องการต่ำสุด

3) การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ในการออกแบบขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ดูดซึมควรออกแบบให้มีขนาดเล็ก ทั้งนี้เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุด แต่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ ความเร็วของอากาศซึ่งมีทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์จะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่ของเหลวถูกกระแสนอากาศดัน ไหลย้อนขึ้นทางด้านบนของคอลัมน์ เรียกความเร็วของอากาศ ณ จุดนี้ว่า ความเร็วย้อนกลับ (Flooding Velocity) ซึ่งทำให้ระบบไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นในการออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์นิยมความเร็วของอากาศในคอลัมน์ที่มีค่าเพียงพอต่อการป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนของของเหลวในคอลัมน์ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ค่าความเร็วที่ 50-75 % ของ ความเร็วย้อนกลับ

ความเร็วย้อนกลับ ขึ้นกับอัตราการไหลของของเหลวต่ออากาศ ความหนืดของของเหลว คุณสมบัติของตัวกลาง

ในการหาความเร็วย้อนกลับนิยมใช้กราฟ U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งแสดงค่าความดันสูญเสียของคอลัมน์ต่อหน่วยความสูงของชั้นตัวกลางกับสัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่ออากาศ โดยมีวิธีการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ได้ ดังนี้

หาค่าในแนวแกน X จากสมการ

$$\frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x - \rho_y}} \quad (41)$$

G_x = อัตราไหลโดยมวลของของเหลวต่อพื้นที่ของคอลัมน์, lb/s-ft²

G_y = อัตราไหลโดยมวลของอากาศเสีย, lb/s-ft²

ρ_y = ความหนาแน่นของอากาศเสีย, lb/ft³

ρ_x = ความหนาแน่นของของเหลว, lb/ft³

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 32.17 ft/s²

$$G_{Yf} = \left[\frac{g_{Y_{axis}} \rho_Y [(\rho_X - \rho_Y)]}{F(\mu_X)^{0.1}} \right]^{0.5} \quad (42)$$

G_{Yf} = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเสียต่อพื้นที่ของคอลัมน์, lb/ft²-s

μ_X = ความหนืดของของเหลว, cp

F = Packing Factor, ft⁻¹

หาอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่ของอากาศที่แท้จริงจากสมการ

$$G_{act} = R_G G_{Yf} \quad (43)$$

G_{act} = อัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่ของอากาศที่แท้จริง, lb/ft²-s

R_G = มีค่า 0.5-0.75

พื้นที่หน้าตัดขวางและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์หาได้จาก

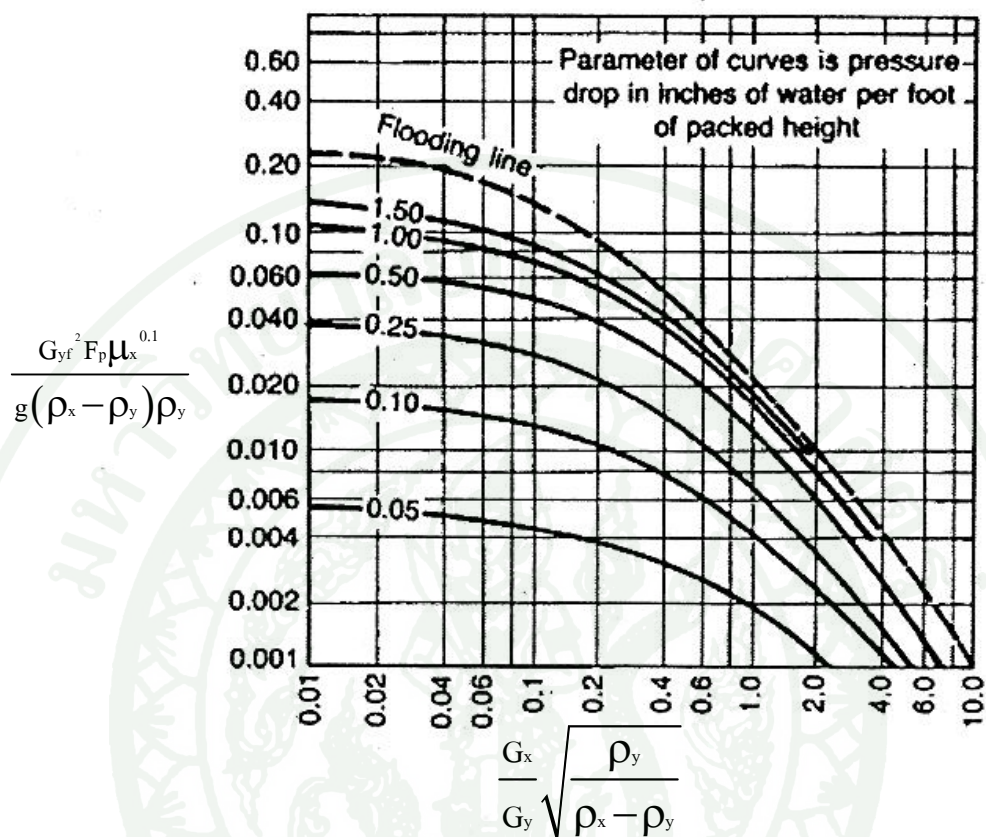
$$A = \left[\frac{G_{mass}}{(G_{act})} \right] \quad (44)$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (45)$$

A = พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์, ft²

d = -ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์, ft

G_{mass} = อัตราไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์, lb/s



ภาพที่ 12 ไดอะแกรมเพื่อใช้ในการประมาณค่าความดันความดันสูญเสีย (U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation Diagram)

ที่มา : Cooper and Alley (1984)

4) การหาขนาดความสูงของคอลัมน์ ความสูงในที่นี้หมายถึงความสูงของชั้นตัวกลางที่เป็นที่ยึดเกาะของของเหลว ทฤษฎีที่ใช้ในการหาความสูงของตัวกลางมีหลายทฤษฎี โดยส่วนใหญ่มีสมมุติฐานเกี่ยวกับการแพร่กระจายของสารมลพิษเข้าไปในตัวกลางนั้นขึ้นอยู่กับเฟสใดเป็นตัวควบคุม สมการในการหาความสูงของคอลัมน์ที่ได้จากการสมมูลมวลโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ (Derivation of Equation) คือ

$$Z = \frac{G_y}{K_y a P_{Y_2}} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{(1-Y)(1-Y^*)} \quad (46)$$

Z = ความสูงของตัวกลาง, m

a = พื้นที่ผิวสัมผัส, m^2

P = ความดันในระบบ, kPa

จากสมการ $\frac{G_y}{K_y a P}$ จะมีหน่วยเป็นความสูงเรียกว่า Height of transfer unit หรือความสูงของคู่ของสารคู่ผสมจะต้องไปให้ถึงสมดุล 1 ครั้ง ส่วนเทอมที่อยู่ในเครื่องหมายอินทิกรัลนั้นไม่มีหน่วย หมายถึงจำนวนของ Transfer units หรือจำนวนครั้งของการเกิดสถานะสมดุลที่ต้องการ รูปแบบของสมการในการหาความสูงของคอลัมน์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z = HTU \times NTU \quad (47)$$

HTU = ความสูงของ Transfer unit

NTU = จำนวนของ Transfer units

จำนวนและความสูงของ Transfer unit จะใช้ได้ทั้งในสภาพก๊าซและของเหลวโดยสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้เป็น $Z = N_{OG} H_{OG} = N_{OL} H_{OL}$

N_{OG} = จำนวนของ Transfer units เมื่อพิจารณาในส่วนของก๊าซ

H_{OG} = ความสูงของ Transfer unit เมื่อพิจารณาในส่วนของก๊าซ, m

N_{OL} = จำนวนของ Transfer units เมื่อพิจารณาในส่วนของของเหลว

H_{OL} = ความสูงของ Transfer unit เมื่อพิจารณาในส่วนของของเหลว, m

HTU หาได้จากการทดลอง หรือสามารถทำนายได้จากสมการซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ สัมประสิทธิ์การแพร่ และลักษณะตัวกลางที่ใช้ เช่น สมการของ Sherwood and Holloway หรือสมการของ Onda ในปัจจุบันผู้ขายตัวกลางที่ใช้บรรจุในคอลัมน์จะมีข้อมูลของค่า HTU สำหรับคู่ของสารละลายคู่ผสมกับก๊าซที่ต้องการบำบัด นอกจากนี้ยังมีข้อมูลอัตราการไหลของก๊าซต่อหน่วยพื้นที่ ($kg/hr \cdot m^2$) ที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของของเหลว (Flooding) ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างข้อมูล HTU ของตัวกลางประเภทพลาสติก

ตารางที่ 2 HTU (Height of Transfer Unit) สำหรับตัวกลางประเภทพลาสติก

มลพิษ-สารละลายที่ใช้ดูดซึม	HTU, m	HTU, ft
HCL-H ₂ O	0.18-0.34	0.6-1.1
HCL-NaOH	0.15-0.21	0.5-0.7
Cl ₂ -NaOH	0.24-0.37	0.8-1.2
NH ₃ -H ₂ SO ₄	0.09-0.16	0.3-0.5
NH ₃ -H ₂ O	0.09-0.21	0.3-0.7
SO ₂ -NaOH	0.21-0.61	0.7-2.0
HF-H ₂ O	0.12-0.21	0.4-0.7
CH ₃ COOH-H ₂ O	0.24-0.39	0.8-1.3
H ₂ S-NaOH	0.24-0.48	0.8-1.6

ที่มา : Buonicore and Davis (1992)

นอกจากนี้ยังมีวิธีการคำนวณหา HTU ของ Packed Bed Column ที่มีการจัดเรียงตัวกลางแบบสลับอย่างง่ายโดยใช้ค่าคงที่ (Factor) ของตัวกลางซึ่งจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับ ชนิด ขนาด และวัสดุที่ใช้ทำ โดยมีสมการและขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้ (EPA, 2002)

$$HTU = H_{OG} + \frac{1}{A} H_{OL} \quad (48)$$

$$H_{OG} = \left[\alpha \frac{(fG_{flux})^\beta}{(L_{flux})^\gamma} \right] \sqrt{\frac{\mu_y}{\rho_y D_y}} \quad (49)$$

$$H_{OL} = \phi \left(\frac{L_{flux}}{\mu_x} \right)^b \sqrt{\frac{\mu_x}{\rho_x D_x}} \quad (50)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \phi, b$ = ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของตัวกลาง

f = คี้อค่า Flooding Factor มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6-0.7

G_{flux} = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเสียต่อพื้นที่ของคอลัมน์, lb/ft²-hr

L_{flux} = อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวเสียต่อพื้นที่ของคอลัมน์, lb/ft²-hr

μ_y = ความหนืดของอากาศเสีย, lb/ft-s

ρ_y = ความหนาแน่นของอากาศเสีย, lb/ft³

D_y = ค่าการแพร่กระจายของสารมลพิษในอากาศ, ft²/s

D_x = ค่าการแพร่กระจายของสารมลพิษในของเหลว, ft²/s

μ_x = ความหนืดของของเหลว, lb/ft-s

ρ_x = ความหนาแน่นของอากาศเสีย, lb/ft³

สำหรับค่า NTU สามารถคำนวณได้โดยวิธีต่างๆ ในกรณีที่ไอสารมลพิษมีความเข้มข้นต่ำ และเส้นกราฟสมดุลเป็นเส้นตรง สามารถหา NTU ได้จากสมการ (Theodore, 2008)

$$NTU = \frac{\ln \left[\frac{\left(\frac{Y_b}{1-Y_b} \right) - m \left(\frac{X_t}{1-X_t} \right)}{\left(\frac{Y_t}{1-Y_t} \right) - m \left(\frac{X_t}{1-X_t} \right)} \times \left(1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{1 - \frac{1}{A}} \quad (51)$$

m = ความชันของเส้นสมดุลระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษในส่วนของอากาศและส่วนของของเหลว

G = อัตราการไหลของอากาศเสีย, kmol/s

L = อัตราการไหลของของเหลวหรือสารละลายที่ใช้ดูดซึม, kmol/s

Y_b = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในอากาศที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์

Y_t = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในอากาศที่ไหลออกจากคอลัมน์

X_t = สัดส่วนโมลของสารมลพิษในของเหลวที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์

4. เตาเผาก๊าซและไอ (Afterburners หรือ VOC Incinerators)

การเผา (Incineration) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) โดยเรียกอุปกรณ์ที่ใช้เผาว่าเตาเผา (VOC Incinerators หรือ Afterburners) นอกจากไอระเหยแล้วการเผาทำลายยังสามารถทำลายอนุภาคนาขนาดเล็ก รวมทั้งของเหลวที่สามารถเผาไหม้ได้ด้วย

เตาเผา (Incinerator หรือ Afterburners) คือ อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดหนึ่งมีหลักการทำงานคือให้ความร้อนกับไอเสียจนทำให้อุณหภูมิของเสียมีค่าสูงขึ้นและรักษาระดับอุณหภูมิให้นานเพียงพอที่ของเสียอินทรีย์ที่ปนอยู่กับไอเสียรวมตัวกับออกซิเจน ประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผาขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและระยะเวลาที่ใช้ในการเผา ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของชนิดเตาเผาและสารอินทรีย์ที่ถูกเผา

ข้อเสียของการใช้วิธีการเผาในการควบคุมมลพิษ คือ ราคาของเชื้อเพลิงที่สูง บางครั้งมีสารอื่นเกิดขึ้นเนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายถูกออกซิไดซ์ เช่น การเผาสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภท Chlorinated Hydrocarbon จะมี ไฮโดรคลอริก และ ก๊าซคลอรีนเกิดขึ้น

4.1 ทฤษฎีการเผาไหม้ พิจารณาสมการที่ (52) แสดงถึงปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของสารไฮโดรคาร์บอนในทางทฤษฎี (Stoichiometry of complete combustion) ปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาการเผาไหม้หาได้จากปฏิกิริยาเคมีพื้นฐาน Stoichiometric หรือ Theoretical Oxygen

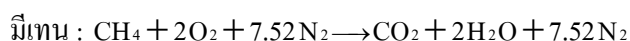


C_xH_y = สูตรโดยทั่วไปของไฮโดรคาร์บอน

b = จำนวนโมลของออกซิเจน = $X + (Y/4)$

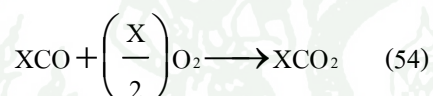
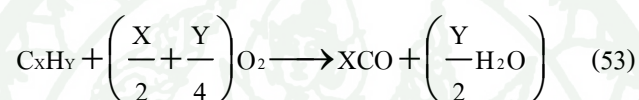
3.76 = จำนวนโมลไนโตรเจนอากาศที่มีอยู่ในทุกๆ โมลของออกซิเจน

ตัวอย่างเช่นการเผาไหม้มีเทน



จากปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานของการเผาไหม้ข้างบน ถ้าหากเชื้อเพลิงหรือไฮโดรคาร์บอนมี ซัลเฟอร์ (S) คลอรีน (Cl) ประกอบอยู่ด้วยจะเกิด ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ไฮโดรคลอริก หรือ สารไดออกซิน ตามลำดับ

พิจารณาจลนศาสตร์เคมีของการเผาไหม้ในความเป็นจริงแล้วปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่ได้เกิดเพียงขั้นตอนเดียว (Single Step) แต่มีหลายปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกสำหรับงานด้านมลพิษอากาศจึงพิจารณากำหนดให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนมีสองขั้นตอน (Cooper and Alley, 1996)



การออกแบบเตาเผาจะต้องออกแบบให้มีเวลาเพียงพอให้อุณหภูมิที่เผาไหม้ทำปฏิกิริยาในการทำลายสารมลพิษให้หมด การเผาไหม้จะขึ้นกับปัจจัยสามประการ (3t) ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) เวลาในการเผาไหม้ (Residence Time) และการผสมกัน (Turbulence) โดยปัจจัยทั้งสามจะสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเคมี (τ_c) เวลาที่ก๊าซอยู่ในเตาเผา (τ_r) เวลาที่ใช้ในการผสมกันระหว่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายและอากาศ (τ_m)

$$\tau_m = \frac{L^2}{D_e} \quad (55)$$

$$\tau_c = \frac{1}{k} \quad (56)$$

$$\tau_r = \frac{V}{Q_G} = \frac{L}{V_G} \quad (57)$$

โดยที่

τ_m = เวลาที่ใช้ในการผสมกันระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและอากาศ, s

τ = เวลาที่ก๊าซอยู่ในเตาเผา, s

τ_c = เวลาที่เกิดการผสมกันของสาร, s

k = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี, s^{-1}

D_e = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Diffusion Coefficient) ที่ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการผสมกันกับอากาศ, m^2/s

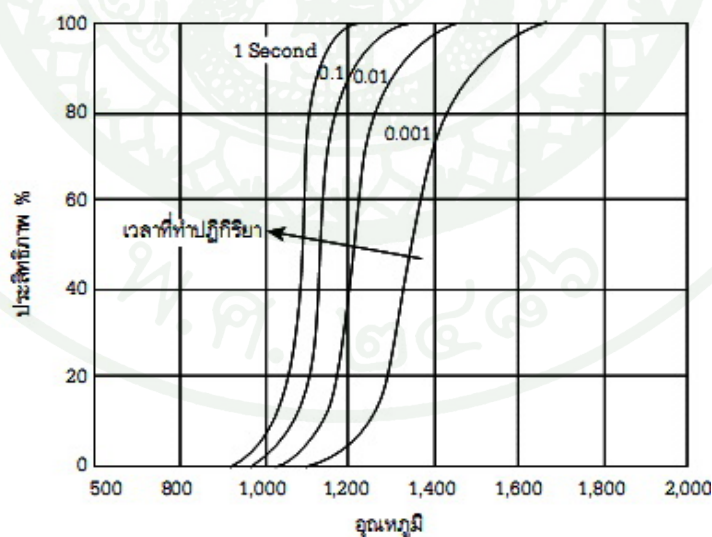
L = ความยาวของเตาเผา เฉพาะส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้, m

V = ปริมาตรของเตาเผาเฉพาะส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้, m^3

V_G = ความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้, m/s

Q_G = อัตราการไหลของก๊าซ ณ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้, m^3/s

จากภาพที่ 13 แสดงถึงเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้ กล่าวคือ ถ้าใช้อุณหภูมิที่ต่ำ ก็จะต้องใช้เวลาในการเผาไหม้มากขึ้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูง ก็จะสามารถลดเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ให้สั้นลง โดยจะยังคงรักษาระดับการเผาไหม้ให้เท่าเดิมได้ ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง ก็จะต้องใช้เชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้มากขึ้น แต่ถ้าต้องการเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นห้องเผาไหม้ต้องมีขนาดที่ใหญ่ตามไปด้วย



ภาพที่ 13 ผลของอุณหภูมิกับเวลาและความเร็วของปฏิกิริยา

ที่มา: นพภาพร (2550)

การคำนวณเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สารอินทรีย์มีหลายวิธีดังนี้

4.1.1 การประมาณอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สารอินทรีย์จากอุณหภูมิการจุดติดไฟ (Autoignition Temperature) โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สารอินทรีย์จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของสารอินทรีย์ ประมาณ 300 °F แต่ค่าที่ได้จากการประมาณโดยการใช้วิธีนี้ค่อนข้างสูงกว่าความเป็นจริง

4.1.2 การประมาณค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สารอินทรีย์จากชนิดและจำนวนของอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$T_{99.9} = 594 - 12.2W_1 + 117.0W_2 + 71.6W_3 + 80.2W_4 + 0.592W_5 - 20.2W_6 - 420.3W_7 + 87.1W_8 - 66.8W_9 + 62.8W_{10} + 75.3W_{11} \quad (58)$$

$$T_{99} = 577 - 10.0W_1 + 110.2W_2 + 67.1W_3 + 72.6W_4 + 0.586W_5 - 23.4W_6 - 430.9W_7 + 85.2W_8 - 82.2W_9 + 65.5W_{10} - 76.1W_{11} \quad (59)$$

โดยที่

$T_{99.9}$ = อุณหภูมิที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ 99.9%, °F

T_{99} = อุณหภูมิที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ 99%, °F

W_1 = จำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์

W_2 = มีสารประกอบอะโรมาติกในโมเลกุลของสารอินทรีย์หรือไม่ (0 = ไม่ใช่ 1 = ใช่)

W_3 = มีพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) ในโมเลกุลของสารอินทรีย์หรือไม่ โดยไม่นับพันธะคู่ในวงของสารอะโรมาติก (0 = ไม่ใช่ 1 = ใช่)

W_4 = จำนวนอะตอมของไนโตรเจนในโมเลกุลสารอินทรีย์

W_5 = อุณหภูมิของสารอินทรีย์ที่สามารถจุดติดไฟได้เอง

W_6 = จำนวนอะตอมของออกซิเจนในโมเลกุลสารอินทรีย์

W_7 = จำนวนอะตอมของกำมะถันในโมเลกุลของสารอินทรีย์

W_8 = อัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนต่อจำนวนอะตอมคาร์บอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์

W_9 = มีสารประกอบอัลลีน (2-พروเพนัล) หรือไม่ (0 = ไม่ใช่ 1 = ใช่)

W_{10} = มีพันธะคู่ของคาร์บอนกับคลอรีนในโมเลกุลของสารอินทรีย์หรือไม่ (0 = ไม่ใช่ 1 = ใช่)

W11=ค่าสื่อธรรมชาติของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้, s

จากสมการจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาทำลายสารอินทรีย์จะขึ้นกับอุณหภูมิในการจุดติดไฟ ระยะเวลาในการเผาไหม้ จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน และคาร์บอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์ โดยค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากสมการเหล่านี้จะมีค่าความถูกต้องประมาณ $\pm 20^{\circ}\text{F}$

4.1.3 การประมาณค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการสมมุติว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่เกิดในเตาเผาเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งดังนั้น

$$-\frac{dC_A}{d\tau_r} = r = kC_A \quad (60)$$

$$C_A = C_{A0} \exp(-k\tau_r) \quad (61)$$

$$\eta = 1 - e^{-k\tau_r} \quad (62)$$

C_A = ความเข้มข้นของสาร A เมื่อเวลาเท่ากับ t

C_{A0} = ความเข้มข้นของสาร A เมื่อเวลาเท่ากับ 0

τ_r = เวลาที่ก๊าซอยู่ในเตาเผา, s

η = ประสิทธิภาพการทำลายสาร A ของเตาเผา

สำหรับปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (63)$$

A = ค่าคงที่ (Pre-exponential Factor), s^{-1}

E = พลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี, kcal/kmol

R = ค่าคงที่ของก๊าซ, kcal/kmol- $^{\circ}\text{K}$

T = อุณหภูมิ, $^{\circ}\text{K}$

จากสมการที่ (62) เมื่อทราบค่าคงที่ (k) ของปฏิกิริยาการเผาไหม้สารอินทรีย์ ณ เวลาของการเผาไหม้ที่กำหนดจากนั้นแทนค่าในสมการที่ (63) เพื่อหาอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อทำลายสารอินทรีย์

ใน Air Pollution Engineering Manual ได้เสนออุณหภูมิสำหรับการเผาทำลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายว่าควรมีค่าประมาณ 1200-2000 °F โดยใช้ระยะเวลาการเผา 0.2-2 s เพื่อให้สามารถเผาทำลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายให้สมบูรณ์มากขึ้น (Buonicore and Davis, 1992)

EPA ได้กำหนดมาตรฐานของ Afterburner ที่ติดตั้งหลังจากเตาเผาขยะอันตราย (Hazardous Waste Incinerators, HWIs) ว่าจะต้องมีประสิทธิภาพในการทำลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Destruction and Removal Efficiency, DRE) อย่างน้อย 99.99 % เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานตาม EPA เวลาที่ก๊าซอยู่ใน Afterburner จึงมีค่าอย่างน้อย 0.2 s ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่ต้องการเผาโดยทั่วไปประมาณ 1800 °F

นอกจากค่า 3t ดังที่กล่าวข้างต้นแล้วยังมีปัจจัยอย่างอื่นที่ต้องคำนึง ได้แก่ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายขั้นต่ำที่ผสมกับอากาศจนเกิดเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้ (Lower Explosive Limit, LEL) และปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในกระแสก๊าซ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปได้มีการกำหนดความเข้มข้นของของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดที่ปนอยู่ในกระแสก๊าซไว้ไม่ควรเกิน 25% ของ ปริมาณร้อยละของ LEL

4.2 สมดุลมวลและพลังงาน (Material and Energy Balance) ในการออกแบบเตาเผาเมื่อได้กำหนดแล้วว่าต้องการให้อุณหภูมิในการเผาเท่าไรจึงสามารถทำลายสารอินทรีย์ได้ ขั้นตอนต่อไปที่สำคัญในการออกแบบคือการคำนวณหาอัตราการไหลเชื้อเพลิงเพื่อให้อุณหภูมิในการเผาได้ตามที่ต้องการโดยพิจารณาจากสมดุลมวลและพลังงานในเตาเผา จากกฎการอนุรักษ์มวลและพลังงาน และสถานะในเตาเผาอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-State)

สมดุลมวล

$$\text{มวลของสารที่เข้า} - \text{มวลของสารที่ออก} = 0$$

สมดุลพลังงาน

$$\text{พลังงานที่เข้า} - \text{พลังงานที่ออก} + \text{พลังงานที่เกิดขึ้น} = 0$$

$$\text{การคำนวณหามวลของก๊าซในเตาเผา} = \rho Q \quad (64)$$

$$\text{การคำนวณหาพลังงานของก๊าซในเตาเผา} = \rho Q C_p (T - T_{\text{ref}}) \quad (65)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของก๊าซไอเสีย, kg/m^3

Q = อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย, m^3/s

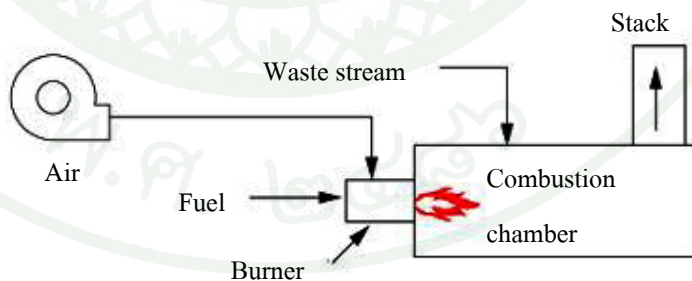
C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย, $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$

T = อุณหภูมิที่กำหนด, $^\circ\text{C}$

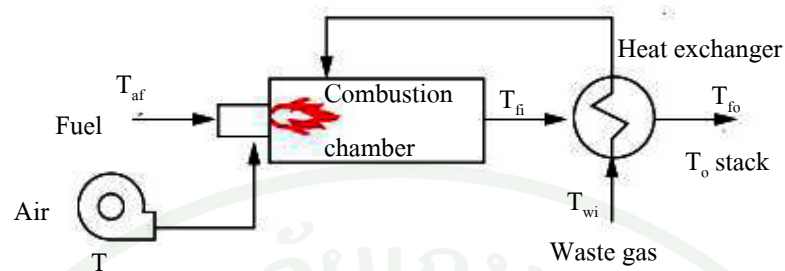
T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง, $^\circ\text{C}$

4.3 ประเภทของเตาเผาก๊าซและไอ เตาเผาก๊าซและไอบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่

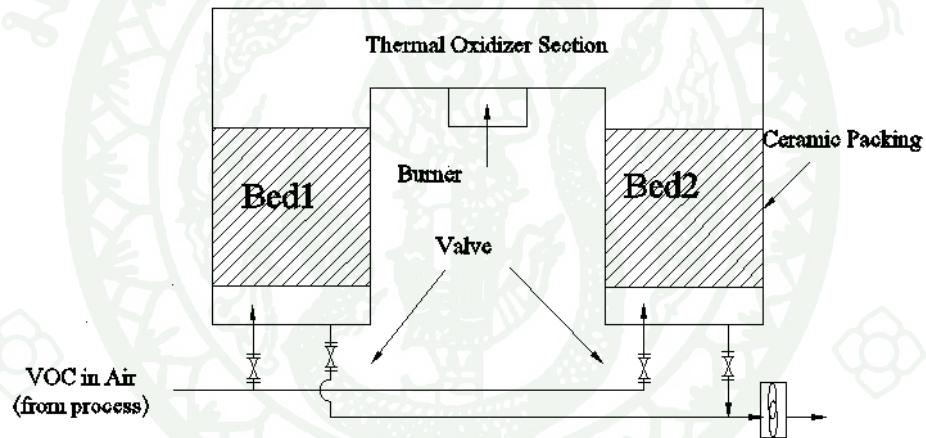
4.3.1 เตาเผาโดยใช้ความร้อน (Thermal Oxidizer หรือ Afterburner) เตาเผาชนิดนี้ประกอบด้วยห้องเผาเพียงหนึ่งห้องเผา หรือมากกว่าหนึ่งห้องเผา ใช้ความร้อนจากเปลวไฟผ่านเข้าไปในเตาเผาเพื่อให้เตาเผามีความร้อนสูงขึ้นจนถึงระดับที่ต้องการเพื่อให้สามารถทำลายสารอินทรีย์ได้ ระยะเวลาในการเผาจะต้องเพียงพอให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์



ภาพที่ 14 เตาเผาแบบใช้ความร้อนโดยตรง (Thermal Oxidizer)



ภาพที่ 15 เตาเผาแบบใช้ความร้อนโดยตรง (Thermal Oxidizer) โดยมีการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่



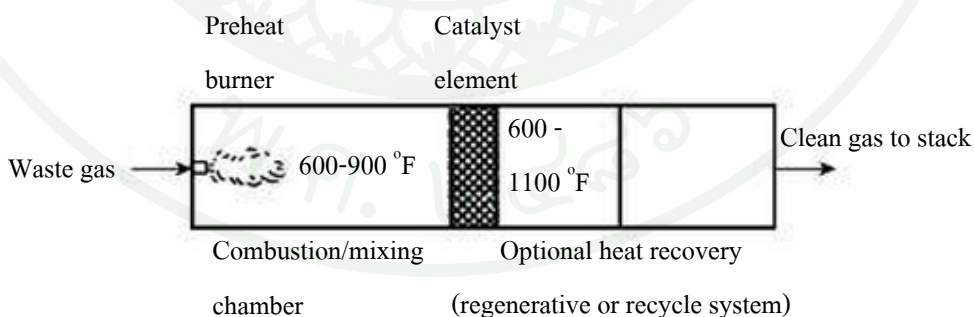
ภาพที่ 16 Regenerative Incinerator

ที่มา: Cooper and Alley (1994)

จากภาพที่ 15 แสดงเตาเผาที่นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Recuperative Incinerator โดยการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger หรือ Preheater) ซึ่งสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้สูงถึง 70 % (Vatavuk, 1990) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของ Recuperative Incinerator คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่สามารถที่จะทนอุณหภูมิสูงดังนั้นอาจแก้ปัญหาโดยการติดตั้ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 ตัว

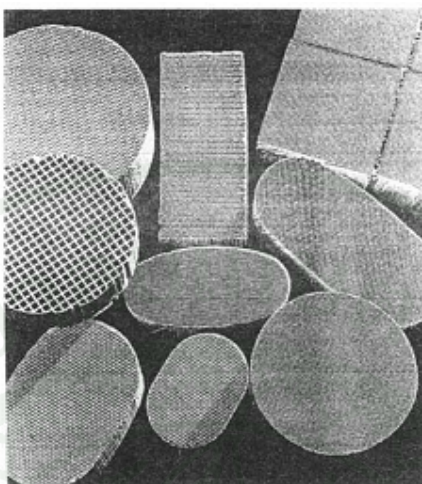
นอกจากนี้ยังมี Regenerative Incinerator (ภาพที่ 16) ซึ่งแตกต่างกับ Recuperative Incinerator ในด้านของวิธีการนำความร้อนกลับมาใช้ โดยจะประกอบไปด้วยเซรามิก 2 คอลัมน์ สลับกันทำงานเนื่องจากเซรามิกสามารถทนความร้อนได้สูงประสิทธิภาพการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่จึงสูงได้ถึง 95%

4.3.2 เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incinerators) ใช้หลักการเผาไหม้แบบมี สารเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปคล้ายกับการเผาไหม้โดยใช้ความร้อนโดยตรงแต่ข้อแตกต่างคือ มีการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอาจเป็นวัสดุที่ พอรุนทรงกระบอกหรือทรงกลม (Pellets) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.5-12.5 mm (1/16-1/2 in.) หรืออาจมีลักษณะเป็นรวงผึ้ง ริปบี้น หรือตาข่ายก็ได้ สารเร่งปฏิกิริยาส่วนมากจะเป็นโลหะมีค่า หรือเกลือของโลหะมีค่า เช่น พลาตินัม พัลลาเดียม โคบอลต์ ทองแดง โครเมียม โมลิบดีนัม โลหะ จำพวกอลูมิเนียมหรือเหล็กจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยตรงทำให้เกิดขึ้นออกไซด์ที่ผิว จึงไม่ เหมาะสมกับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนโลหะจำพวกพลาตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีเพราะไม่ ทำปฏิกิริยาและไม่เกิดออกไซด์ทำให้คุณสมบัติของสารไม่สูญเสียไปขณะที่ใช้งาน นอกจากนี้ รูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นด้วย เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยารูปรวงผึ้ง (Honey Comp) จะให้ค่าความดันสูญเสียประมาณ 0.05-0.5 in.H₂O / ความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยา (ft) ขณะที่ Pellets ขนาด 1/8 in. จะให้ค่าความความดันสูญเสียประมาณ 1.0-10.0, 0.05-0.5 in.H₂O / ความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยา (in.)



ภาพที่ 17 เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา : นภาพร (2550)



ภาพที่ 18 ตัวเร่งปฏิกิริยารูปทรงรวงผึ้ง (Honey Comp Catalyst)

ที่มา: Cooper and Alley (1994)

ขั้นตอนในการเปลี่ยนสารตั้งต้นที่นำไปเผาจนกลายเป็นก๊าซที่เป็นผลจากการเผาไหม้เป็นดังนี้

1. สารที่ต้องการเผาเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. สารที่ต้องการเผาเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. สารที่ต้องการเผาถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายในบริเวณผิวของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ความเสียหายหรือสารปนเปื้อนที่เกิดกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัญหาที่พบได้เมื่อเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ถ้าหากอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้ จะมีคราบของสารอินทรีย์หรือคาร์บอนไปสะสมที่หน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 3 แสดงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการออกซิไดซ์ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 80% เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา

สาร	อุณหภูมิ(°F)	
	CO ₃ O ₄	Pt-Honey Comp
Acrolein	382	294
n-Butanol	413	440
n-Propylamine	460	489
Toluene	476	373
n-Butyric acid	517	451
1,1-Trichloroethane	661	>>661
Dimethyl Sulfide	-	512

ที่มา: EPA (2002)

4.4 การออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ หลักการและขั้นตอนในการคำนวณออกแบบเตาเผา ก๊าซและไอ แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของเตาเผา ได้แก่

4.4.1 เตาเผาที่ใช้ความร้อน (Thermal Incinerator) การออกแบบเตาเผาโดยทั่วไป ต้องพิจารณาค่า อุณหภูมิ ปริมาตรก๊าซหรือไอเสีย อัตราการใช้เชื้อเพลิง และปริมาตรห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) ที่ต้องการ

- 1) ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเตาเผาประกอบด้วย
 - อัตราเร็วของก๊าซที่ไหลเข้า
 - อุณหภูมิของก๊าซหรือไอเสียที่เข้าสู่เตาเผา
 - ชนิดของสารหรือเชื้อสารเคมีที่ต้องการเผาทำลาย
 - ความเข้มข้นของสารที่ต้องการเผาทำลาย
 - ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ถ้ามี)

2) ตรวจสอบปริมาณออกซิเจนในก๊าซหรือไอเสียซึ่งจะต้องมีค่าเพียงพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในเตาเผาโดยจะต้องมีค่ามากกว่า 20% ของปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ไหลเข้ามาในเตาเผาจากสมการ

$$A = 100 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{10^{-6}} \right) \times 100 \quad (66)$$

$$O_2 = 0.209A \quad (67)$$

โดย

A = ปริมาณอากาศที่มีในก๊าซทั้งหมด, %

O₂ = ปริมาณออกซิเจนที่มีในก๊าซทั้งหมด, %

3) ตรวจสอบค่า LEL รวมของสารอินทรีย์ในก๊าซทั้งหมดในก๊าซไอเสีย (EPA, 2002 cited in Grelecki, 1976)

$$LEL_{mix} = \left[\frac{Y_T}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{Y_T LEL_i} \right)} \right]^{-1} \times 100 \quad (68)$$

โดยที่

$$Y_T = \sum_{i=1}^n Y_i$$

Y_T = ความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด, ppmv

Y_i = ความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย, ppmv

Δh_{v_i} = พลังงานความร้อนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเมื่อเกิดการเผาไหม้, kJ/kg

โดยที่ LEL mix จะต้องน้อยกว่า 25% ของปริมาณก๊าซที่ไหลเข้ามาในเตาเผา (Vatavuk, 1990)

4) คำนวณหาค่าพลังงานเอนทาลปีของสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่อปริมาตรของก๊าซเมื่อเกิดการเผาไหม้

$$\Delta h_Y = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i \Delta h_{Yi}) \times 10^{-6} \right] \quad (69)$$

Δh_Y = พลังงานความร้อนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดในกระแสก๊าซเมื่อเกิดการเผาไหม้, kJ/kg

Y_i = ความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย, ppmv

5) กำหนดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้เพื่อให้เผาทำลายสารอินทรีย์ให้ได้ประสิทธิภาพตามที่กำหนด โดยการคำนวณหาอุณหภูมิในห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการเผาทำลายสารอินทรีย์ตามที่ต้องการอาจใช้วิธีการคำนวณตามที่กล่าวมาเบื้องต้น โดยในการกำหนดอุณหภูมิจะต้องพิจารณาถึงข้อกำหนดกฎหมายหรือมาตรฐานของแต่ละสถานที่ด้วย ยกตัวอย่างจากการศึกษาของ แสดงถึงอุณหภูมิที่กำหนดในห้องเผาไหม้ที่สามารถทำลายสารอินทรีย์ได้ 98% โดยใช้เวลาในการเผา 0.75 s เท่ากับ 1600°F

6) คำนวณหาอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (T_{wo} , T_{fo}) พิจารณาภาพที่ 16 อุณหภูมิก๊าซที่ไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีสองค่าได้แก่อุณหภูมิก๊าซที่ไหลออกแล้วไปยังปล่องเพื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศ (T_{fo}) กับก๊าซที่ไหลออกไปเข้าสู่เตาเผา (T_{wo}) อุณหภูมิที่ออกจาก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีผลต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึงการกำหนดอุณหภูมิที่ออกจาก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังนี้

1. T_{wo} จะต้องไม่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการจุดติดไฟของสารอินทรีย์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2. ก๊าซไอเสียที่มี ฮาโลเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส เจือปนอยู่ด้วย T_{fo} จะต้องไม่ต่ำกว่า อุณหภูมิ ณ จุดน้ำค้างกรด (Acid dew point) เนื่องจากจะเกิดการควบแน่นของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบของกรดแล้วทำให้เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์

$$E_r = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{T_{fi} - T_{wi}} \times 100 \quad (70)$$

จากสมการที่ (23) แก้สมการเพื่อหา T_{wo}

$$T_{wo} = T_{wi} + \left(\frac{E_r}{100} \right) (T_{fi} - T_{wi}) \quad (71)$$

โดยที่

E_r = ประสิทธิภาพการนำความร้อนกลับของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, %

T_{wo} = อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, °C

T_{wi} = อุณหภูมิของก๊าซที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, °C

T_{fi} = อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเตาเผา, °C

กำหนดให้ 7) คำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จากสมการ

$$Q_{af} = \frac{Q_{wi}(H_{fi} - H_{wo}) + Q_a(H_{fi} - H_a) - \left[(\Delta h_Y) \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right]}{\left[(\Delta h_{af}) \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right] - [H_{fi} - H_{af}]} \quad (72)$$

$$H_{fi} = C_{pm_{air}} \rho_{wi} (T_{fi} - 25) \quad (73)$$

$$H_a = C_{pm_{air}} \rho_a (T_a - 25) \quad (74)$$

$$H_{af} = C_{pm_{af}} \rho_{af} (T_{af} - 25) \quad (75)$$

$$H_{wo} = C_{pm_{air}} \rho_{wo} (T_{wo} - 25) \quad (76)$$

Q_{af} = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิง, m^3/s

Q_{wi} = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซไอเสีย, m^3/s

Q_a = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเพื่อช่วยในการเจือจางก๊าซไอเสียและเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, m^3/s

Δh_y = ค่าความร้อนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเมื่อเกิดการเผาไหม้, kJ/m^3

Δh_{af} = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเกิดการเผาไหม้, kJ/m^3

HL = เปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อนของเตาเผา, %

C_{pmair} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะก๊าซไอเสีย ณ อุณหภูมิอ้างอิง, $kJ/kg-^{\circ}C$

H_{fi} = ค่าความร้อนที่ต้องการในการเพิ่มอุณหภูมิก๊าซไอเสียในเตาเผา, kJ/m^3

H_{wo} = ค่าความร้อนของก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเตาเผา, kJ/m^3

H_a = ค่าความร้อนของอากาศ, kJ/m^3

H_{af} = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, kJ/m^3

T_{fi} = อุณหภูมิในเตาเผา, $^{\circ}C$

T_a = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเจือจางก๊าซไอเสีย, $^{\circ}C$

T_{wo} = อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่เตาเผา, $^{\circ}C$

8) คำนวณหาก๊าซทั้งหมดผ่านเข้าไปในเตาเผาจากสมการ

$$Q_{fi} = Q_{wo} + Q_a + Q_{af} \quad (77)$$

Q_{wo} = อัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่เตาเผา, m^3/s

Q_a = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเพื่อช่วยในการเจือจางก๊าซไอเสียและเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, m^3/s

9) ตรวจสอบปริมาณเชื้อเพลิงที่คำนวณได้ข้างต้นว่าเพียงพอต่อการ

Stabilize เปลวไฟหรือไม่

โดยพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงจะต้องไม่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนทั้งหมดในเตาเผา

$$E_{tot} = \rho_{fi} Q_{fi} C_{pmfi} (T_{fi} - T_{ref}) \quad (78)$$

E_{tot} = พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในเตาเผา, kJ

ρ_{af} = ความหนาแน่นของก๊าซในเตาเผา, kg/m^3

C_{pmfi} = ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย, $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$

Q_{fi} = อัตราไหลของก๊าซทั้งหมดในเตาเผา, m^3/s

T_{fi} = อุณหภูมิในเตาเผา, $^\circ\text{C}$

T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง, $^\circ\text{C}$

10) การหาขนาดของเตาเผา

หาความยาวของห้องเผาไหม้

$$L = V_G t \quad (79)$$

L = ความยาวของเตาเผา, m

V_G = ความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านเตาเผา, m/s

หาพื้นที่ภาคตัดขวางของเตาเผา

$$A = \frac{Q_{fi}}{V_G} \quad (80)$$

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของเตาเผา, m^2

Q_{fi} = อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่ไหลผ่านเตาเผา, m^3/s

Q_a = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเพื่อช่วยในการเจือจางก๊าซไอเสียและเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, m^3/s

ความกว้างสูงของเตาเผาขึ้นกับลักษณะรูปทรงของเตาเผา

- พื้นที่ภาคตัดขวางแบบวงกลม

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (81)$$

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา, m

- พื้นที่ภาคตัดขวางแบบเหลี่ยมจัตุรัส

$$X = \sqrt{A} \quad (82)$$

$$Y = X$$

X = ขนาดความสูงของเตาเผา, m

Y = ขนาดความกว้างของเตาเผา, m

- พื้นที่ภาคตัดขวางแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

โดยกำหนดให้ด้านยาว (Y) มีค่าเท่ากับสองเท่าของด้านกว้าง (X)

$$X = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (83)$$

$$Y = 2X \quad (84)$$

4.4.2 การออกแบบเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ในการคำนวณเพื่อออกแบบเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีขั้นตอนที่แตกต่างไปจากเตาเผาธรรมดา เนื่องจาก

- อุณหภูมิที่ออกจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 700-900 °F แต่ไม่ควรเกิน 1200 °F ดังนั้นจึงต้องจำกัดปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในก๊าซไอเสีย หรือประสิทธิภาพของการปลงงานความร้อนกลับมาใช้ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

- กำหนดให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่เข้าและออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ ΔT โดยอุณหภูมิที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องอยู่สูงกว่าอุณหภูมิที่สามารถเผาทำลายสารอินทรีย์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาได้ตามที่กำหนด และจะต้องจำกัดปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพื่อเมื่อเกิดการเผาไหม้ในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจะไม่ปล่อยค่าความร้อนค่า ΔT

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้นสรุปขั้นตอนการออกแบบเตาเผาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดังนี้

1) ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเตาเผาประกอบด้วย

- อัตราเร็วของก๊าซที่ไหลเข้า

- อุณหภูมิของก๊าซหรือไอเสียที่เข้าสู่เตาเผา
- ชนิดของสารหรือเชื้อเพลิงที่ต้องการเผาทำลาย
- ความเข้มข้นของสารที่ต้องการเผาทำลาย
- ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ถ้ามี)

2) ตรวจสอบปริมาณออกซิเจนจะต้องมีค่ามากกว่า 20% ของปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ไหลเข้ามาในเตาเผาจากสมการ

$$A = 100 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{10^{-6}} \right) \times 100 \quad (85)$$

$$O_2 = 0.209A \quad (86)$$

โดย

A = ปริมาณร้อยละอากาศที่มีในก๊าซทั้งหมด, %

O₂ = ปริมาณออกซิเจนที่มีในก๊าซทั้งหมด, %

3) ตรวจสอบค่า LEL รวมของสารอินทรีย์ในก๊าซทั้งหมด (EPA, 2002 cited in Grelecki, 1976)

$$LEL_{mix} = \left[\frac{Y_T}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{Y_T LEL_i} \right)} \right]^{-1} \times 100 \quad (87)$$

โดยที่

Y_T = ความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด, ppmv = $\sum Y_i$

Y_i = ความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย, ppmv

LEL_i = ค่า LEL ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย, ppmv

โดยที่ LEL mix จะต้องมิต่ำกว่า 25 % ของปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ไหลเข้ามาในเตาเผา (Vatavuk, 1990)

4) คำนวณค่าพลังงานเอนทาลปีของสารอินทรีย์ต่อปริมาตรของก๊าซก๊าซเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

$$\Delta h_Y = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i \Delta h_{Yi}) \times 10^{-6} \right] \quad (88)$$

Δh_Y = พลังงานเอนทาลปีความร้อนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดในกระแสก๊าซ, kJ/kg

Y_i = ความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย, ppmv

5) กำหนดอุณหภูมิที่ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา (T_n) ในการกำหนด T_n จะต้องมั่นใจว่าอุณหภูมิที่กำหนดสามารถทำลายสารอินทรีย์ให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการและขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ด้วยจาก โดยทั่วไปค่าที่กำหนดจะอยู่ในช่วง 700-900 °F แต่ไม่เกิน 1200 °F เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับตัวเร่งปฏิกิริยา

6) คำนวณหาอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนวิธีการคำนวณทำเช่นเดียวกันกับเตาเผาแบบใช้ความร้อน

7) คำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Q_{ap}) ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการสามารถหาได้จากสมการที่ (67) ข้อแตกต่าง คือการคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการกับเตาเผาชนิดนี้จะใช้วิธีการแก้สมการสมดุลมวลและพลังงานรอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและ ห้องเผาไหม้ซึ่งแตกต่างจากเตาเผาแบบใช้ความร้อนที่ทำการสมดุลมวลและพลังงานเฉพาะก๊าซที่เข้าและออกจากห้องเผาไหม้เท่านั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จะต้องทำการตรวจสอบเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ปริมาณเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จะต้องมีค่าเป็นบวกปริมาณเชื้อเพลิงที่มีค่าเป็นลบหมายถึงปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในกระแสก๊าซมีค่ามากเกินไป หรือ สัดส่วนการนำความร้อนกลับมาใช้ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าสูงเกินไป

- ปริมาณเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จะต้องมีค่าสูงพอที่จะให้เปลวไฟในห้องเผาไหม้มีค่าเสถียร (ดูข้อ 8)

เนื่องจากมลพิษในก๊าซไอเสียมีอากาศเป็นองค์ประกอบหลักดังนั้นจึงกำหนดให้

$$\rho_{wo} = \rho_{wi} = 1.18 \text{ kg/m}^3 \text{ ณ } 25^\circ\text{C, 1 atm}$$

C_{pmair} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ

8) ตรวจสอบปริมาณเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จากข้อ 7 ว่าเพียงพอสำหรับทำให้เปลวไฟเสถียรหรือไม่โดยปริมาณเชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ใช้ในการทำให้เปลวไฟเสถียร (<5%ของพลังงานทั้งหมดที่ใส่เข้าไป)

9) คำนวณอุณหภูมิก๊าซที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (T_{ri}) เพื่อให้มั่นใจว่าอุณหภูมิที่เข้าจะต้องอยู่สูงกว่าอุณหภูมิที่สามารถเผาทำลายสารอินทรีย์ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้

จากสมการ

$$\Delta T = T_{ri} - T_{ri} \quad (89)$$

โดยที่

T_{ri} = อุณหภูมิของก๊าซที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา, $^{\circ}\text{C}$

T_{ri} = อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา, $^{\circ}\text{C}$

ΔT สามารถทำการคำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงานก่อนและหลังออกจากห้องเผาไหม้ในส่วนที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นี้จะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซให้สูงขึ้นก่อนเข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่คำนวณจากข้อ 7 โดยสมมติว่าเชื้อเพลิงทั้งหมดมีการเผาไหม้เฉพาะในส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เท่านั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณจะคล้ายกับสมการที่ (72) เพียงแต่เปลี่ยนจากเทอมของตัวแปรที่ออกจากห้องเผาไหม้เป็นตัวแปรที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$H_{ri} = \frac{Q_{af} \left[\Delta h_{af} \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right] + Q_{af} H_a + Q_{wi} H_{wo}}{Q_{wi} + Q_a + Q_{af}} \quad (90)$$

Q_{af} = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิง, m^3/s

Q_{wi} = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซไอเสีย, m^3/s

Q_a = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเพื่อช่วยในการเจือจางก๊าซไอเสียและเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, m^3/s

Δh_{af} = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, kJ/m^3

HL= เปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อนของเตาเผา, %

H_{wo} = ค่าความร้อนของก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้, kJ/m^3

H_a = ค่าความร้อนของอากาศ, kJ/m^3

H_{fi} = ค่าความร้อนของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา, kJ/m^3

10) คำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่ไหลผ่านเตาเผา (Q_{fi}).

11) คำนวณหาปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากวิธีในการคำนวณหาปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยาจริงๆค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นจึงใช้วิธีการง่ายๆ ซึ่งผลที่คำนวณได้มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้สำหรับนำข้อมูลเพื่อไปใช้ในการประเมินราคา คือการประมาณจาก อัตราเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Space Velocity) ในหน่วยส่วนกลับของเวลา (Reciprocal time units) ดังในสมการ

$$V_{cat} = \frac{Q_{fi}}{\phi} \quad (91)$$

V_{cat} = ปริมาตรทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งพื้นที่ว่าง, m^3

Q_{fi} = อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่ไหลผ่านเตาเผา, m^3/s

ϕ = อัตราเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ในหน่วยส่วนกลับของเวลา, s^{-1}

การคำนวณหา V_{cat} จะต้องเปลี่ยน Q_{fi} ให้เป็น Q_{fi} ณ 60°C และความดัน 1 atm ก่อนโดยข้อมูลของ ϕ จะได้จากการทดลอง ในโลหะมีค่า (Precious metals) จะมีค่าของ ϕ ประมาณ $10,000 - 60,000 \text{ hr}^{-1}$

การประเมินราคา

1. ต้นทุนทั้งหมด (Total Capital Investment : TCI)

American Association of Cost Engineers (AACE) ได้นิยามความหมายของต้นทุนทั้งหมด คือ ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อและติดตั้งอุปกรณ์หลักและอุปกรณ์เสริมรวมถึงค่าเช่าหรือซื้อที่ดิน

ก่อสร้างอาคาร และระบบสาธารณูปโภคที่อยู่รอบๆระบบ (Off-Site Facilities) ต้นทุนทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่

1.1 องค์ประกอบต้นทุนทั้งหมด

1.1.1 Non depreciable หมายถึง ต้นทุนที่เกิดจากการใช้จ่ายไปกับรายการหรือสิ่งของที่ไม่มีการเสื่อมค่าหรือราคาไปตามกาลเวลา เช่น ที่ดิน (Landing) เงินทุนหมุนเวียน (Working Capital)

1.1.2 Depreciable หมายถึง ต้นทุนที่เกิดจากการใช้จ่ายไปกับรายการหรือสิ่งของที่สามารถเสื่อมราคาได้ หรือมีค่าลดลงไปตามกาลเวลา เช่น ราคาของอุปกรณ์หลักและอุปกรณ์ช่วยในการบำบัดมลพิษ ต้นทุนชนิดนี้แบ่งออกได้ดังนี้

1.2 สาธารณูปโภคภายนอกระบบ (Offsite facilities)

1.3 ต้นทุนทางอ้อม (Total Indirect Costs)

1.3.1 ต้นทุนในการติดตั้งทางอ้อม (Indirect Installation Costs)

- ค่าใช้จ่ายสำหรับวิศวกรและผู้ควบคุมคนงาน (Engineering and Supervision)
- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง (Construction and Field Expenses)
- ค่าใช้จ่าย เริ่มเดินระบบ (Startup)
- ค่าใช้จ่ายในการทดสอบประสิทธิภาพ (Performance Test)
- เงินทุนสำรอง (Contingencies)

1.4 ต้นทุนโดยตรง (Total Direct Costs)

1.4.1 ค่าใช้จ่ายในการจัดเตรียมพื้นที่ (Site Preparation)

1.4.2 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอาคาร (Building)

1.4.3 ค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ (Purchased Equipment Costs)

- อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมหรือกักจัดมลพิษ (Control Device)
- อุปกรณ์ช่วยอื่นๆ (Auxiliary Equipments) เช่น พัดลม ท่อดูดอากาศ

- เครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมระบบ (Instrumentation)
- ภาษีการขาย (Sales Taxes)
- ค่าขนส่ง (Freight)

1.4.4 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโดยตรง (Direct Installation Costs)

- ฐานและโครงสร้าง (Foundations and Supports)
- ค่าขนส่งวัสดุและการติดตั้ง (Handling and Erection)
- ค่าไฟฟ้า (Electric)
- ท่อ (Piping)
- ฉนวน (Insulation)
- ทาสี (Painting)

ในการประเมินราคา การคำนวณหาต้นทุนในการติดตั้งทั้งหมดทั้งทางตรงและทางอ้อมสามารถหาได้อีกวิธีโดยการกำหนดค่า แฟลคเตอร์ซึ่งเป็นค่าคงที่แล้วคูณกับราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ ซึ่งค่าแฟลคเตอร์ดังกล่าวมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์และชนิดของค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 4 ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้ในการคูณเพื่อคำนวณหา ราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ ราคาในการติดตั้ง
ทางตรงและทางอ้อมของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศโดยทั่วไป (Base case)

Cost Item	Venturi Scrubber	Thermal/Catalytic Incinerator	Absorber
1. Direct Costs			
1.1 Purchased equipment (PE)			
- Control device	x	x	x
- Auxiliary	y	y	y
- Instrumentation	0.1(x+y)	0.1(x+y)	0.1(x+y)
- Taxes	0.03(x+y)	0.03(x+y)	0.03(x+y)
- Freight	0.05(x+y)	0.05(x+y)	0.05(x+y)
Total (PE)	1.18(x+y)	1.18(x+y)	1.18(x+y)
1.2 Installation			
- Foundation, support	0.06PE	0.08PE	0.12PE
- Handling ,erection	0.4PE	0.14PE	0.40PE
- Electrical	0.01PE	0.04PE	0.01PE
- Piping	0.05PE	0.02PE	0.30PE
- Insulation	0.03PE	0.01PE	0.01PE
- Painting	0.01PE	0.01PE	0.01PE
Total	0.56PE	0.30PE	0.85PE
1.3 Site preparation	-----As required-----		
1.4 Facilities building	-----As required-----		
2. Indirect costs			
- Engineering/supervision	0.1PE	0.1PE	0.1PE
- Construction, field	0.1PE	0.05PE	0.1PE
- Construction, fee	0.1PE	0.1PE	0.1PE
- Startup	0.01PE	0.02PE	0.01PE
- Performance test	0.01PE	0.01PE	0.01PE

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Cost Item	Venturi Scrubber	Thermal/Catalytic Incinerator	Absorber
- Model study	-	-	0.03PE
- Contingencies	0.03PE	0.03PE	-
Total	0.35PE	0.31PE	0.35PE

ที่มา : Vatavuk (1990) cited in Vatavuk and Neveril (1980)

2. ค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (Total Annual Cost)

ค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดหมายถึงรายจ่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละปีในช่วงอายุของการเดินระบบ เนื่องจากปัจจัยเงินเฟ้อและปัจจัยอื่นๆ ทั้งนี้ AACE ได้แบ่งค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่ ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง (Direct Annual Cost) และค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อม (Indirect Annual Cost) โดยค่าใช้จ่ายรายปีสามารถหาได้จากสมการที่ 92

$$TAC = DAC + IAC - RC \quad (92)$$

โดย

TAC = ค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด, USD/yr

DAC = ค่าใช้จ่ายรายปีทางตรง, USD/yr

RC = ผลประโยชน์หรือรายได้กลับคืนมา (Recovery Credits), USD/yr

IAC = ค่าใช้จ่ายรายปีทางอ้อม

ค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อมยังแยกเป็น 2 ชนิดย่อยได้แก่ รายจ่ายแปรผัน (variable) คือ ค่าใช้จ่ายที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงานของระบบ เช่น ค่าใช้จ่ายในระบบสาธารณสุขโรค การจัดการของเสีย จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบ เช่น การเพิ่มอัตราอัตราการผลิตของก๊าซ จะทำให้ค่าใช้จ่ายเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น อีกชนิดหนึ่ง คือ รายจ่ายกึ่งแปรผัน (Semivariable) คือ ค่าใช้จ่ายที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบ เช่น ค่าแรงในการควบคุมการเดินระบบ ค่าแรงในการบำรุงรักษา

2.1 ระบบสาธารณูปโภค (Utilities) หมายถึง ไฟฟ้า เชื้อเพลิง ไอน้ำ น้ำ (กระบวนการหล่อเย็น) ซึ่งขึ้นกับชนิดของระบบหรืออุปกรณ์ เช่น

- ไอน้ำ (Steam): ระบบดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon Adsorber)
- ระบบอัดอากาศ (Compressed air) : อุปกรณ์ชนิดพัลส์เจ็ต (Pulsa-jet)
- เครื่องควบแน่น : refrigerated condensers
- เชื้อเพลิง : เตาเผา
- วัตถุดิบ (Raw Material) : ปูนขาว

ความต้องการวัตถุดิบจะขึ้นกับขนาดและชนิดของอุปกรณ์ อุปกรณ์บางชนิดไม่จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบ เช่น ถังกรอง บางชนิดต้องใช้ เช่น Flue Gas Desulphurization ต้องการวัตถุดิบ (ปูนขาว) จำนวนมาก บางอุปกรณ์ เช่น สกรับเบอร์แบบเปียก ใช้วัตถุดิบจำพวกสารเคมีในการบำบัดของเสีย (น้ำเสีย ตะกอน) ตัวอย่างของวัตถุดิบที่ใช้ในอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศ เช่น

เวทสกรับเบอร์แบบเปียก : สารป้องกันการกัดกร่อน (Caustics) สารช่วยในการตกตะกอน (Coagulants)

หอดูดซึม : สารละลายหรือตัวดูดซึม (Absorbents)

2.1.1 ค่าแรงในการเดินระบบ (Operating Labor) การเดินระบบต้องการผู้ควบคุมดูแลอย่างน้อย 1 คน ในการคำนวณค่าแรงจะคิดจากระยะเวลาที่ต้องใช้ในการควบคุมดูแลระบบใน 1 กะ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดและความซับซ้อนของระบบ รวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการควบคุมระบบ

ตารางที่ 5 แสดงแฟคเตอร์แรงงาน (Labor Factor) เพื่อประมาณราคาค่าแรงในการควบคุมการทำงานของระบบแต่ละชนิด

Control Device	Labor Factor (hr/shift)	
	Operating	Maintenance
Fabric Filter	2 – 4	1-2
Electrostatic Precipitator	0.5-2	0.5-1
Venturi Scrubber	2-8	1-2
Incinerator	0.5	0.5
Gas Absorber	0.5	0.5
Carbon Adsorber	0.5	0.5
Refrigerated Condenser	0.5	0.5
Flare	-	0.5

ที่มา : Vatauvuk, 1990

2.1.2 การบำรุงรักษา (Maintenance) ในการประมาณราคาในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ แบ่งออกเป็น 2 วิธี วิธีแรกจะคิดจากราคาดัชนีทุนทั้งหมด (หรือเฉพาะดัชนีทุนทางตรง) โดยค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามีค่าประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ของราคาดัชนีทุนทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายในการนำไปใช้แต่ค่าที่คำนวณได้มักจะมากกว่าความเป็นจริงสำหรับระบบหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ และน้อยกว่าค่าจริงในระบบที่มีขนาดเล็กซึ่งมีราคาไม่แพง อีกวิธีหนึ่งคือการคิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโดยการคิดแยกออกเป็นสองส่วนได้แก่ ค่าใช้จ่ายสำหรับค่าแรง และวัสดุที่ต้องใช้

ค่าแรงในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 5 ในกรณีที่ไม่มีทราบข้อมูลสามารถประมาณได้โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 110% ของค่าแรงในการเดินระบบ ส่วนวัสดุที่ต้องใช้จะคิดเป็น 100 % ของค่าแรงในการเดินระบบ (Vatauvuk, 1990 cited in Vatauvuk and Neveril, 1980)

2.1.3 วัสดุทดแทน (Replacement Parts) วัสดุที่ต้องแยกค่าใช้จ่ายส่วนนี้ออกจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเนื่องจาก อายุการใช้งานของวัสดุมากกว่า 1 ปี และวัสดุทดแทนมี

ราคาที่สูงกว่าวัสดุที่ใช้ในการบำรุงรักษา ตัวอย่างชนิดของอุปกรณ์และชนิดของวัสดุทดแทน คือ

- เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา: ตัวเร่งปฏิกิริยา
- หอคอยดูดซับด้วยคาร์บอน: คาร์บอน
- ถังกรอง: ถัง
- เครื่องดักละอองน้ำ: Pads

ในการประมาณราคานอกจากจะคิดราคาของตัววัสดุทดแทนแล้วยังต้องคิดราคาของแรงงานที่ใช้ในการเปลี่ยนทดแทนวัสดุด้วยวิธีการอย่างง่าย คือ ค่าแรงในการเปลี่ยนวัสดุจะเท่ากับ 100% ของราคาของวัสดุทดแทนนั้น

และเนื่องจากวัสดุทดแทนมีอายุการใช้งานมากกว่า 1 ปี การคำนวณหาค่าใช้จ่ายรายปีของวัสดุทดแทนจะหาได้จากสมการ (93)

$$C_{\pi} = P_{\pi} (CRF_{\pi}) \quad (93)$$

C_{π} = ค่าใช้จ่ายรายปีสำหรับวัสดุทดแทน, USD/yr

P_{π} = ราคาของวัสดุทดแทน, USD/yr

CRF_{π} = สัมประสิทธิ์การคืนทุน

ค่าสัมประสิทธิ์การคืนทุน(Capital Recovery Factor, CRF) จะสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของวัสดุทดแทนและอัตราดอกเบี้ย (Interest Rate) ดังสมการที่ 94

$$CRF = \frac{[i(1+i)^m]}{[(1+i)^m - 1]} \quad (94)$$

โดย

i = สัดส่วนอัตราดอกเบี้ย

m = อายุการใช้งานของอุปกรณ์, yr

2.1.4 ค่าโสหุ้ย (Overhead) ได้แก่ค่าใช้จ่ายของพนักงานที่นอกเหนือจากเงินเดือน (Payroll) หมายถึง ค่าใช้จ่ายที่ช่วยในการควบคุมการเดินระบบ ควบคุมคนงาน และค่าแรงในการบำรุงรักษา เช่น ประกันสังคม ประกันชีวิต บำนาญ ซึ่งรายจ่ายบางรายการเป็นรายจ่ายคงที่ไม่ขึ้นกับชั่วโมงการทำงานของ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปรายจ่ายชนิดนี้จะคิดเป็นจำนวนสัดส่วนของค่าแรงทั้งหมด นอกจากนี้ยังหมายถึง รายจ่ายที่ไม่เกี่ยวกับส่วนของการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และการบำรุงรักษา ยกตัวอย่างเช่น ค่าเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย ค่าสำนักงานและค่าสถานที่จอดรถ วิธีการในการประมาณค่าใช้จ่ายในส่วนนี้สามารถคำนวณอย่างง่ายและมีค่าความถูกต้องพอสมควร โดยกำหนดให้ค่าโสหุ้ยมีค่าเท่ากับ 50-70 % ของค่าแรงทั้งหมด (Peter and Timmerhaus, 1980)

2.1.5 ภาษีทรัพย์สิน (Property taxes) ประกันภัย (Insurance) และค่าจ่ายในการดำเนินการ (Administrative Charge) ค่าใช้จ่ายเหล่านี้เป็นค่าใช้จ่ายคงที่ สามารถประมาณค่าใช้จ่ายได้จาก ต้นทุนทั้งหมดโดยค่าใช้จ่ายทั้งสามรายการจะคิดเป็น 4 % ของต้นทุนทั้งหมดซึ่งแบ่งออกเป็น 1 % สำหรับภาษีทรัพย์สิน 1 % สำหรับประกันภัย และ 2 % สำหรับค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่างๆ (Vatavuk, 1990)

2.1.6 ต้นทุนค่าเสื่อมราคาและต้นทุนรายปี (Depreciation and Capital Recovery) ต้นทุนค่าเสื่อมราคา จะใช้ในกรณีที่อายุการใช้งานของอุปกรณ์มีมากกว่า 2 ปีขึ้นไปส่วนต้นทุนรายปี จะใช้ในอุปกรณ์ทั่วไปมากกว่าโดยต้นทุนรายปีสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A = (TDI - C_{\pi})(CRF) + TNDI(i) \quad (95)$$

A = ต้นทุนเทียบเท่ารายปี, USD

TDI = ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดในส่วน of อุปกรณ์หรือทรัพย์สินที่มีมูลค่าลดลงตามอายุการใช้งาน, USD

C_{π} = ราคาของอุปกรณ์เทียบเป็นรายปี, USD (หาได้จากสมการที่ 93)

CRF = Capital Recovery Factor, USD (หาได้จากสมการที่ 94)

TNDI = ราคาต้นทุนในส่วน of ทรัพย์สินที่มีมูลค่าไม่ลดลงไปตามอายุการใช้งาน, USD

i = อัตราดอกเบี้ย, อัตราส่วน

ค่าใช้จ่ายรายปีของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อมูลและแฟกเตอร์ที่ใช้ในการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศ

Cost Item	Venturi Scrubber	Thermal/Catalytic	Absorber
1. Direct Annual Costs,			
DC			
Operating Labor			
- Operator	2-8hr/shift	0.5hr/shift	1-2hr/shift
- Supervisor	15%of Operator	15% of Operator	15% of Operator
Operating Material			
- Solvent	Application specific	-	Application specific
- Chemical	Application specific	-	Application specific
Wastewater	Application specific	-	Application specific
Disposal			
Maintenance			
- Labor	1-2hr/shift	0.5hr/shift	1-2hr/shift
- Material	100%of Maintenance	100%of Maintenance	100%of Maintenance
	Labor	Labor	Labor
Utilities			
- Fan	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)
- Pump	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)	-	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)
- Water	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)	-	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)
- Natural gas	-	(consumption rate)x(hr/yr)x(unit cost)	-

2. Indirect Annual Costs,

IC

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Cost Item	Venturi Scrubber	Thermal/Catalytic	Absorber
Administrative Charges	2% of TCI	2% of TCI	2% of TCI
Property tax	1% of TCI	1% of TCI	1% of TCI
Insurance	1% of TCI	1% of TCI	1% of TCI
Overhead	60% of Labor and Material Costs	60% of Sum of Operating, Supervisor, Material Costs Maintenance Labor and Maintenance Materials	60% of Labor and
Capital Recovery	0.1098TCI	CRF(TCI-1.08 (catalyst cost))	0.1098TCI
Total Annual		-----DC+IC-----	

ที่มา : EPA (2002)

3. การปรับเปลี่ยนราคา (Escalating Cost)

เนื่องจากสมการที่ใช้ในการประเมินราคาของอุปกรณ์ที่เสนอโดยผู้ผลิตข้างต้นไม่ใช่เวลา ณ ปัจจุบัน ดังนั้นหลังจากคำนวณประเมินราคาของอุปกรณ์แล้วจะต้องปรับเปลี่ยนให้เป็นราคา ณ ปัจจุบันก่อนโดยใช้ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคา (Cost Indices) ดังสมการ

$$Cost_2 = Cost_1 \left(\frac{Index_2}{Index_1} \right) \quad (95)$$

โดย

$Cost_1$ = ราคาของอุปกรณ์ในปี หรือ ณ เวลาที่ทราบราคา, USD

$Cost_2$ = ราคาของอุปกรณ์ในปีหรือ ณ เวลาที่ต้องการประเมินราคา, USD

$Index_1$ = ดัชนีราคาของอุปกรณ์ในปี หรือ ณ เวลาที่ทราบราคา, USD

$Index_2$ = ดัชนีราคาของอุปกรณ์ในปีหรือ ณ เวลาที่ต้องการประเมินราคา, USD

ในการปรับเปลี่ยนราคาให้เป็นช่วงเวลาปัจจุบันในระบบหรืออุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศจะไม่มีดัชนีที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนโดยเฉพาะ แต่ดัชนีราคาที่นิยมนำมาใช้เพื่อปรับเปลี่ยนราคามี 3 ชนิดได้แก่ Chemical Engineering Plant Cost Index, Marshall and Swift Equipment Cost Index และ Producer Price Index

Chemical Engineering Plant Cost Index ดัชนีนี้จะมีการปรับปรุงทุกเดือนและทำการตีพิมพ์ลงในวารสาร Chemical Engineering ตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี 1963 วัตถุประสงค์ประสงค์หลักเพื่อทำการปรับเปลี่ยนประเมินราคาของกระบวนการทางเคมี ดัชนีชนิดนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ Composite หรือ CE Index ซึ่งจะใช้ในการปรับเปลี่ยนราคาโดยรวมของกระบวนการทั้งหมด และส่วนที่ 2 ได้แก่ Component เพื่อใช้ในการประเมินราคาของส่วนย่อยของระบบ โดยจะมีตัวเลขร้อยละเพื่อแสดงถึงน้ำหนักของราคาของแต่ละองค์ประกอบย่อยดังนี้

3.1 อุปกรณ์ (Equipment) 61 %

- Heat Exchangers and Tanks 37 %
- Process Machinery 14 %
- Pipe Valve and Fitting 20 %

- Process Instruments 75 %
- Pumps and Compressor 7 %
- Electrical Equipment 5 %
- Structural Supports and Miscellaneous 10 %

3.2 ค่าแรงในการก่อสร้าง (Construction Labor) 22 %

3.3 อาคาร (Building) 7 %

3.4 ค่าใช้จ่ายสำหรับวิศวกรและผู้ควบคุมคนงาน (Engineering and Supervision) 10 %

4. การประเมินราคา ไซโคลน พัดลม และ ป้าย

4.1 การประเมินราคาไซโคลน ราคาของชุดไซโคลนซึ่งทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน และรวมอุปกรณ์อื่นๆ จะขึ้นกับขนาดความกว้างของทางเข้าไซโคลนและอุปกรณ์ช่วยที่เพิ่มเข้ามา โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (96) และ (97)

4.1.1 การประเมินราคาของระบบที่ประกอบด้วย Cyclone Fan Motor Supports และ Hopper/drum

$$EC = 6520(A^{0.903}) \quad (96)$$

เมื่อ $0.20 \leq A \leq 2.64$

4.1.2 Rotary air Lock

$$EC = 2730(A^{0.0965}) \quad (97)$$

เมื่อ $0.350 \leq A \leq 2.64$

EC= ราคาโดยประมาณของชุดไซโคลนและอุปกรณ์เสริม, USD

A= พื้นที่ทางเข้าของอากาศเสียที่เข้าสู่ไซโคลน, m^2

ปีอ้างอิง : August 1988

ผลรวมของราคาของไซโคลนจะเท่ากับสองสมการรวมกัน .ในการประเมินราคาของ Rotary air lock ในสมการที่ (97) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อขนาดของพื้นที่ทางเข้าของอากาศเสียที่เข้าสู่ไซโคลนมีค่าตั้งแต่ 0.350 เท่านั้น สำหรับไซโคลนที่มีขนาดทางเข้าของอากาศเสียเล็กกว่านั้นไม่จำเป็นต้องติดตั้ง Rotary air lock (Vatavuk, 1990)

4.2 การประเมินราคาของพัดลม พัดลมสามารถเลือกซื้อได้ทั้งแบบมีมอเตอร์และไม่มีมอเตอร์ ขนาดและชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิต แต่โดยทั่วไปราคาของพัดลมจะสัมพันธ์กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อพัดลม (Wheel diameters) ราคาของพัดลมสามารถประเมินโดยแยกตามชนิดได้โดย

4.2.1 พัดลมแบบซี่ใบพัดเอียงหลัง (Backward Inclined Blade) ราคาชุดของพัดลมชนิดซี่ใบพัดเอียงหลัง สามารถหาได้จากสมการที่เสนอโดยผู้ผลิตดังนี้

$$EC = 42.3D^{1.20} \quad (98)$$

EC= ราคาโดยประมาณของพัดลม, USD

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อพัดลม, ft

โดยสมการนี้จะใช้ได้เมื่อ

$$- 12.25 \leq D \leq 36.5$$

- ค่าความดันสถิตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-8 in.H₂O

- วัสดุที่ใช้ทำพัดลม: Carbon steel

- ปีอ้างอิง: July 1988

ราคาที่คำนวณได้จากสมการ(98) ได้รวมถึง ตัวพัดลม มอเตอร์ชนิดสายพาน (Belt driven motor) และ motor starter ค่าความถูกต้องในการประเมินราคาประมาณ $\pm 20\%$

นอกจากนี้ผู้ผลิตยังได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาราคาของพัดลมชนิดนี้ที่ไม่ได้รวมราคาของมอเตอร์ โดยตัวพัดลมทำมาจากวัสดุFRP (Fiber Reinforce Plastic) (Vatavuk, 1990)

$$EC = 53.7D^{1.38} \quad (99)$$

เมื่อ $12.25 \leq D \leq 36.5$

ปีอ้างอิง : April 1988

4.2.2 พัดลมแบบซี่ใบพัดหน้าตรง (Radial Blade) สำหรับการประเมินราคาของพัดลมชนิดนี้โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ A, B ดังแสดงในตารางที่ 7

$$EC = aD^b \quad (100)$$

D= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อพัดลม, ft

a, b= ค่าคงที่ (Correlation Parameters) ตามชนิดของพัดลม ในตารางที่ 7

ปีอ้างอิง : July 1988

ตารางที่ 7 ค่าคงที่ของพัดลมแต่ละชนิด

Group	A	B
Static Pressure (in)	2 – 22	20 - 32
Gas Flow Rate(ft ³ /min)	700 - 27,000	2,000 - 27,000
Correlation Parameters		
a	6.41	22.1
b	1.81	1.55
Range D(inch)	19.125 - 50.5	19.25 - 36.5

ที่มา : Vatavuk (1990)

ราคาเฉพาะมอเตอร์สามารถประเมินได้จากสมการที่เสนอโดย Murphy-Rodgers (Vatavuk, 1990) สำหรับราคามอเตอร์ 3 เฟสที่ผลิตจาก เหล็กคาร์บอน ขับเคลื่อนโดยใช้ระบบสายพาน (V-belt) มีขนาดในช่วง 1-150 hp สามารถหาได้จาก

$$\text{Low hp price} = 235(\text{hp})^{0.256} \quad (101)$$

เมื่อ $1 \leq \text{hp} \leq 7.5$

$$\text{High hp price} = 94.7(\text{hp})^{0.821} \quad (102)$$

เมื่อ $7.5 \leq \text{hp} \leq 150$

hp = กำลังของมอเตอร์, hp

ปีอ้างอิง : February 1988

เนื่องจากพัดลมเป็นเพียงอุปกรณ์ที่เป็นตัวช่วยในการทำงานของระบบบำบัดมลพิษอากาศเท่านั้นและมีราคาน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของระบบบำบัดมลพิษอากาศ ดังนั้นจึงรวมราคาคิดตั้งพัดลมไว้ในราคาของการติดตั้งระบบ แต่ในบางกรณีที่ต้องคำนวณราคาของพัดลมแยกต่างหาก (เช่น ในบางระบบมีอายุการทำงานที่ยาว และต้องติดตั้งพัดลมใหม่) ราคาของการติดตั้งพัดลมจะคิดเป็น 25-100 % ของราคาพัดลม และช่วงอายุของพัดลมจะอยู่ที่ 12-30 ปี (Vatavuk, 1990)

5. การประเมินราคาเวทสครับเบอร์

การประเมินราคาเวทสครับเบอร์แบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ การประเมินราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด และการประเมินค่าใช้จ่ายรายปี

5.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด (Total Capital Investment, TCI) สามารถหาได้จาก

$$\text{TCI} = \text{DC} + \text{IC} \quad (103)$$

DC = ราคาในการติดตั้งอุปกรณ์โดยตรง, USD

IC = ราคาในการติดตั้งอุปกรณ์โดยอ้อม, USD

โดยทั่วไปในการติดตั้งอุปกรณ์เวทสครับเบอร์แบบเปียกจะไม่มีอาคารหรือโรงเรือนและไม่มีการเตรียมพื้นที่

5.1.1 ราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ (Purchased Equipment Cost) ราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ หมายถึง ราคาของอุปกรณ์ ค่าขนส่งภาษี รวมทั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน โดยราคาทั้งหมดจะสามารถหาได้เมื่อทราบราคาของอุปกรณ์แล้วคูณด้วยแฟกเตอร์ เพื่อหา

ราคาของส่วนที่เหลือ โดยแฟลคเตอร์ที่ใช้คูณเพื่อคำนวณหาราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 รายการค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้ออุปกรณ์และแฟลคเตอร์ที่ใช้ในการคูณ

รายการค่าใช้จ่าย	แฟลคเตอร์
อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการควบคุม	0.1
ภาษี	0.03
ค่าขนส่ง	0.05

ในการประเมินราคาเวนทิวริสกรับเบอร์จะประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์ของ เวนทิวริสกรับเบอร์ ดังต่อไปนี้

- เวนทิวรีทำจากเหล็กคาร์บอน (Carbon steel)
- ระบบฉีดของเหลว (Liquid Injection System)
- โซโคลอนและอุปกรณ์กำจัดละอองน้ำที่ออกมาที่กระแสดำ

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการเดินระบบแต่ไม่ได้รวมเข้ามาในนี้ได้แก่

- ปั๊มหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle Pump)
- พัดลมเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของก๊าซ (ID fan)
- เครื่องมือและอุปกรณ์ควบคุมพื้นฐานจำพวกท่อและวาล์ว (Piping and Valves Basic Instrument and Control)

ราคาของชุดอุปกรณ์ เวนทิวริสกรับเบอร์ต่อ 1 หน่วยปริมาตรของก๊าซจะลดลงเมื่อปริมาณก๊าซที่ต้องการบำบัดมากขึ้น อย่างไรก็ตามแต่ถ้าก๊าซที่ต้องการบำบัดมีมาก อาจจะต้องมีการสร้างอาคารเพื่อรองรับขนาดของโซโคลอนที่เพิ่มขึ้น โดยราคาของอุปกรณ์ทั้งชุดดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (Vatavuk, 1990)

$$EC = 8180 + 1.41Q_G \quad (104)$$

เมื่อ $600 \leq Q_G \leq 19,000$

$$EC = 84.2Q_G^{0.612} \quad (105)$$

เมื่อ $19000 \leq Q_G \leq 59,000$

EC = ราคาโดยประมาณของชุดติดตั้งเวนทูริสกรับเบอร์, USD

Q_G = อัตราการไหลของก๊าซ, ft^3/min

ปีอ้างอิง : June 1988

สำหรับเวนทูริสกรับเบอร์ที่ทำจากวัสดุอื่นสามารถประเมินราคาได้โดยการคูณแฟกเตอร์กับราคาที่คำนวณได้จากสมการที่ (101) หรือ (102) ที่แสดงตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แฟกเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณราคาของเวนทูริที่ทำจากวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ	แฟกเตอร์
Stain Steel, 304L	1.08-1.16
Stainless Steel, 316L	1.25-1.40
Fiberglass Reinforce Plastic (FRP)	1.6
Rubber Lining	1.6
Epoxy Coating	1.1

ที่มา : EPA (2002)

5.1.2 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง (Direct and Indirect Installation Costs) ราคาในการติดตั้งโดยตรงหมายถึง ราคาของวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการติดตั้ง รวมทั้งอุปกรณ์ตัวช่วยอื่นๆ (เช่น ท่อคูด และคอมเพรสเซอร์) ฐานและโครงร่าง (Foundations and Supports) การติดตั้ง (Erection) การวางระบบไฟฟ้า (Electrical) การวางท่อ (Piping) การหุ้มฉนวนและการทาสี (Insulation and Painting) ส่วนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโดยอ้อมหมายถึง ราคาที่ใช้สำหรับ Engineering/supervision และค่าใช้จ่ายอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 4

อุปกรณ์เสริมที่ต้องการในระบบเวนทูริสกรับเบอร์ได้แก่ Pre-Cooler, Cyclone, Hoods, Stack, Gas Re-Heater ราคาสำหรับ หัวคูด ท่อ และปล่อง สามารถคิดคำนวณโดยแยกต่างหาก ค่าใช้จ่ายสำหรับไซโคลนนั้นไม่สูงมากนักและสามารถขอทราบราคาได้จากผู้ผลิต

5.2 ค่าใช้จ่ายรายปี (Annual Costs) ค่าใช้จ่ายรายปีนั้นประกอบด้วยรายจ่ายโดยตรงและโดยอ้อมและรายได้กลับคืนมา แต่เนื่องจากในเวทสกริบเบอร์ไม่มีผลพลอยได้เกิดขึ้น มีแต่ของเสียที่ต้องนำไปกำจัด ดังนั้นค่าใช้จ่ายรายปีของเวทสกริบเบอร์สามารถหาได้จาก

$$TAC = DAC + IAC \quad (106)$$

TAC = ค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด, USD/yr

DAC = ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง, USD/yr

IAC = ค่าใช้จ่ายโดยอ้อม, USD/yr

5.2.1 ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง (Direct Annual Costs) รายจ่ายรายปีโดยตรงประกอบไปด้วยสองส่วนคือ รายจ่ายที่แปรผัน (Variable) และรายจ่ายกึ่งแปรผัน (Semivariable) รายจ่ายแปรผันได้แก่ ค่าใช้จ่ายสำหรับระบบสาธารณูปโภค ค่าไฟฟ้า และ น้ำ ส่วนรายจ่ายกึ่งแปรผันได้แก่ ค่าใช้จ่ายแรงงานสำหรับการเดินระบบและการบำรุงรักษาระบบ

$$DAC = AC_{\text{labor}} + AC_{\text{maint}} + AC_{\text{elect}} + AC_{\text{water}} \quad (107)$$

AC_{labor} = ค่าแรงรายปี, USD/yr

AC_{elect} = ค่าไฟฟ้ายรายปี, USD/yr

AC_{water} = ค่าน้ำรายปี, USD/yr

AC_{maint} = ค่าบำรุงรักษารายปี, USD/yr

การประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียนั้นค่อนข้างยากเนื่องจากขึ้นกับวิธีการกำจัดและชนิดของของเสียที่ต้องการกำจัด โดยของเสียที่เป็นของเสียอันตรายอาจจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าของเสียทั่วไป

ค่าใช้จ่ายสำหรับแรงงานขึ้นกับการลักษณะของการควบคุมการทำงานของระบบด้วยในกรณีใช้ระบบควบคุมการทำงานโดยอัตโนมัติ (Automatic Control) ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จะน้อยแต่ราคาของอุปกรณ์จะสูง โดยทั่วไปในการคำนวณค่าแรงสำหรับการเดินระบบเวทสกริบเบอร์จะกำหนดให้เท่ากับ 2-8 hr/shift ค่าแรงสำหรับซูเปอร์ไวเซอร์จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 15 % ของ

ค่าแรงในการเดินและบำรุงรักษาระบบต่อกะโดยกำหนดไว้ที่ 1-2 hr ส่วนรายจ่ายสำหรับวัสดุที่ใช้ในการบำรุงรักษานั้น กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 % ของค่าแรงสำหรับการบำรุงรักษา

พลังงานและระบบสาธารณูปโภคนั้นสามารถทำการประมาณได้เมื่อทราบพลังงานที่ใช้สามารถประเมินรายจ่ายสำหรับค่าไฟและค่าน้ำได้ดังสมการ (108) และ (109)

$$AC_{\text{elect}} = 0.7457(HP_{\text{fan}} + HP_{\text{pump}})t\text{Cost}_E \quad (108)$$

$$AC_{H_2O} = V_{T(H_2O)}\text{Cost}_{H_2O} \quad (109)$$

AC_{elect} = รายจ่ายค่าไฟฟ้ารายปี, USD/yr

AC_{H_2O} = รายจ่ายค่าน้ำรายปี, USD/yr

0.7457 = ค่าคงที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วยแรงม้าให้เป็น kW

HP_{fan} = กำลังของพัดลมที่ใช้ในการดูดอากาศ, hp

HP_{pump} = กำลังของปั๊มที่ใช้, hp

Cost_E = ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย, USD/kW-hr

t = ระยะเวลาในการเดินระบบ, hr/yr

Cost_{H_2O} = ราคาบน้ำต่อ 1 หน่วยปริมาตร, USD/m³

$V_{T(H_2O)}$ = ปริมาตรของน้ำที่ใช้ทั้งหมดต่อปี, USD/yr

5.2.2 ค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อม (Indirect Annual Costs) รายการรายจ่ายโดยอ้อมรายปีของเวนทูริสกรับเบอร์ได้แสดงในตารางที่ 6 โดยสามารถคำนวณหาได้จาก Total Capital Investment ส่วนค่าโสหุ้ยจะคิดจากรายจ่ายค่าแรงและวัสดุที่ใช้

6. การประเมินราคา Packed Bed Column

6.1 ราคาค่าต้นทุนทั้งหมด (Total Capital Investment) ต้นทุนทั้งหมดในการติดตั้ง Packed Bed Column ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายดังต่อไปนี้

6.1.1 ราคาอุปกรณ์ ผู้ผลิต Packed Bed Column ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับการประเมินราคาของ Packed Bed Column ที่ทำมาจาก Fiberglass Reinforce Plastic (FRP) ราคาที่ได้จากสมการได้รวมราคาของอุปกรณ์ต่างๆ ไว้ ดังนี้

- คอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซึม (Absorption Column Shell)
- ทางเข้าและทางออกของก๊าซ (Gas Inlet and Outlet Ports)
- ทางเข้าและทางออกของของเหลว (Liquid Inlet and Outlet Ports)
- ถาดสำหรับรองรับตัวกลาง 2 ถาด (Support Plate)
- อุปกรณ์กำจัดละอองน้ำที่หลุดออกไปกับของเหลว (Mist Eliminator)
- ท่อภายในคอลัมน์ (Internal Piping)
- Sump Space
- Platform and ladders

โดยราคาของอุปกรณ์สามารถหาได้จาก

$$TTC = 115S \quad (110)$$

TTC = ราคาของคอลัมน์
S = พื้นที่ผิวของหอดูดซึม

โดยสมการข้างต้นสามารถใช้ได้ในกรณีพื้นที่ผิวของหอดูดซึมมีค่าอยู่ในช่วง 69 ft^2 - 1507 ft^2 เท่านั้น และในกรณีที่ต้องการประเมินราคาของอุปกรณ์ที่มีคอลัมน์ทำจากวัสดุชนิดอื่นจะต้องทำการปรับค่าด้วยการคูณด้วยแฟกเตอร์ ดังต่อไปนี้

- 304 Stainless Steel 1.10-1.75
- Polypropylene 0.80-1.10
- Polyvinylchloride 0.5-0.9

ดังนั้นราคาของคอลัมน์ที่ผลิตจากวัสดุอื่นนอกจาก FRP หาได้จาก

$$TTC_m = CF \times TTC \quad (111)$$

TTCm= ราคาของคอลัมน์, USD

CF= Cost Factor

TTC= ราคาของคอลัมน์ที่ทำจาก FRP, USD

ราคารวมของชุดติดตั้ง Packed Bed Column ทั้งหมดสามารถคำนวณได้จาก

$$EC=TTC+Packing Costs +Auxiliary Equipments \quad (112)$$

สมการที่ 106 หมายถึงราคาที่ของคอลัมน์และอุปกรณ์อื่นๆดังที่กล่าวข้างต้นเท่านั้น การประเมินราคาของ Packed Bed Column ทั้งระบบ (สมการที่ 110) จะต้องรวมเอาราคาของอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ราคาของตัวกลาง (Packing Cost) และราคาของอุปกรณ์เสริม (Auxiliary Equipment) ได้แก่ ปัมพ์ พัดลม และ อุปกรณ์อื่นๆ จะต้องประเมินราคาโดยคิดแยกแต่ละอุปกรณ์ ยกตัวอย่างเช่น ราคาของเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบ

โดยราคาที่เสนอโดยผู้ผลิต (Vendor) จะมีค่าประมาณ 1,000 - 10,000 USD เมื่อรวมราคาค่าขนส่ง ภาษี เครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน ราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ Packed Bed Column (PEC) มีค่าเท่ากับ

$$PEC=(1+0.1+0.03+0.05)EC=1.18EC \quad (113)$$

6.1.2 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง (Installation Costs) ราคาในการติดตั้งหาได้จากการคูณแฟกเตอร์กับราคาในการสั่งซื้ออุปกรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยเลือกใช้ค่าของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศชนิด Absorber

6.2 การประมาณค่าใช้จ่ายรายปี ค่าใช้จ่ายรายปีในการเดินระบบ Packed Bed Column ประกอบไปด้วย รายจ่ายดังต่อไปนี้

6.2.1 ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง (DC) รายจ่ายรายปีโดยตรง หมายถึง รายจ่ายที่ใช้ในการเดินระบบได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าวัสดุ ตัวทำละลายที่ใช้ (Solvent) ค่าใช้จ่ายรายปีของสารละลายที่ใช้ (C_s) สามารถหาได้จากสมการที่ (114)

$$C_s = LWF(t_{yr})(C_{sunit}) \quad (114)$$

L = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายที่ใช้, m^3/hr

t_{yr} = ระยะเวลาที่เดินระบบ, hr/yr

C_{sunit} = ราคาสารละลาย, USD/m^3

WF = สัดส่วนสารละลายที่เสียไป

สัดส่วนสารละลายที่สูญเสียไปโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่า 0.1-10% ของสารละลายทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ (EPA, 2002)

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการดูดซึมจะคำนวณหาได้จากพลังงานของพัดลมที่ใช้เพื่อดูดอากาศและพลังงานของปั๊มสำหรับสูบของเหลว

6.2.2 ค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อม (Indirect Annual Costs) ข้อมูลรายการและวิธีการคำนวณค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อมแสดงไว้ในตารางที่ 6

7. การประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอ

7.1 ราคาต้นทุนทั้งหมด (Total Capital Investment) ต้นทุนทั้งหมดของเตาเผาก๊าซและไอ หมายถึง ต้นทุนในการซื้อเตาเผาและอุปกรณ์ช่วยทั้งหมดรวมถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโดยตรงและโดยอ้อม

7.1.1 ราคาอุปกรณ์ (Equipment Cost) เตาเผาแบบใช้ความร้อนและเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา นิยมขายเป็นชุด ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- ส่วนที่ใช้ในการเผาไหม้ (Combustion Unit) และ หัวเผา (Burner) โดยห้องเผาไหม้จะทำมาจากวัสดุ เหล็กคาร์บอน หรือ สเตนเลสที่ทนความร้อน รวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือ Preheater
- พัดลม และ มอเตอร์
- เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม (Instrumentation and Controls)
- ปล่องขนาดความสูง 10 ft

- Filter/Mixer เพื่อให้ก๊าซเกิดการผสม ป้องกันการอุดตันของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังช่วยในการกำจัดอนุภาคที่ไม่สามารถทำการเผาไหม้ได้ (สำหรับเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา)

นอกจากอุปกรณ์ที่มีในชุดของเตาเผาที่กล่าวมาข้างต้นนี้แล้ว ยังมีอุปกรณ์ช่วยอื่นๆที่จำเป็นซึ่งต้องซื้อแยกต่างหาก เช่น ท่อที่ใช้ในการดูดอากาศ (Ductwork)

ก. เตาเผาความร้อน (Thermal Incinerator) ราคาของเตาเผานี้ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านเข้าไปในเตาเผาและประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ สมการประเมินราคาจากผู้ผลิตได้เสนอไว้ คือ

$$EC=10,294Q_{tot}^{0.2355} \quad HR=0 \% \quad (115)$$

$$EC=13,149 Q_{tot}^{0.2609} \quad HR=35 \% \quad (116)$$

$$EC=17,056 Q_{tot}^{0.2502} \quad HR=50 \% \quad (117)$$

$$EC=21,342 Q_{tot}^{0.2500} \quad HR=70 \% \quad (118)$$

Q_{tot} = อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าเตาเผาทั้งหมด, ft^3/min

HR = ประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่, %

ข. เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incinerator) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ Fixed Bed, Catalytic Monolith และ Fluidized Bed การประเมินราคาของอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่เตาเผา เช่นเดียวกันกับเตาเผาแบบใช้ความร้อน (EPA, 2002)

1) Fixed bed และ Catalytic Monolith มีรูปแบบสมการในการประเมินราคาจากผู้ผลิตได้แก่

$$EC=1105Q_{tot}^{0.5471} \quad HR=0 \% \quad (119)$$

$$EC=3623Q_{tot}^{0.4189} \quad HR=35 \% \quad (120)$$

$$EC=1215Q_{tot}^{0.5575} \quad HR=50 \% \quad (121)$$

$$EC=1443Q_{tot}^{0.5527} \quad HR=70 \% \quad (122)$$

โดย Q_{tot} มีค่าอยู่ในช่วง 2,000 ft³/min-50,000 ft³/min

2) Fluidized-Bed Catalyst ข้อดีของ Fluidized-Bed Catalyst เมื่อเปรียบเทียบกับ Fixed-Bed Catalyst คือ สามารถรองรับกระแสก๊าซที่มีอนุภาคเจือปนและมีค่าความร้อนสูง ดังนั้นราคาจึงสูงกว่า รูปแบบสมการในการประเมินราคาจากผู้ผลิต (EPA, 2002) คือ

$$EC=8.48 \times 10^4 + 13.2Q_{tot} \quad HR=0 \% \quad (123)$$

$$EC=8.84 \times 10^4 + 14.6Q_{tot} \quad HR=35 \% \quad (124)$$

$$EC=8.66 \times 10^4 + 15.6Q_{tot} \quad HR=50 \% \quad (125)$$

$$EC=8.39 \times 10^4 + 19.2Q_{tot} \quad HR=70 \% \quad (126)$$

โดย Q_{tot} มีค่าอยู่ในช่วง 2,000 ft³/min - 25,000 ft³/min

7.1.2 ราคาในการติดตั้ง (Installation Costs) ราคาในการติดตั้งเตาเผาแบบใช้ความร้อน และเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้โดยการคูณค่าแฟกเตอร์กับค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้ออุปกรณ์ทั้งหมด (PE) ดังแสดงในตารางที่ 4

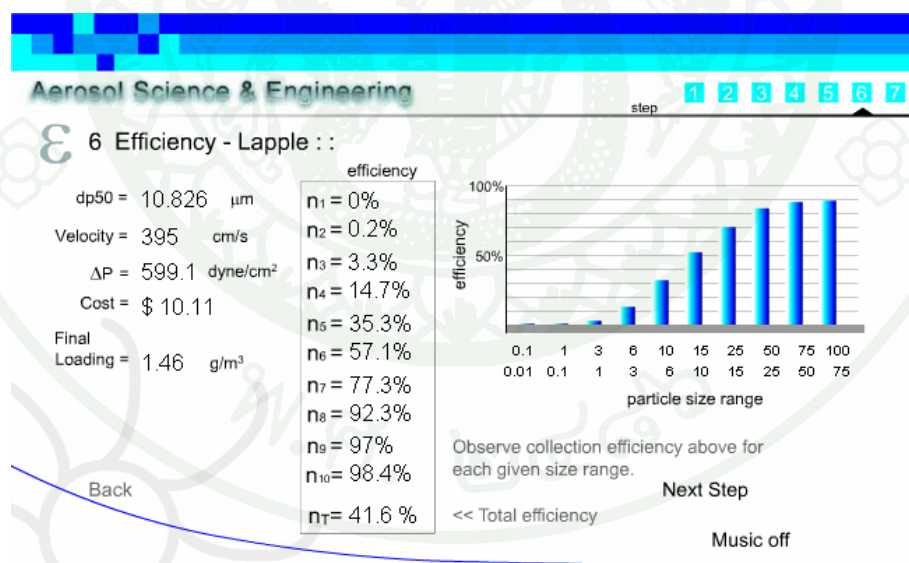
7.2 การประมาณค่าใช้จ่ายรายปี (Total Annual Cost Estimation) รายจ่ายรายปีในการเดินระบบเตาเผาแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ รายจ่ายรายปีโดยตรงและรายจ่ายรายปีโดยอ้อม รายละเอียดและค่าแฟกเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณประเมินค่าใช้จ่ายรายปีจะแสดงไว้ในตารางที่ 6

การประมาณรายจ่ายสำหรับค่าไฟฟ้ารายปีจะต้องทราบค่าความดันสูญเสียที่เกิดภายในเตาเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น อัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิและความหนืดของก๊าซ แต่เราสามารถประมาณค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเตาเผาและ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างคร่าวๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินรายจ่ายค่าไฟฟ้าได้ ดังนี้ (Katari *et al.*, 1987)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบระบบบำบัดมลพิษอากาศ

ตัวอย่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศที่ได้มีการพัฒนาขึ้นแล้ว ได้แก่

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบไซโคลน (National Science Foundation, 2005)



ภาพที่ 19 โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบไซโคลน

ภาพที่ 19 แสดงภาพหน้าต่างที่แสดงผลลัพธ์โปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบไซโคลนโดยภายในโปรแกรมจะประกอบด้วยหน้าต่างเพื่อให้ผู้ใช้ เลือกชนิดของไซโคลนที่ต้องการออกแบบ จากนั้นทำการกรอกข้อมูลอัตราการไหลของก๊าซ ข้อมูลการกระจายฝุ่น และขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของตัวไซโคลน จากนั้นโปรแกรมจะทำการประมวลผลโดยแสดง ประสิทธิภาพย่อย และ ประสิทธิภาพรวมในการกำจัดฝุ่น ค่าความดันสูญเสีย และความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากไซโคลน

2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสาร ในตัวกลางที่บรรจุอยู่ใน Packed Bed Column (Laval University, 2001)

Randomly Packed Bed Simulator
Hydrodynamics & Mass transfer

Contributors:
Simon Piché, Faïçal Larachi & Bernard Grandjean
Department of Chemical Engineering
Laval University Québec Canada G1K 7P4
http://www.gch.ulaval.ca/~flarachi
http://www.gch.ulaval.ca/~grandjean
Contact: flarachi@gch.ulaval.ca - Tel (418) 656 3566
Fax (418) 656 5993
Version 01-11-2001
The neural network correlations, implemented in this simulator, have been developed using NRI software: http://www.gch.ulaval.ca/~nri/

LIQUID PROPERTIES
Density, ρ_L (kg/m³) 1000
Viscosity, μ_L (kg/m.s) 1.00E-03
Surface tension, σ_L (N/m) 7.30E-02
Diffusion coefficient, D_L (m²/s) 1.00E-09
Mass flow rate, L (kg/m².s) 10.0

GAS PROPERTIES
Density, ρ_G (kg/m³) 1.200
Viscosity, μ_G (kg/m.s) 1.80E-05
Diffusion coefficient, D_G (m²/s) 1.00E-05
Mass flow rate, G (kg/m².s) 1.200

PACKING PROPERTIES
Bed porosity, ϵ (-) 0.965
Bed spec. surface area, a_T (m²) 181
Packing sphericity, ϕ (-) 0.070
Packing factor, Q (m²) 124

BED PROPERTIES
Column diameter, D_C (m) 0.500
Bed height, Z (m) 1.000
Partition coefficient, m (-) 1.10E-01

OWN BED PROPERTIES
FLOODING CAPACITY [1] - G_{FL} (kg/m².s) 2.452
LOADING CAPACITY [2] - G_{LD} (kg/m².s) 1.654
LIQUID HOLD-UP [3] - h_L (%) 7.4%
PRESSURE DROP [4] - $\Delta P/Z$ (Pa/m) 195.7
FLOW REGIME PRE-LOADING
MASS TRANSFER [5] - $k_L a_{L,G}$ (1/s) 1.77E-02
" - $k_G a_{G,L}$ (1/s) 5.85E+00
" - $k_L a_{L,G}$ (1/s) 1.72E-02
" - $k_G a_{G,L}$ (1/s) 1.57E-01
WARNINGS (I): No Warnings

INTERFACIAL AREA [6] - $a_{i,G}$ (-) 0.600
MASS TRANSFER [6] - k_L (m/s) 1.52E-04
" - k_G (m/s) 3.37E-02
MASS TRANSFER [6] - $k_L a_{L,G}$ (1/s) 1.65E-02
" - $k_G a_{G,L}$ (1/s) 3.66E+00
" - $k_L a_{L,G}$ (1/s) 1.58E-02
" - $k_G a_{G,L}$ (1/s) 1.44E-01
WARNINGS (II):

PUBLICATIONS
[1] I&EC Research, 40, 476-487 (2001)
[2] Chem. Eng. & Technol., 24(4), 373-380 (2001)
[3] Trans. IChemE, 79, 71-80 (2001)
[4] Can. J. Chem. Eng., 79, 584-594 (2001)
[5] Environ. Sci. Technol., 35, 4817-4822 (2001)
[6] I&EC Research (2002)

108.5 1
0.000151821 1.001
0.03367501 1.001

Packed bed (Random) / Validity ranges

ภาพที่ 20 โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาคุณสมบัติในตัวกลางที่ผู้ใช้เลือกเพื่อบรรจุใน Packed Bed Column

ภาพที่ 20 แสดงตัวอย่างโปรแกรมคำนวณหาคุณสมบัติของตัวกลางชนิดต่างๆที่ผู้ใช้เลือกเพื่อบรรจุใน Packed Bed Column โดยในโปรแกรมจะให้ผู้ใช้กรอกคุณสมบัติของก๊าซ ของเหลว หรือสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม ค่าความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์ ผลการคำนวณจากโปรแกรม ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสาร ความดันสูญเสีย เป็นต้น

3. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาความดันสูญเสียในอุปกรณ์เวนทูรีส ทรัมเบอร์ (A.J. Design Software, 2002)

Venturi Scrubber Design Equations Formulas Calculator
Air Filtration, Quality, Purification and Pollution Control

Solving for estimated pressure drop

$$P_{drop} = 10^{-6} v^2 L$$

← สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความดันสูญเสียของโปรแกรม

Inputs:

gas velocity (v) meter/second

water to gas volume ratio (L) liter/meter^3

Conversions:

v = 100 meter/second = 10000 centimeter/second
L = 1 liter/meter^3 = 1 liter/meter^3

Solution:

estimated pressure drop (P_{drop}) = 100 centimeter

ภาพที่ 21 โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาความดันสูญเสียในเวนจูรีสครับเบอร์

ภาพที่ 21 แสดงตัวอย่างโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณหาความดันสูญเสียที่เกิดในเวนจูรีสครับเบอร์ โดยให้ผู้ใช้งานกรอกข้อมูล ค่าความเร็วของก๊าซ และสัดส่วนอัตราการไหลของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนคอของเวนจูรีสครับเบอร์ โดยใช้สมการที่ปรากฏในภาพที่ 21

4. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบระบบกำจัดฝุ่น (จิตติมา, 2547) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการคำนวณออกแบบและประเมินราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น ได้แก่ เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบเวทสครับเบอร์ เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบถุงกรอง และเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ โดยโปรแกรมจะประมวลผลเป็น วิธีการหรือกระบวนการบำบัดที่เหมาะสม ขนาดของระบบ และค่าใช้จ่ายในการลงทุน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) 1 ชุดประกอบด้วย
 - 1.1 RAM มีความจำอย่างน้อย 64 MB
 - 1.2 อุปกรณ์บันทึกในลักษณะหน่วยความจำสำรอง (hard disk) มีขนาดอย่างน้อย 10.3 GB ขึ้นไป หรือควรมีที่ว่างมากกว่า 1.2 GB ขึ้นไป
 - 1.3 จอภาพสี (VGA color monitor) มีขนาดอย่างน้อย 14 นิ้ว
 - 1.4 เครื่องประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ (Microprocessor) ชนิด Intel Pentium III ซึ่งมีความถี่อย่างน้อย 760 MHz
 - 1.5 เครื่องพิมพ์ (Printer) 1 เครื่อง
 - 1.6 ซีดีรอม (CD-ROM) ขนาด 48x ขึ้นไป
2. แผ่นจานแม่เหล็กสำหรับเก็บข้อมูล (Diskette)
3. ชุดติดตั้ง Visual Studio ประกอบด้วยชุดติดตั้ง Visual Studio เวอร์ชัน 6.0
4. ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ของไมโครซอฟท์เท่านั้น ได้แก่ Window95, 98, XP
5. ระบบการจัดการฐานข้อมูล คือ Microsoft Access 97 หรือ 2000 ขึ้นไป

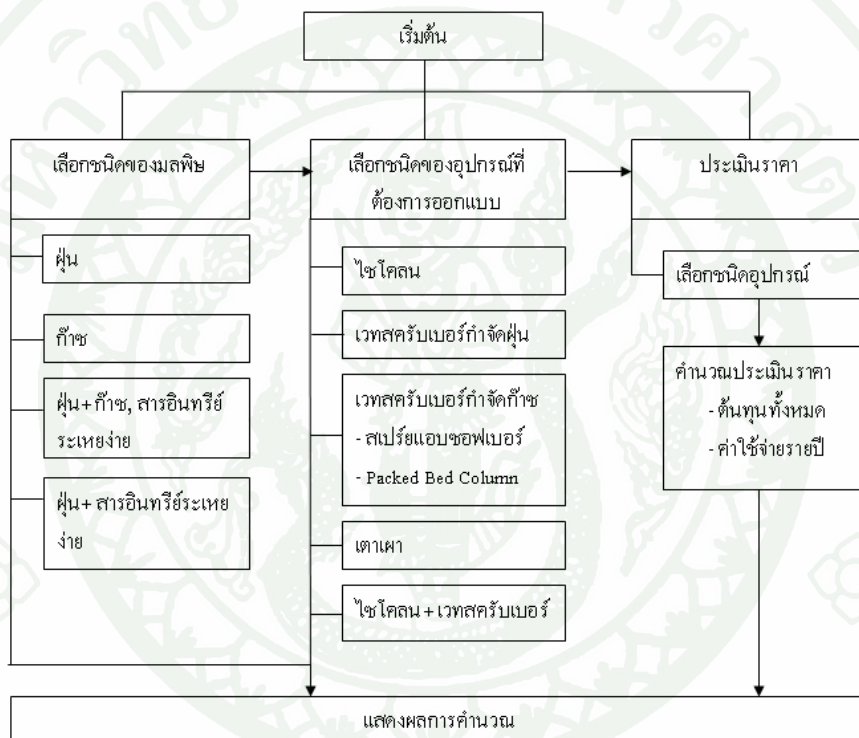
วิธีการ

1. ขั้นตอนการวิจัย งานวิจัยดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้
 - 1.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดมลพิษทางอากาศทั้ง 3 ชนิด เพื่อนำมาเป็นแนวคิดในการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์
 - 1.2 ศึกษาการคำนวณการออกแบบ ข้อดี ข้อเสีย ลักษณะการทำงาน รวมถึงเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ
 - 1.3 ศึกษาทฤษฎีการเขียนโปรแกรมด้วยคำสั่ง ภาษาเบสิก
 - 1.4 เขียนผังงาน (Flow chart) สำหรับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
 - 1.5 สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากผังงานที่ทำการออกแบบไว้
 - 1.6 ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยมือ

1.7 ประเมินค่าและผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของโปรแกรม รวมถึงการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

1.8 สรุปผลและจัดทำรายงานการศึกษา

2. ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม



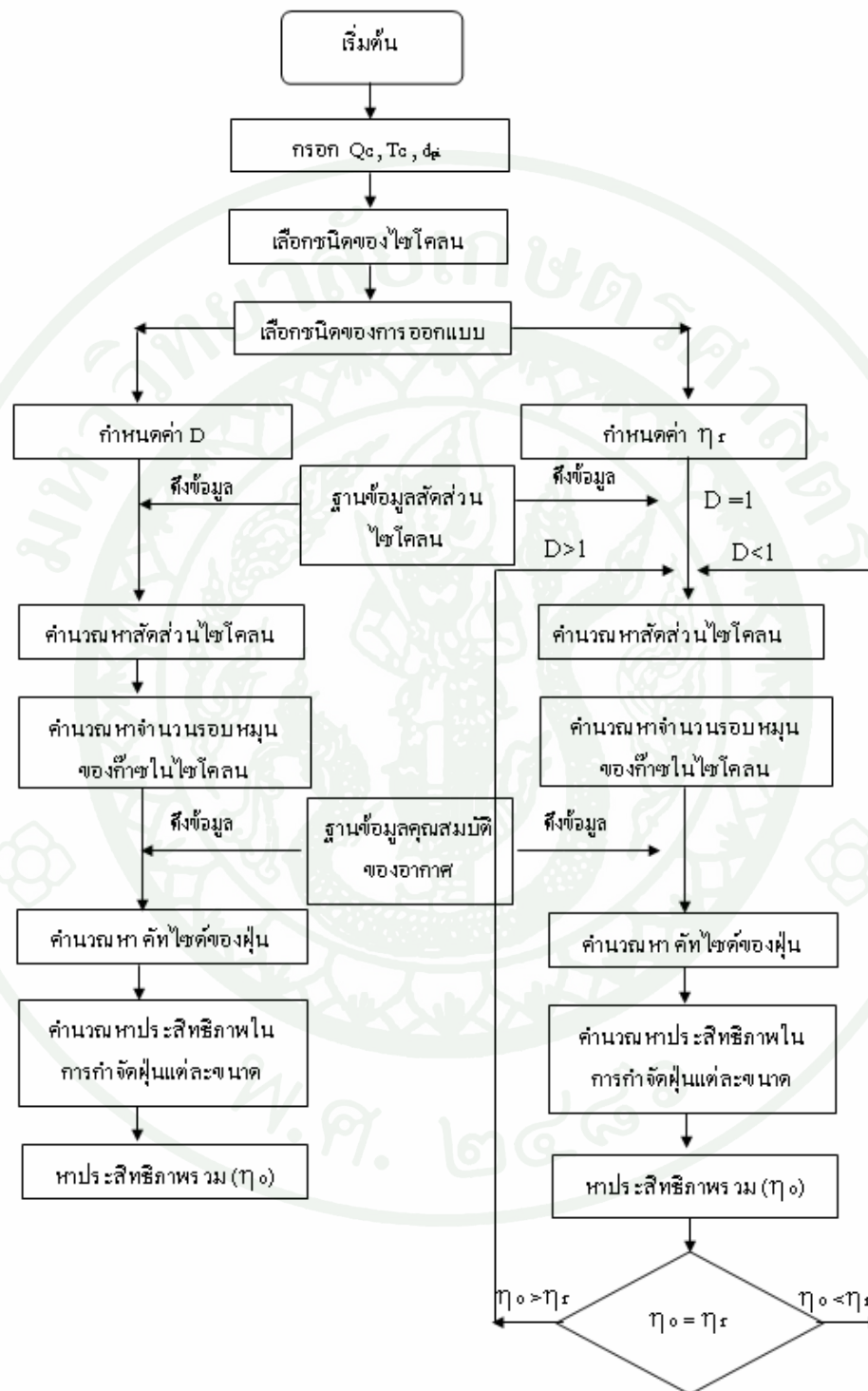
ภาพที่ 22 แผนผังการทำงานโดยรวมของโปรแกรม

พารามิเตอร์ที่ต้องใส่เข้าไปสำหรับการประมวลผลของโปรแกรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแสดงในภาคผนวก ข

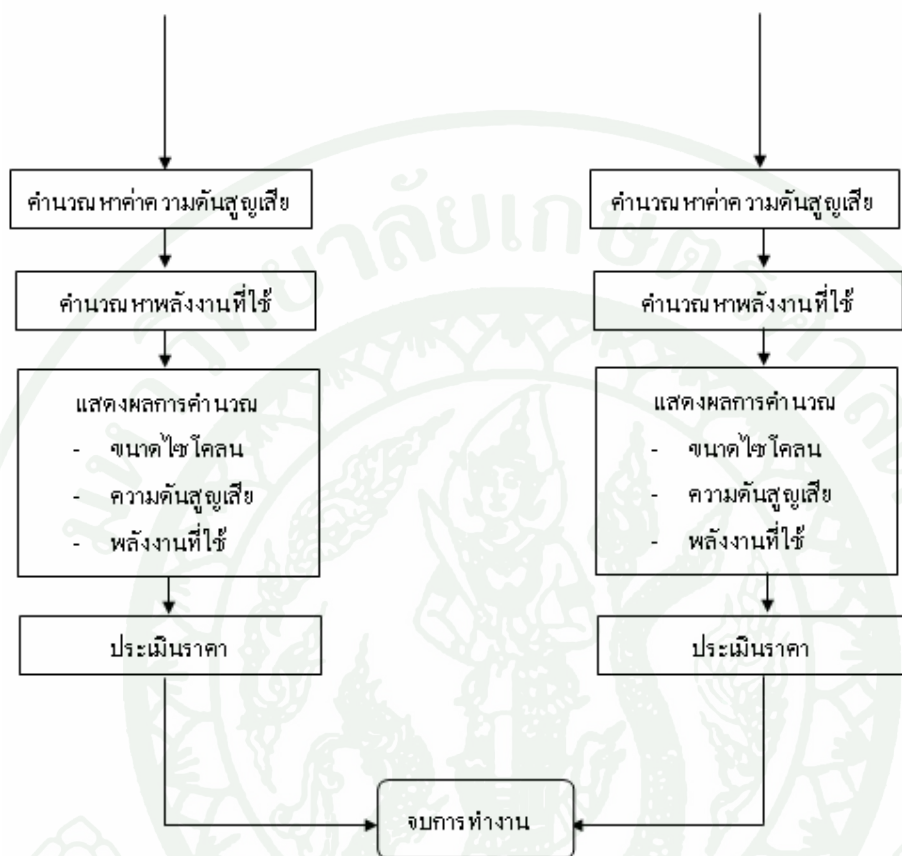
3. การคำนวณออกแบบไซโคลน หลักการและแนวคิดในการออกแบบไซโคลนจะใช้วิธีและขั้นตอนการคำนวณที่ปรากฏในหนังสือ Air Pollution Control (Cooper and Alley, 1994) และเพื่อให้ผู้ใช้สามารถที่จะทำการกำหนดประสิทธิภาพฝุ่นในการกำจัดฝุ่นของไซโคลนได้ ดังนั้นจึงมีการคำนวณแบบลองผิดลองถูก (Trial-and-Error) โดยการกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของไซโคลนมีค่าเท่ากับ 1 หากค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่คำนวณมีค่าน้อยกว่าที่ผู้ใช้ต้องการ โปรแกรมจะทำการคำนวณซ้ำโดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนที่มีค่าน้อยกว่า 1 ในทางตรงกันข้าม หากประสิทธิภาพที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าที่ผู้ใช้ต้องการ โปรแกรมจะทำการคำนวณซ้ำและกำหนดให้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนมีค่ามากกว่า 1 ทั้งนี้การคำนวณทั้งสองแบบจะมีการกำหนดไม่ให้ค่าความดันสูญเสียของไซโคลนมีค่ามากกว่า 16 หากมากกว่าโปรแกรมจะทำการแจ้งเตือนและแนะนำให้ผู้ใช้ทำการติดตั้งไซโคลนเพิ่ม

ในการประเมินราคาไซโคลนจะใช้สมการการประเมินราคาที่ได้จากผู้ผลิตตามที่ปรากฏในเอกสาร คู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศของ EPA (EPA, 2002)

ภาพที่ 23 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการคำนวณออกแบบไซโคลน



ภาพที่ 23 แผนผังการคำนวณการออกแบบใยโกลอน

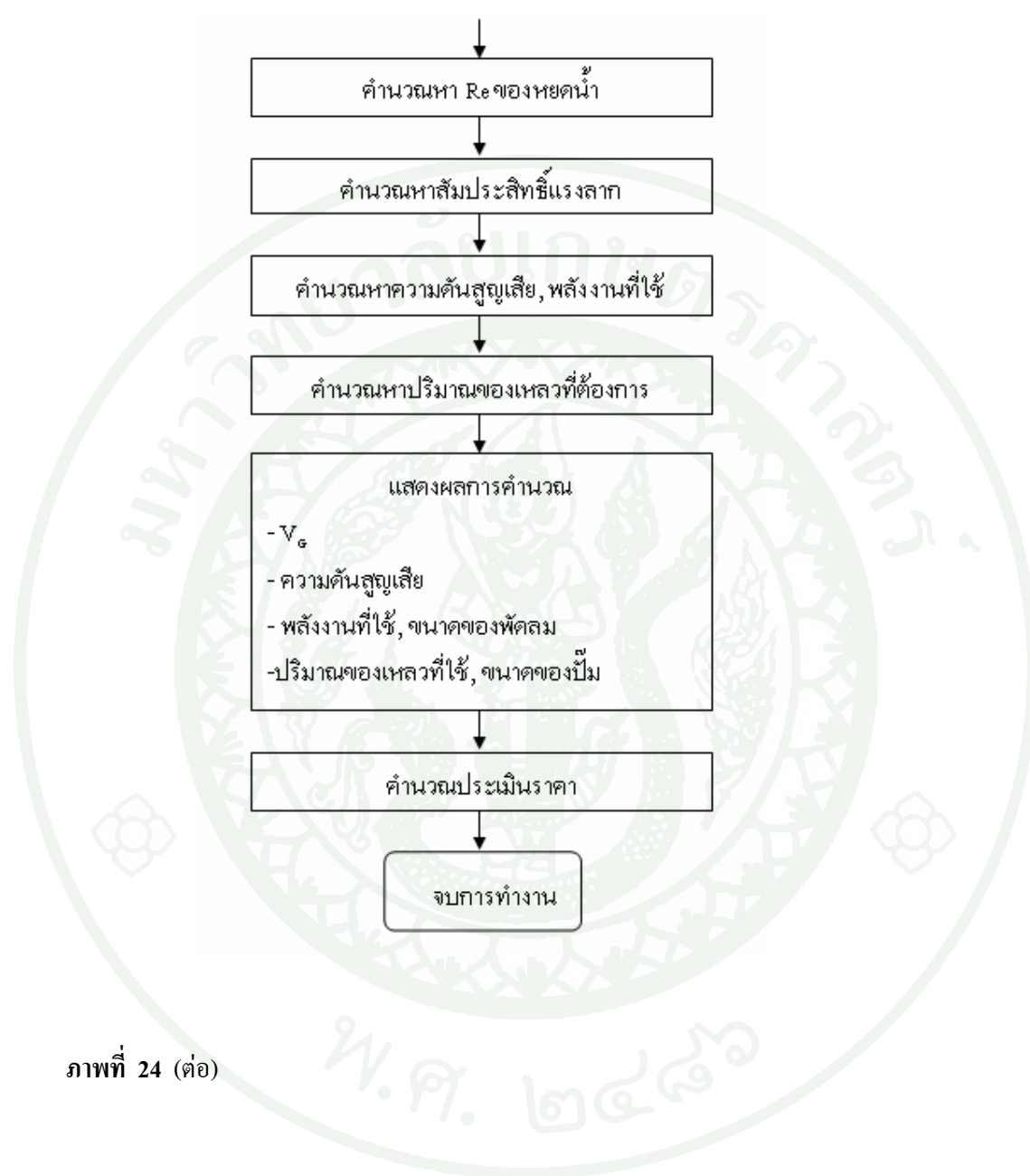


ภาพที่ 23 (ต่อ)

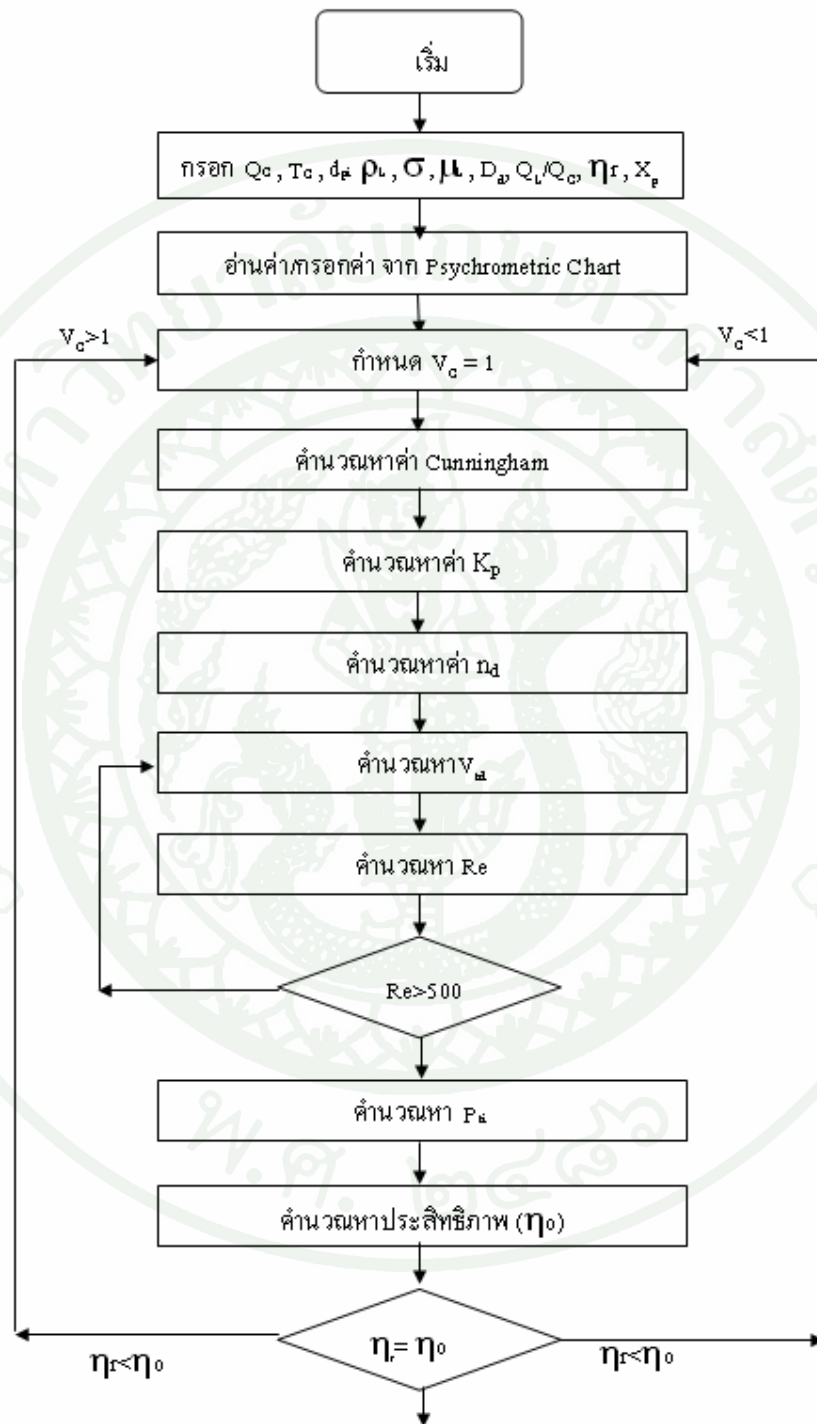
4. การคำนวณการออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น ในการออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อช่วยในการกำจัดฝุ่นใช้หลักการและสมการที่แสดงไว้ใน หนังสือ Air Pollution Control (Cooper and Alley, 1994) ซึ่งรวบรวมสมการที่ได้มีผู้ทำการศึกษาเพื่อใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ ได้แก่ การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อย (Calvert, 1977) การหาขนาดของหยดน้ำในเวนทูรีสครับเบอร์ (Nukiyama-Tanasawa, 1938) การคำนวณหาสัดส่วนอนุภาคของฝุ่นที่เวทสครับเบอร์ไม่สามารถดักจับไว้ได้ ทั้งในเวนทูรีสครับเบอร์ (Calvert, 1972) เวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวาง (Calvert, 1974) และในเวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทาง (Calvert, 1977) รวมทั้งวิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสียและอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเวทสครับเบอร์โดยการอ่านค่าจาก Psychrometric Chart

การประเมินราคาเวทสครับเบอร์จะใช้สมการการประเมินราคาที่ได้จากผู้ผลิตตามที่ปรากฏในเอกสาร คู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศของ EPA (EPA, 2002) ในการประเมินหาราคาที่ใช้ในการสั่งซื้ออุปกรณ์เวทสครับเบอร์ รวมทั้งค่าใช้จ่ายรายปีที่ใช้ในการเดินระบบเวทสครับเบอร์

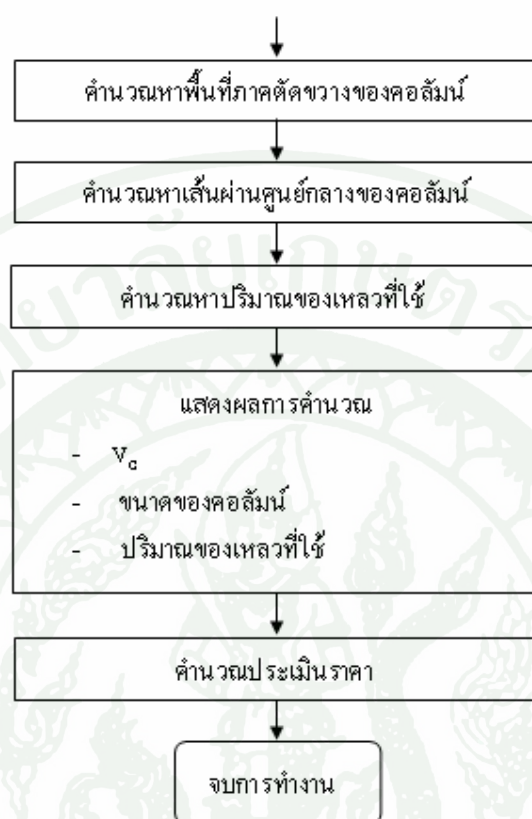
ภาพที่ 24 ถึง ภาพที่ 26 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น



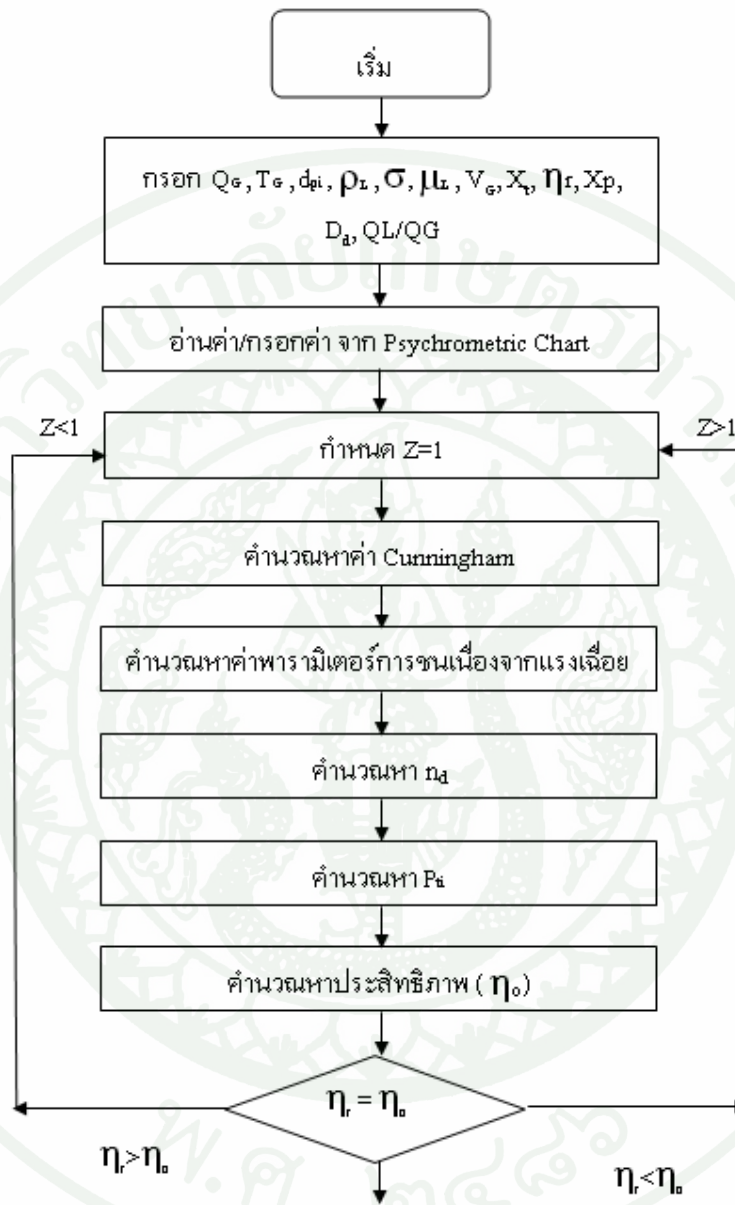
ภาพที่ 24 (ต่อ)



ภาพที่ 25 แผนผังการคำนวณออกแบบเวทสกรับเบอร์แบบไหลสวนทางเพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น



ภาพที่ 25 (ต่อ)



ภาพที่ 26 แผนผังการคำนวณออกแบบเวทสหรับเบอร์แบบไหลตามขวางเพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น

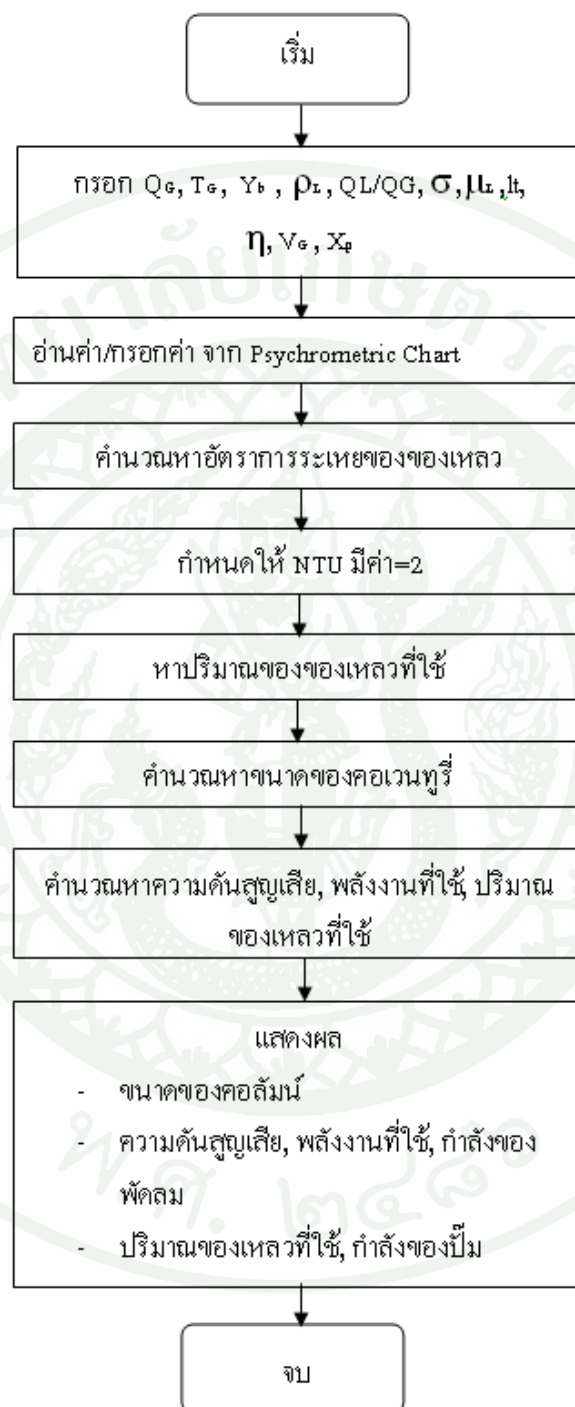


ภาพที่ 26 (ต่อ)

5. การคำนวณการออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ ในการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซชนิด Spray Absorbers จะใช้หลักการและสมการที่แสดงไว้ใน หนังสือ Introduction to Process Engineering and Design (Thakore, B. and I. Bhatt, 2009) โดยในการคำนวณเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ ในแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่สมการที่ใช้ในการคำนวณหาจำนวน Transfer units และชนิดของเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ เวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทางและเวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวางจะใช้วิธีการจำลอง (Duplicate) มาจากอุปกรณ์เวทสครับเบอร์ชนิดเดียวกันที่ได้มีการคำนวณออกแบบและใช้งานจริง ส่วนวิธีและขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากการระเหยและอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเวทสครับเบอร์จะใช้หลักการอ่านจาก Psychrometric Chart เช่นเดียวกันกับเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดฝุ่น

ในการประเมินราคาเวทสครับเบอร์จะใช้สมการการประเมินราคาที่ได้จากผู้ผลิตตามที่ปรากฏในเอกสาร คู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศของ EPA (EPA, 2002) ในการประเมินราคาที่ใช้ในการสั่งซื้อ อุปกรณ์เวทสครับเบอร์ เช่นเดียวกันกับค่าใช้จ่ายรายปีที่ใช้ในการเดินระบบเวทสครับเบอร์

ภาพที่ 27 ถึง ภาพที่ 29 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซมลพิษชนิด Spray Absorber



ภาพที่ 27 แผนผังการคำนวณออกแบบคอยวนทู้รีสครับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ



ภาพที่ 28 แผนผังการคำนวณออกแบบเวทศรับเบอร์แบบไหลสวนทางเพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ



ภาพที่ 29 แผนผังการคำนวณออกแบบเวทศรับเบอร์แบบไหลตามขวางเพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ

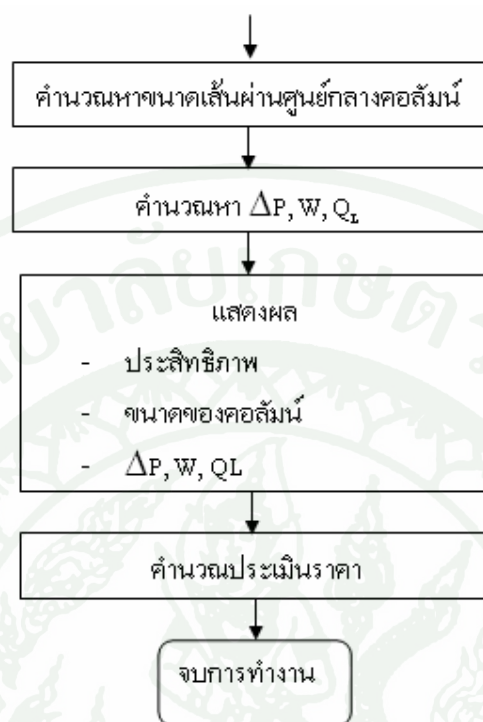
6. การคำนวณออกแบบ Packed Bed Column ในการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column จะใช้หลักการและสมการที่แสดงไว้ใน ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ (นพภาพร, 2550) ในการคำนวณหาปริมาณของของเหลวหรือสารละลายที่ใช้ ขนาดของคอลัมน์ ค่าความดันสูญเสีย นอกจากนี้ยังมีการการคำนวณหาความสูงของ Transfer Unit (Height of Transfer Unit) ของ ตัวกลางที่ใช้บรรจุในคอลัมน์โดยใช้สมการที่แสดงในคู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษ อากาศของEPA (EPA, 2002)

ในการประเมินราคา Packed Bed Column จะใช้สมการการประเมินราคาของอุปกรณ์ที่ได้ จากผู้ผลิตตามที่ปรากฏในเอกสาร คู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศของ EPA (EPA, 2002) เช่นเดียวกันกับค่าใช้จ่ายรายปีที่ใช้สำหรับการเดินระบบ Packed Bed Column

ภาพที่ 30 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อใช้ในการ กำจัดก๊าซมลพิษชนิด Packed Bed Column



ภาพที่ 30 แผนผังการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ

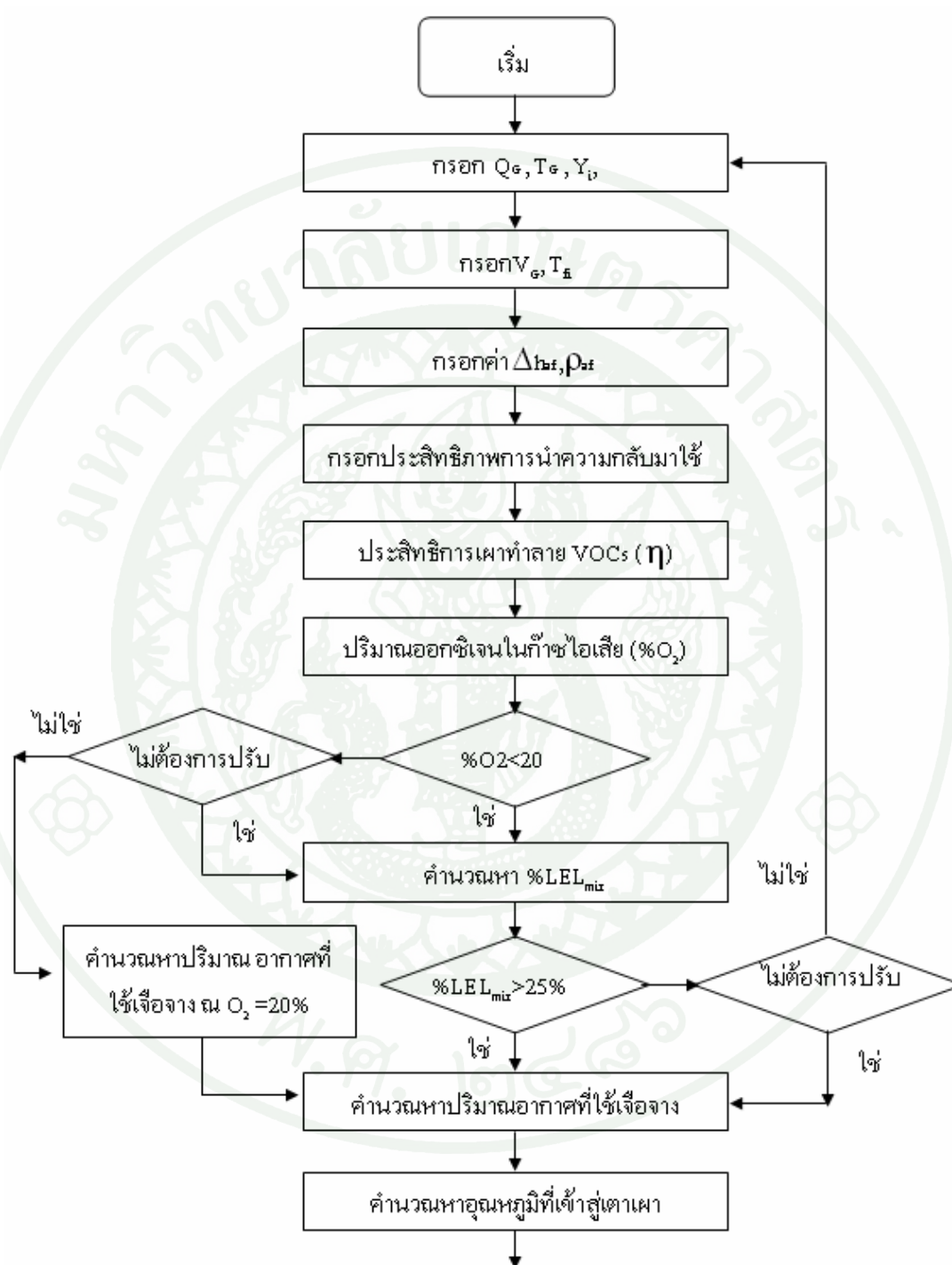


ภาพที่ 30 (ต่อ)

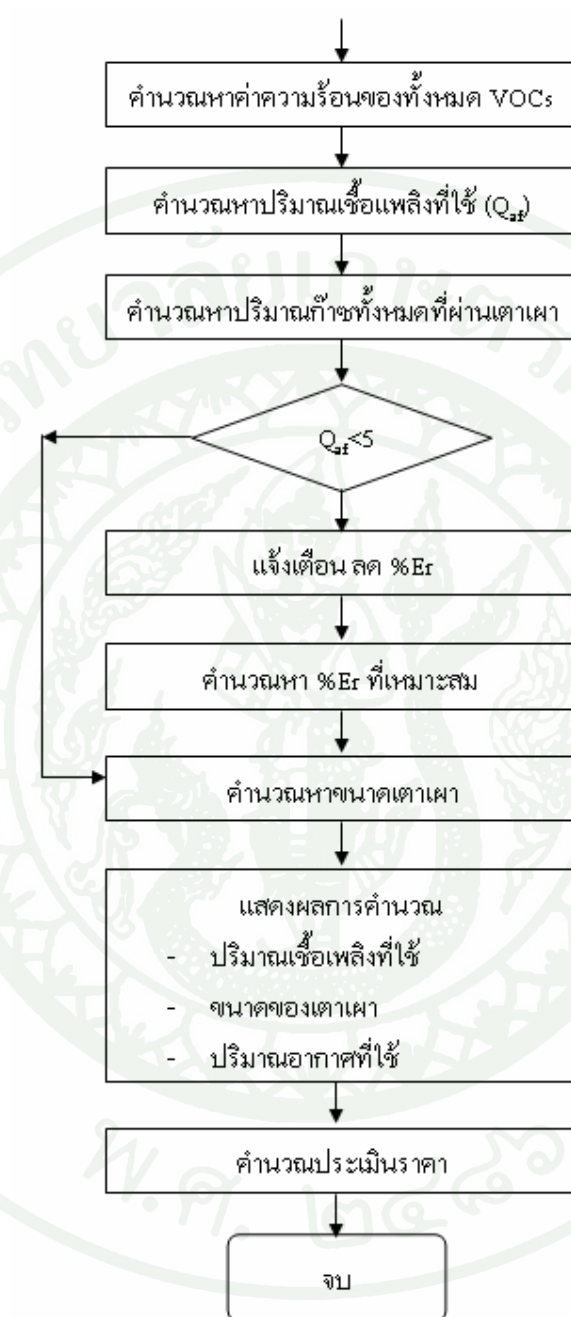
7. การคำนวณการออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ ในการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ จะใช้หลักการและสมการที่แสดงไว้ใน เอกสาร คู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศของ EPA (EPA, 2002) มาใช้ในบางส่วนของ การคำนวณ ได้แก่ วิธีหรือสมการที่ใช้สำหรับการตรวจสอบค่าปริมาณออกซิเจน ค่า Lower explosive limit (LEL) ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ทั้งหมดในก๊าซไอเสีย การตรวจสอบปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินระบบเตาเผาว่าเพียงพอหรือไม่ รวมทั้งวิธีการประมาณค่าความดันสูญเสียในเตาเผาแต่ละชนิด และบางส่วนของ การคำนวณจะนำมาจาก Air Pollution Control (Cooper and Alley, 1994) คือ วิธีการที่ใช้ในการ คำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้

ในการประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอ จะใช้สมการการประเมินราคาที่ได้จากผู้ผลิตตามที่ ปรากฏในเอกสาร คู่มือการประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศของ EPA (EPA, 2002) ในการ ประเมินหาราคาที่ใช้ในการสั่งซื้อเตาเผา เช่นเดียวกันกับค่าใช้จ่ายรายปีที่ใช้ในการเดินระบบ

ภาพที่ 31 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ



ภาพที่ 31 แผนผังขั้นตอนการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ



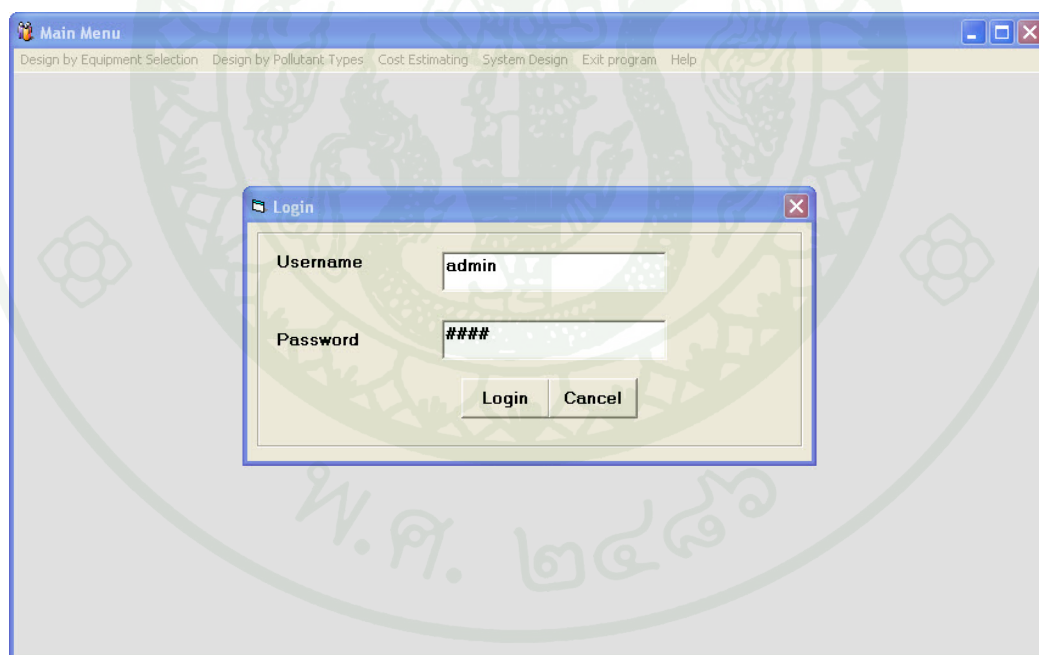
ภาพที่ 31 (ต่อ)

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการศึกษาที่ได้จากการพัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบ ไซโคลน เวทสกรับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ โดยแสดงลักษณะและขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรม ดังนี้

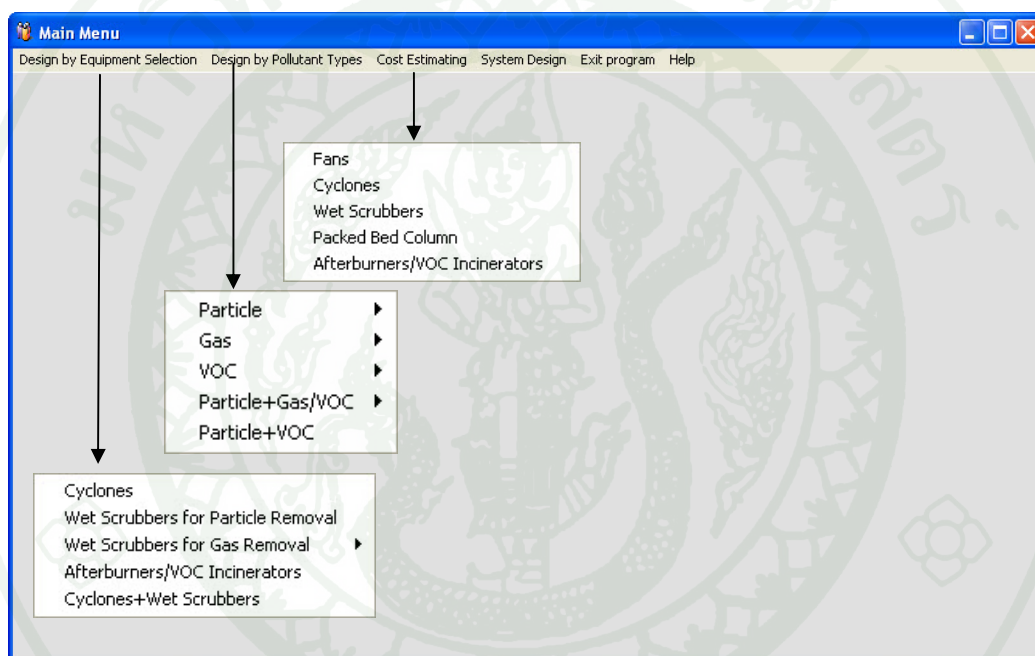
1. เริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างเพื่อให้ผู้ใช้ทำการล็อกอิน โดยการกรอกชื่อ (Username) และรหัสผ่าน (Password) เพื่อเข้าสู่หน้าต่างเมนูหลัก (Main Menu) ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 หน้าต่างล็อกอินเข้าสู่โปรแกรม

2. เมื่อผู้ใช้กรอกรหัสผ่านเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะเรียกหน้าต่าง Main Menu (ภาพที่ 33) ซึ่งจะแสดงเมนูหลัก 6 เมนูหลักให้เลือก เมนูแรกได้แก่ เมนู Design by Equipment Selection ประกอบไปด้วย 5 เมนูย่อยแสดงชนิดอุปกรณ์ให้เลือกออกแบบ เมนูหลักที่สอง คือ Design by Pollutant Types ประกอบไปด้วย 4 เมนูย่อยแสดงชนิดของมลพิษที่ผู้ใช้ต้องการบำบัด ภายในเมนู

ย่อยจะปรากฏรายชื่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดมลพิษชนิดนั้น เมนูหลักที่ 3 คือ Cost Estimating สำหรับให้ผู้ใช้เลือก เมื่อต้องการประเมินราคา ภายในเมนูจะประกอบไปด้วยเมนูย่อยแสดงรายชื่อของอุปกรณ์เพื่อให้ผู้ใช้เลือกประเมินราคา เมนูหลักที่ 4 คือ เมนู System Design สำหรับให้ผู้ใช้เลือกในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการออกแบบระบบบำบัดมลพิษอากาศ เมนูหลักที่ 5 คือ Exit Program สำหรับให้ผู้ใช้เลือกในกรณีที่ต้องการออกจากการทำงานของโปรแกรม และ เมนูหลักสุดท้าย คือ Help ซึ่งเป็นเมนูช่วยเหลือประกอบไปด้วย รายละเอียดของโปรแกรม และคู่มือการใช้โปรแกรม



ภาพที่ 33 เมนูหลักของโปรแกรม (Main Menu)

2.1 โปรแกรมออกแบบไซโคลน โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณออกแบบไซโคลน แบ่งออกเป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณออกแบบและโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินราคาไซโคลน

2.1.1 โปรแกรมคำนวณออกแบบไซโคลน การเข้าสู่หน้าต่างการออกแบบไซโคลนทำได้โดยการเลือกเมนูย่อย Cyclone จากเมนูหลัก Design by Equipment Selection หน้าต่าง Particulate detail (ภาพที่ 34) จะปรากฏขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้กรอกข้อมูล การแจกแจงขนาดของอนุภาคฝุ่น (Particle Size Distribution) ซึ่งประกอบไปด้วย ขนาดของฝุ่น (Size Range) สัดส่วนมวลร้อยละของอนุภาคฝุ่นในแต่ละช่วงขนาด (% Mass) อัตราการไหลของอากาศเสีย (Gas flow rate)

อุณหภูมิของอากาศเสีย (Gas temperature) ความดันของอากาศเสียที่เข้า (Inlet gas pressure) ค่าความหนาแน่นของฝุ่น (Particle density) และ ความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศเสีย (Particle concentration)

Particle size distribution

Size Range (micron)		% Mass
0	2	1
2	4	5
4	6	9
6	10	10
10	18	10
18	30	10
30	50	40
50	100	15
		0
		0
		100

☒ Hydrophilic particles
☐ Hydrophobic particles

Gas flow rate, m³/s: 2.5
 Gas temperature, °C: 50
 Inlet gas pressure, Pa: 101325
 Particle density, kg/m³: 1600
 Particle concentration, µg/m³: 400

Equipments
☒ Cyclone
☐ Wet Scrubber
☐ Cyclone + Wet Scrubber

Equipment selection by using particle size constraint

Back to System design Back Next Home

ภาพที่ 34 หน้าต่างข้อมูลการกระจายขนาดฝุ่นและคุณลักษณะของอากาศเสีย

จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง Cyclone (ภาพที่ 35) ภายในหน้าต่าง Cyclone ประกอบด้วย ช่องแสดงรายการซึ่งแสดงรายชื่อชนิดของไซโคลน ชนิดของพารามิเตอร์ที่ต้องการกำหนดในการออกแบบ และ ชนิดทางเข้าของไซโคลน (Inlet types) เพื่อให้ผู้ใช้เลือก เมื่อผู้ใช้ทำการเลือกและกรอกข้อมูลเรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม Cal เพื่อทำการคำนวณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม ได้แก่

- ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น (Removal efficiency)
- ความดันสูญเสีย (Pressure drop)
- พลังงานที่ใช้ (Power consumption)
- กำลังของพัดลม (Fan power)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน (Body diameter)
- ความสูงของท่อทางเข้าของไซโคลน (Height of inlet)

ความกว้างของท่อเข้าของไซโคลน (Width of inlet)

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก๊าซออกของไซโคลน (Diameter of gas exit)

ความยาว Vortex Finder ของไซโคลน (Length of vortex)

ความยาวของรูปทรงกระบอกของไซโคลน (Length of body)

ความยาวของส่วนโคนของไซโคลน (Length of cone)

ความเข้มข้นของฝุ่นที่ออก (Outlet particle concentration)

Cyclone design

High efficiency Cyclone by Stairmand

design with body diameter, m: 1.7616

design with removal efficiency, %: 69.992

Inlet types: ☒ Vane, ☐ Without Vane

Buttons: Cal, Cost, Back, Next, Home, Clear, Print, Help, Back to system design

Gas flow rate, m³/s: 2.5

Gas temperature, °C: 50

Inlet gas pressure, Pa: 101325

Particle density, kg/m³: 1600

Particle concentration, ug/m³: 400

Clear

Results

Total number of cyclone	1
Removal efficiency, %	69.992
Outlet particle concentration, ug/m ³	120.032
Pressure drop, in.H ₂ O	0.907
Power consumption, kW	0.565
Fan efficiency, %	80
Fan brake horsepower, hp	1.264

Cyclone size

Body diameter, m	1.762
Height of inlet, m	0.881
Width of inlet, m	0.352
Diameter of gas exit, m	0.881
Length of vortex, m	0.881
Length of body, m	2.642
Length of cone, m	4.404
Diameter of dust outlet, m	0.661

Preview

ภาพที่ 35 การออกแบบไซโคลนโดยการกำหนดประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นที่ต้องการ

2.1.2 โปรแกรมประเมินราคาไซโคลน หน้าต่างประเมินราคาไซโคลน คือ หน้าต่าง Cyclone Cost มีวิธีการเรียกได้สองทางได้แก่ เลือกเมนู Cost Estimation ภายในหน้าต่าง Main menu และ โดยการคลิกเลือกปุ่ม Cost ในหน้าต่างไซโคลน Cyclone โดยโปรแกรมจะแสดงค่าอัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow rate) และ ขนาดพื้นที่ทางเข้าของอากาศเสียที่เข้าสู่ไซโคลน (Inlet area) ที่ผู้ใช้กรอกและคำนวณได้จากหน้าต่าง Cyclone จากนั้นเลือกชนิดของประเภทของชุดติดตั้งไซโคลน (Cyclone package) และ กดปุ่ม Cal เพื่อคำนวณประเมินราคาในการสั่งซื้อไซโคลน โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลการคำนวณ ดังภาพที่ 36

ภาพที่ 36 หน้าต่างการประเมินราคาไซโคลน (Cyclone Cost)

2.2 โปรแกรมออกแบบเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น (Wet Scrubber for particulate removal) แบ่งออกเป็น โปรแกรมย่อยเพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบ และโปรแกรมย่อยเพื่อช่วยในการประเมินราคา

2.2.1 โปรแกรมคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น การเข้าสู่หน้าต่างการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น ทำได้โดยการเลือกเมนูย่อย Wet scrubber for particulate removal จากเมนูหลัก Design by Equipment Selection โปรแกรมจะเรียกหน้าต่าง Particulate detail (ภาพที่ 37) เพื่อให้ผู้ใช้กรอกข้อมูล การแจกแจงขนาดของอนุภาคฝุ่น (Size range) สัดส่วนมวลร้อยละของอนุภาคฝุ่นในแต่ละช่วงขนาด อัตราการไหลของอากาศเสีย (Gas flow rate) อุณหภูมิของอากาศเสีย (Gas temperature) ความดัน (Inlet gas pressure) ค่าความ

หนาแน่นของฝุ่น (Particle density) ความเข้มข้นของฝุ่น (Particle concentration) จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง Wet Scrubber

หน้าต่าง Wet Scrubber จะประกอบไปด้วยประเภทของเวทสครับเบอร์ และประเภทในการออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้เลือกความต้องการที่จะออกแบบโดยการกำหนดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของเวทสครับเบอร์ (Design by specifying required removal efficiency) หรือ ออกแบบโดยการกำหนดความเร็วของก๊าซ (Design by specifying gas velocity) นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยช่องว่างเพื่อรับข้อมูลตัวแปรจากผู้ใช้แล้วนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของเวทสครับเบอร์ที่ผู้ใช้เลือกออกแบบ ได้แก่

ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่ต้องการ (Removal efficiency required)
 อัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซ (Liquid/Gas flow rate)
 ความเร็ว ณ ส่วนคอของเวนทรี (Throat gas velocity) เมื่อเลือกออกแบบเวนทรีสครับเบอร์
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดของของเหลว (Liquid droplet size)
 ความเร็วอากาศเสียที่ไหลผ่านเวทสครับเบอร์ (Gas velocity)
 แรงดันของเครื่องสูบน้ำ (Pump head)
 ความสูงของคอลัมน์ (Height of column) เมื่อเลือกออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทาง
 ความยาวของคอลัมน์ (Length of column) เมื่อเลือกออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวาง
 ความยาวของส่วนคอเวนทรี (Throat length) เมื่อเลือกออกแบบเวนทรีสครับเบอร์
 ประสิทธิภาพของพัดลม (Fan efficiency) และ ประสิทธิภาพของปั๊ม (Pump efficiency)
 ข้อมูลคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการดักจับฝุ่น ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ (Temperature) ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) และ แรงตึงผิว (Surface tension)

หลังจากกรอกข้อมูลเรียบร้อยแล้วกดปุ่ม Cal เพื่อทำการคำนวณโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Psychrometric chart (ภาพที่ 38) เพื่อให้ผู้ใช้อ่านและกรอกข้อมูลตามคำแนะนำ หลังจากนั้นกดปุ่ม OK หน้าต่าง Psychrometric chart จะปิดลง และผลการคำนวณออกแบบของโปรแกรมจะปรากฏขึ้นที่หน้าต่าง Wet scrubber ซึ่งผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่

ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น (Removal efficiency)

ความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวทสครับเบอร์ (Outlet particle concentration)

ความดันสูญเสีย (Pressure drop)

พลังงานที่ใช้ (Power consumption)

อัตราการหมุนเวียนของของเหลวที่ใช้ (Liquid circulation rate)

ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสียจากการระเหย (Water addition from evaporation)

ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากการกระเด็นและการระบาย (Water addition from drift loss+ blown down)

กำลังของพัดลม (Fan brake horsepower)

กำลังของเครื่องสูบน้ำ (Pump brake horsepower)

ความสูงของคอลัมน์ (Height of column)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (Diameter of column)

ขนาดความกว้างของคอลัมน์ (Width of column)

ขนาดพื้นที่ของคอเวนทรี (Throat area)

หน้าต่างที่แสดงการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ทั้ง 3 ชนิดแสดงในภาพที่ 39 ภาพที่ 40 และภาพที่ 41

Particle size distribution

Size Range (micron)		% Mass
0	2	1
2	4	5
4	6	9
6	10	10
10	18	10
18	30	10
30	50	40
50	100	15
		0
		0
		100

☒ Hydrophillic particles
☐ Hydrophobic particles

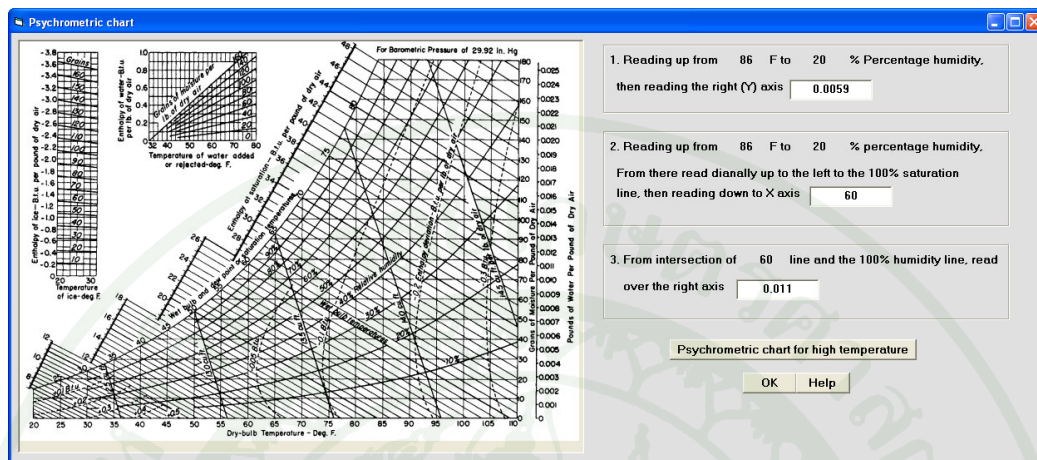
Gas flow rate, m3/s: 2.5
 Gas temperature, °C: 30
 Inlet gas pressure, Pa: 101325
 Particle density, kg/m3: 1600
 Particle concentration, mg/m3: 400

Equipments
☐ Cyclone
☒ Wet Scrubber
☐ Cyclone + Wet Scrubber

Equipment selection by using particle size constraint

Back to System design Back Next Home

ภาพที่ 37 หน้าต่างแสดงข้อมูลการกระจายขนาดของฝุ่นและคุณลักษณะของอากาศเสีย



ภาพที่ 38 Psychrometric chart

Wet Scrubber types

- ☒ Venturi Scrubber
- ☐ Countercurrent Spray Chamber
- ☐ Crossflow Spray Chamber

Buttons: Cal, Cost, Next, Clear, Home, Print, Help, Back to system design

Venturi Scrubber

Liquid / Gas flow rate, l/m3: 1

Throat gas velocity, m/s: 4.704

Design by specifying required removal efficiency, %: 70.004

Design by specifying gas velocity, m/s:

Liquid properties

Temperature, °C: 25

Viscosity, poise: 0.01

Density, kg/m3: 1000

Surface tension, dynes/cm: 72

Results

Removal efficiency, %	70.004	Water addition from drift loss+blown down, m3/hr	0.037
Outlet particle concentration, ug/m3	119.986	Fan efficiency, %	60
Exiting gas temperature, °C	15.556	Fan brake horsepower, hp	0.051
Pressure drop, in.H2O	0.04	Pump efficiency, %	60
Power consumption, kW	0.023	Pump head, m	5
Liquid circulating rate, m3/hr	9	Pump brake horsepower, hp	0.274
Water addition from evaporation, m3/hr	0.053		

Venturi Scrubber + Cyclone

Throat length, m: 0.3

Throat area, m2: 0.531

Preview

clean gas

mist eliminator

liquid to settling and recirculation

ภาพที่ 39 การออกแบบเวนจูร์สกรับเบอร์ (Venturi scrubber)

Wet Scrubber for Particulate Removal

Wet Scrubber types

- ☐ Venturi Scrubber
- ☒ Countercurrent Spray Chamber
- ☐ Crossflow Spray Chamber

Countercurrent Spray Chamber

Liquid / Gas flowrate, l/m³: 1

Liquid droplet size, micron: 500

Gas velocity, m/s: 0.773

Gas flow rate, m³/s: 2.5

Gas temperature, °C: 30

Inlet gas pressure, Pa: 101325

Percentage humidity, %: 20

Particle density, kg/m³: 1600

Particle concentration, µg/m³: 400

Design by specifying required removal efficiency, %: 69.964

Design by specifying gas velocity, m/s:

Liquid properties

Temperature, °C: 25

Viscosity, poise: 0.01

Density, kg/m³: 1000

Surface tension, dynes/cm: 72

Results

Removal efficiency, %: 69.964

Outlet particle concentration, µg/m³: 120.142

Exiting gas temperature, °C: 15.556

Pressure drop, in.H₂O: 1-2

Power consumption, kW: 0.622-1.245

Liquid circulating rate, m³/hr: 9

Water addition from evaporation, m³/hr: 0.053

Water addition from drift loss+blow down, m³/hr: 0.037

Fan efficiency, %: 60

Fan brake horsepower, hp: 1.393-2.785

Pump efficiency, %: 60

Pump head, m: 5

Pump brake horsepower, hp: 0.274

Countercurrent Spray Chamber

Height of column, m: 2

Diameter of column, m: 2.05

Preview

ภาพที่ 40 เวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทาง (Countercurrent spray chamber)

Wet Scrubber for Particulate Removal

Wet Scrubber types

- ☐ Venturi Scrubber
- ☐ Countercurrent Spray Chamber
- ☒ Crossflow Spray Chamber

Crossflow Spray Chamber

Liquid / Gas flowrate, l/m³: 1

Liquid droplet size, micron: 500

Gas velocity, m/s: 1

Gas flow rate, m³/s: 2.5

Gas temperature, °C: 30

Inlet gas pressure, Pa: 101325

Percentage humidity, %: 20

Particle density, kg/m³: 1600

Particle concentration, µg/m³: 400

Design by specifying required removal efficiency, %: 70.273

Design by specifying height of column, m:

Liquid properties

Temperature, °C: 25

Viscosity, poise: 0.01

Density, kg/m³: 1000

Surface tension, dynes/cm: 72

Results

Removal efficiency, %: 70.273

Outlet particle concentration, µg/m³: 118.909

Exiting gas temperature, °C: 15.556

Pressure drop, in.H₂O: 1-2

Power consumption, kW: 0.622-1.245

Liquid circulating rate, m³/hr: 9

Water addition from evaporation, m³/hr: 0.053

Water addition from drift loss+blow down, m³/hr: 0.037

Fan efficiency, %: 60

Fan brake horsepower, hp: 1.393-2.785

Pump efficiency, %: 60

Pump head, m: 5

Pump brake horsepower, hp: 0.274

Crossflow Spray Chamber

Length of column, m: 5

Width of column, m: 0.758

Height of column, m: 3.3

Preview

ภาพที่ 41 เวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวาง (Crossflow spray chamber)

2.2.2 โปรแกรมประเมินราคาเวทสครับเบอร์ การประเมินราคาเวนทิวรีสครับเบอร์ ผู้ใช้สามารถเข้าสู่หน้าต่างการประเมินราคาของเวทสครับเบอร์ได้ทางหน้าต่าง Main menu โดยการเลือกที่ Cost Estimation จากนั้นเลือกเมนูย่อย Venturi Scrubber หรือจะเข้าทางหน้าต่าง Wet scrubber โดยกดปุ่ม Cost เพื่อเรียกหน้าต่าง Venturi Scrubber Cost ขึ้นมา

ภาพที่ 42 แสดงหน้าต่าง Venturi Scrubber Cost หากมีการคำนวณเพื่อออกแบบ Venturi Scrubber เรียบร้อยแล้วค่าของตัวแปรบางค่าที่ผู้ใช้กรอก หรือที่คำนวณในหน้าต่าง Wet Scrubber จะถูกส่งมาแสดงผลในหน้าต่างนี้ด้วย ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้แก่ อัตราการไหลของอากาศเสีย (Gas flowrate) ปริมาณของเหลวที่ใช้ (Liquid consumption) กำลังของพัดลม (Fan brake horsepower) และกำลังของเครื่องสูบน้ำ (Pump brake horsepower) ทั้งนี้ผู้ใช้ยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่ผู้ใช้ต้องกรอกเพิ่มเติมในการประเมินราคาของเวนทิวรีสครับเบอร์ ได้แก่

อายุการใช้งานของเวนทิวรี (Equipment life time)
ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคา ณ ปี หรือ เวลาที่ต้องการทราบราคา (Cost index)
ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Operating time)
ราคาของเหลวหรือสารละลายที่ใช้ (Liquid cost)
ค่าแรง (Labor cost)
ค่าไฟฟ้า (Electricity cost)

จากนั้นเลือกชนิดวัสดุของอุปกรณ์ หากมีอุปกรณ์เสริมที่ต้องการติดตั้งเพิ่มเติมในระบบ ผู้ใช้ต้องทำการเลือกและกรอกราคาของอุปกรณ์เสริมเข้าไปด้วย จากนั้นกดปุ่ม Cal เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณและแสดงผลการคำนวณ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณประเมินค่าใช้จ่ายในอุปกรณ์เวนทิวรีสครับเบอร์ที่ได้จากโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Capital Investment) แบ่งออกเป็น ค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยตรง (Direct Costs) และค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยอ้อม (Indirect Costs)
- ค่าใช้จ่ายรายปี (Annual Cost) แบ่งออกเป็น ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง (Direct Costs) และค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อม (Indirect Costs)

Venturi Scrubber Cost

Gas flow rate, m³/s: 2.5
 Liquid consumption, m³/hr: 9
 Equipment life time, yr: 10
 Fan brake horsepower, hp: 0.051
 Fan efficiency, %: 60
 Pump brake horsepower, hp: 0.274
 Pump efficiency, %: 60

Material
☒ Carbon steel ☐ Rubber lining
☐ Epoxy coating ☐ Fiberglass reinforce plastic

Auxiliary Equipment
☒ Cyclone 0
☒ Hood 0
☒ Duct Work 0

Cost Index: 532.9
 Operating time, hr/shift: 8
 Solvent(liquid) cost, \$/m³: 0.5
 Labor cost, \$/hr: 10
 Electricity cost/unit, \$/kW-hr: 0.094

Capital Investment, \$

Direct Costs		Foundation/Support		Indirect Costs	
Equipment	24152.855		1710.022	Engineering Supervision	2850.037
Auxiliary	0		11400.148	Construction field	2850.037
Instrument	2415.286		285.004	Construction fee	2850.037
Texas	724.586		855.011	Start up	285.004
Freight	1207.643		0	Performance test	285.004
Painting	285.004		0	Contingencies	855.011
Piping	1425.018		44460.577	Total	9975.13
Total					

Annual Cost \$/year

Direct Annual Costs		Annual Cost \$/year		Indirect Annual Costs	
Electricity	199.375	Maintenance labor	16425	Administrative charge	1088.714
Solvent	39420	Maintenance material	16425	Property tax	544.357
Chemical	0	Operator labor	54750	Insurance	544.357
Water	0	Supervisor labor	8212.5	Overhead	57487.5
		Waste disposal	0	Capital recovery	7750.42
		Total	135431.875	Total	67415.348

Cal Edit Home Help Print

ภาพที่ 42 แสดงผลการประเมินราคาเวนทิวรีสครับเบอร์

2.3 โปรแกรมออกแบบเวทสครับเบอร์เพื่อช่วยในการกำจัดก๊าซ (Wet scrubber for gas removal) สามารถแบ่งออกเป็น โปรแกรมย่อยเพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซชนิดสเปรย์แอฟซอพเบอร์ และโปรแกรมย่อยเพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซชนิด Packed Bed Column

2.3.1 โปรแกรมคำนวณออกแบบสเปรย์แอฟซอพเบอร์ (Spray absorber) การเข้าสู่น้ำต่างการออกแบบสเปรย์แอฟซอพเบอร์ ทำได้โดยการเลือกเมนูย่อย Wet scrubber for gas removal จากเมนูหลัก Design by Equipment Selection จากนั้นเลือกเมนูย่อย Spray Absorbers หน้าต่าง Wet Scrubber for Gas Removal/Spray Absorber จะถูกเรียกขึ้นมา ภายในหน้าต่างจะประกอบด้วย ประเภทของสเปรย์แอฟซอพเบอร์เพื่อให้ผู้ใช้เลือกออกแบบ และช่องว่างเพื่อรับข้อมูลตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของสเปรย์แอฟซอพเบอร์ ได้แก่

อัตราการไหลของอากาศเสียหรือก๊าซไอเสีย (Gas flow rate)

อุณหภูมิของอากาศเสีย (Gas temperature)

ร้อยละความชื้นในอากาศเสีย (Percentage humidity)

ความดันของอากาศเสีย (Inlet gas pressure)

ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซมลพิษที่ต้องการ (Required removal efficiency)
 สัดส่วนโมลของก๊าซมลพิษในอากาศเสีย (Mole fraction of pollutant in inlet gas)
 น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซมลพิษ (Molecular weight of pollutant)
 ความเร็วของก๊าซในส่วนคอของเวนทูรี (Throat gas velocity) สำหรับเวนทูรีสครับเบอร์
 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ ณ จุดสมดุล (Solubility constant) หรือ ค่าความชันของเส้น
 สมดุลการละลาย (Slope of equilibrium curve)
 สัดส่วนโมลของก๊าซมลพิษในของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ (Mole
 fraction of pollutant in liquid inlet)
 สัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของอากาศเสีย (Liquid to gas ratio)
 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซมลพิษได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล (Molecular
 weight) ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) และความตึงผิว (Surface tension)

จากนั้นกดปุ่ม Cal โปรแกรมจะเรียกหน้าต่าง Psychrometric Chart ขึ้นมาเพื่อให้ผู้ใช้อ่าน
 และกรอกค่าตามคำแนะนำที่ปรากฏ จากนั้นกดปุ่ม OK ที่หน้าต่าง Psychrometric Chart โปรแกรม
 จะทำการคำนวณ และแสดงผลการคำนวณออกแบบที่หน้าต่าง Wet Scrubber for Gas
 Removal/Spray Absorber

ในการคำนวณออกแบบสเปรย์แอฟซอร์เบอร์ชนิด เวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทางและ
 ไหลตามขวาง จะจำลองจากอุปกรณ์เดิมที่มีการเดินระบบอยู่จริง ดังนั้นผู้ใช้งานจะต้องกดปุ่ม Existing
 plant data (ภาพที่ 43) เพื่อทำการเลือกหรือกรอกข้อมูลของอุปกรณ์เดิมที่ใช้งานจริง จากนั้นกดปุ่ม
 Cal ในหน้าต่าง Wet Scrubber for Gas Removal/Spray Absorber เพื่อทำการคำนวณเช่นเดียวกันกับ
 เวนทูรีสครับเบอร์ หน้าต่างแสดงผลการคำนวณออกแบบเวทสครับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ
 ชนิดสเปรย์แอฟซอร์เบอร์แสดงในภาพที่ 44 ภาพที่ 45 และภาพที่ 46

Existing Plant Data

Select the existing plant which operated under the same conditions

Pollutant name	Sulfur dioxide	< >
Liquid or Solvent	1% Lime	Select
Gas flow rate, m ³ /s	3.3	Add new
Gas temperature, °C	90	Save
Pressure, Pa	101325	
Mole fraction of pollutant in inlet gas	4000	
Mole fraction of pollutant in outlet gas	400	
Removal efficiency, %	90	
Liquid circulation rate, m ³ /hr	30	
Column diameter, m	1.7	
Column height, m	3.5	
Pressure drop, Pa	980	

ภาพที่ 43 ข้อมูลของอุปกรณ์เดิมที่มีการใช้งานจริง

Wet Scrubber for Gas Removal/Spray Absorber

Wet Scrubber types

- ☒ Venturi Scrubber
- ☐ Countercurrent Spray Chamber
- ☐ Crossflow Spray Chamber

Cal Cost
Clear Home
Print Help
Back to system design

Venturi Scrubber

Required removal efficiency, %	8.35
Mole fraction of pollutant in inlet gas	0.004
Molecular weight of pollutant, kg/kmol	64
Throat gas velocity, m/s	100
Slope of equilibrium curve (Solubility constant)	40.63
Mole fraction of pollutant in liquid inlet	0
Liquid to gas ratio, l/m ³	2.7

Click here for more information

Liquid properties

Liquid inlet temperature, °C	1000	Density, kg/m ³	1000	Surface tension, dyne/cm	72
Molecular weight, kg/kmol	18	Viscosity, poise	0.01	Liquid property information	

Result

Removal efficiency, %	8.35	Pressure drop, H ₂ O	70.22
Mole fraction of pollutant in outlet gas	0.0037	Power consumption, kW	43.713
Pollutant Concentration in outlet gas, ppm	3666.161	Fan efficiency, %	60
Exiting gas temperature, °C	57.778	Fan brake horsepower, hp	97.793
Liquid circulating rate, m ³ /hr	24.3	Pump efficiency, %	60
Water addition from drift loss+blown down, m ³ /hr	0.17	Pump head, m	6
Water addition from evaporation, m ³ /hr	0.073	Pump brake horsepower, hp	0.888

Venturi Scrubber

Throat length, m	0.3
Throat area, m ²	0.025

Preview

clean gas
mist eliminator
liquid to settling and recirculation

ภาพที่ 44 หน้าต่างการออกแบบเวนจูร์สครับเบอร์เพื่อใช้ในการดูดซับก๊าซ

Wet Scrubber for Gas Removal/Spray Absorber

Wet Scrubber types

☐ Venturi Scrubber

☒ Countercurrent Spray Chamber

☐ Crossflow Spray Chamber

Countercurrent Spray Chamber

Required removal efficiency, %

Mole fraction of pollutant in inlet gas

Gas velocity, m/s

To design Countercurrent spray chamber need data from exiting plant Click the below button to enter the data

Gas flow rate, m³/s

Gas temperature, °C

Percentage humidity, %

Inlet gas pressure, Pa

Liquid properties

Liquid inlet temperature, °C

Density, kg/m³

Surface tension, dyne/cm

Molecular weight, kg/kmol

Viscosity, poise

Result

Removal efficiency, %

Pressure drop, H₂O

Mole fraction of pollutant in outlet gas

Power consumption, kW

Pollutant Concentration in outlet gas, ppm

Fan efficiency, %

Exiting gas temperature, °C

Fan brake horsepower, hp

Liquid circulating rate, m³/hr

Pump efficiency, %

Water addition from drift loss+blown down, m³/hr

Pump head, m

Water addition from evaporation, m³/hr

Pump brake horsepower, hp

Countercurrent Spray Chamber

Height of column, m

Diameter of column, m

Preview

ภาพที่ 45 หน้าต่างการออกแบบเวทสครับเบอร์แบบไหลสวนทางเพื่อใช้ในการดูดซึมก๊าซ

Wet Scrubber for Gas Removal/Spray Absorber

Wet Scrubber types

☐ Venturi Scrubber

☐ Countercurrent Spray Chamber

☒ Crossflow Spray Chamber

Crossflow Spray Chamber

Required removal efficiency, %

Mole fraction of pollutant in inlet gas

Gas velocity, m/s

To design Crossflow spray chamber need data from exiting plant Click the below button to enter the data

Gas flow rate, m³/s

Gas temperature, °C

Percentage humidity, %

Inlet gas pressure, Pa

Liquid properties

Liquid inlet temperature, °C

Density, kg/m³

Surface tension, dyne/cm

Molecular weight, kg/kmol

Viscosity, poise

Result

Removal efficiency, %

Pressure drop, H₂O

Mole fraction of pollutant in outlet gas

Power consumption, kW

Pollutant Concentration in outlet gas, ppm

Fan efficiency, %

Exiting gas temperature, °C

Fan brake horsepower, hp

Liquid circulating rate, m³/hr

Pump efficiency, %

Water addition from drift loss+blown down, m³/hr

Pump head, m

Water addition from evaporation, m³/hr

Pump brake horsepower, hp

Crossflow Spray Chamber

Length of column, m

Width of column

Height of column, m

Preview

ภาพที่ 46 การออกแบบสครับเบอร์แบบไหลตามขวางเพื่อใช้ในการดูดซึมก๊าซ

2.3.2 โปรแกรมคำนวณออกแบบ Packed Bed Column การเข้าสู่หน้าตํางการออกแบบ Packed Bed Column ทำได้โดยการเลือกเมนูย่อย Packed Bed Column จากเมนูหลัก

Design by Equipment Selection หน้าต่าง Packed Bed Column จะถูกเรียกขึ้นมา (ภาพที่ 47) ภายในหน้าต่างจะประกอบด้วย ช่องรับข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบ และตารางแสดงชนิดและคุณสมบัติของตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์เพื่อให้ผู้ใช้คลิกเลือก จากนั้นกดปุ่ม Cal หน้าต่าง Generalized correlation for flooding and pressure drop in Packed Bed Column (ภาพที่ 48) จะปรากฏขึ้น ภายในหน้าต่างจะประกอบไปด้วยไดอะแกรม U.S. Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation และแสดงค่าแกน X ของไดอะแกรมที่คำนวณได้ ผู้ใช้จะต้องเลือกความดันสูญเสีย/1ฟุตของความสูงของคอลัมน์ (Pressure Drop per foot of packed height) จากนั้นอ่านและกรอกค่าในแกน Y ของไดอะแกรมที่สัมพันธ์กับความดันสูญเสีย/1ฟุตของความสูงของคอลัมน์ ที่เลือกกับค่าในแกน X ที่ปรากฏในหน้าต่างของโปรแกรม กดปุ่ม OK หน้าต่าง Generalized correlation for flooding and pressure drop in Packed Bed Column จะปิดลงและโปรแกรมจะกลับเข้าสู่การทำงานของหน้าต่าง Packed Bed Column และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในภาพที่ 50

ค่าตัวแปรที่ผู้ใช้อย่างกรอกเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column ได้แก่

- สัดส่วนโมลของก๊าซมลพิษในอากาศเสีย (Mole fraction of the pollutant in gases)
- มวลโมเลกุลของก๊าซมลพิษในอากาศเสีย (Pollutant molecular weight)
- ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซมลพิษในอากาศเสียของ Packed bed column ที่ต้องการ (Removal efficiency required)
- ค่าคงที่การละลายของก๊าซมลพิษในของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม (Solubility constant)
- ความสูง Transfer unit (Height of transfer unit)
- สัดส่วนโมลของก๊าซมลพิษในของเหลวที่ใช้ดูดซึม (Mole fraction of the pollutant in liquid)
- มวลโมเลกุลของของเหลวที่ใช้ดูดซึม (Liquid molecular weight)
- ความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้ดูดซึม (Liquid density)
- ความหนืดของของเหลวที่ใช้ดูดซึม (Liquid viscosity)
- อัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศเสียที่แท้จริงต่ออัตราการไหลของอากาศเสีย ณ ความเร็วของก๊าซที่ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ (Actual gas flow rate to gas flow rate at flooding gas velocity ratio)
- อัตราส่วนอัตราการไหลของของเหลวที่แท้จริงต่ออัตราการไหลของเหลวต่ำสุด (Actual liquid flow rate to minimum liquid flow rate ratio)
- แรงดันของเครื่องสูบน้ำ (Pump head)

ค่าความสูงของ Transfer unit (Height of transfer unit) จะขึ้นอยู่กับก๊าซมลพิษและสารละลายหรือของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม และชนิดของตัวกลางที่ใช้ ข้อมูลความสูง Transfer units ของการดูดซึมก๊าซมลพิษโดยสารละลายบางชนิดผู้ใช้สามารถเรียกดูได้โดยการกดปุ่ม ข้างช่องสำหรับให้ผู้ใช้กรอกข้อมูล Height of transfer unit หรือ สามารถคำนวณได้โดยการกดปุ่ม Height of transfer units calculation โปรแกรมจะเรียกหน้าต่างของ Height of transfer unit ขึ้นมา (ภาพที่ 49)

ภาพที่ 50 แสดงผลการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column โดยผลลัพธ์ที่คำนวณ ได้แก่

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษ (Removal efficiency)

ความดันสูญเสีย (Pressure drop) พลังงานที่ใช้ (Power consumption)

อัตราการหมุนเวียนของของเหลว (Liquid circulation rate)

ปริมาตรของตัวกลางในคอลัมน์ (Packing volume)

กำลังของเครื่องสูบน้ำ (Pump brake horsepower) กำลังของพัดลม (Fan brake horsepower)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (Diameter of column)

ขนาดความสูงของตัวกลางในคอลัมน์ (Height of packing)

Packed Bed Column

Mole fraction of the pollutant in gaseous: 0.05 **Cal**

Pollutant molecular weight .kg/kmol: 17 **Cost**

Required removal efficiency, %: 95 **Clear**

Solubility constant: 0.706 ? **Home**

Height of transfer unit: ? **Help**

Height of transfer units calculation **Back to system design**

Click the table row to select packing material **Add New Packing**

packing types	Nominal size (inch)	Packing Factor1_m
Raching Rings (ceramic)	1/2	2100
Raching Rings (ceramic)	5/8	1247
Raching Rings (ceramic)	3/4	837
Raching Rings (ceramic)	1	525
Raching Rings (ceramic)	1 1/2	312
Raching Rings (ceramic)	2	213
Raching Rings (ceramic)	3	121
Raching Rings (metal)	1/2	1345
Raching Rings (metal)	5/8	951
Raching Rings (metal)	3/4	755
Raching Rings (metal)	1	449
Raching Rings (metal)	1 1/2	272
Raching Rings (metal)	2	187
Raching Rings (metal)	3	108

Gas flow rate .m3/s: 2.5

Gas temperature, C: 25

Inlet gas pressure .Pa: 101325 **Clear**

Preview

Liquid (solvent) Properties

Temperature of liquid inlet, C: 25

Mole fraction of the pollutant in liquid: 0

Liquid molecular weight, kg/kmol: 18

Liquid density, kg/m3: 1000

Liquid viscosity, cp: 0.8

Actual gas flow rate to gas flow rate at flooding gas velocity ratio: 0.5

Actual liquid flow rate to minimum liquid flow rate ratio: 1.5

Liquid property information

Removal efficiency, %: 95

Mole fraction of the pollutant in outlet gas: 0

Pollutant concentration in outlet gas, ppm: 18

Pressure drop, in.H2O: 0.706

Power consumption, kW: 0.706

Liquid consumption, m3/day: 0.706

Packing volume, m3: 0.706

Fan efficiency, %: 60

Fan brake horsepower, hp: 0.706

Pump head, m: 6

Pump efficiency, %: 60

Pump brake horsepower, hp: 0.706

Diameter column, m: 0.706

Height of packing, m: 0.706

Preview

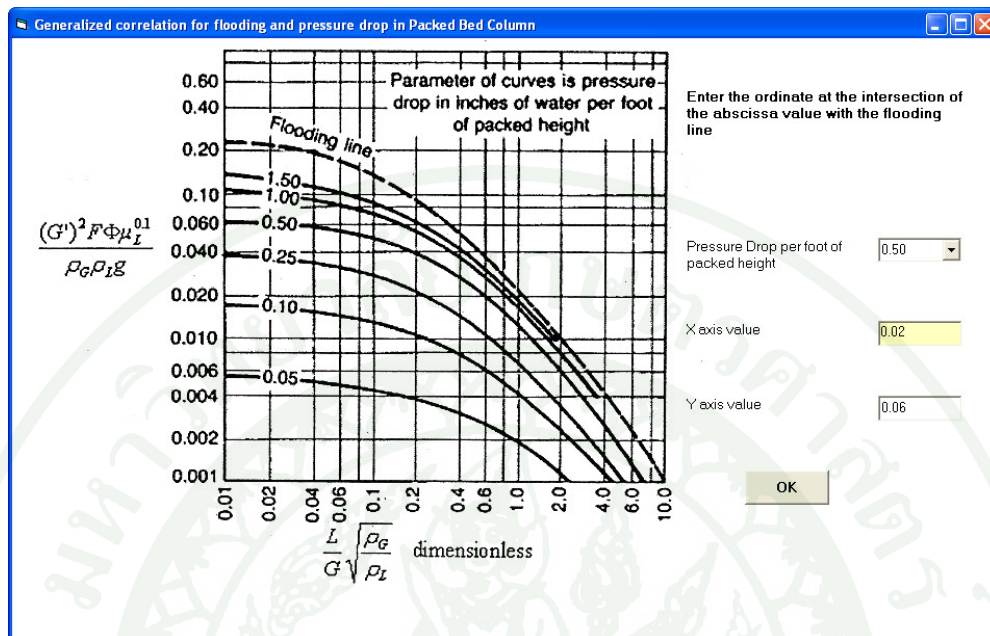
Liquid outlet

Liquid inlet

Gas inlet

Liquid outlet

ภาพที่ 47 การออกแบบ Packed Bed Column



ภาพที่ 48 U.S. Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation Diagram

Height of transfer unit

You have selected Rasching Rings(ceramic)Size1

Click the same type of packing for calculating height of transfer unit

Mass flux of gas ,lb/ft-hr: 419.916

Mass flux of liquid ,lb/ft-hr: 261.89

Pollutant diffusivity in air ,cm²-s: 0.236 ?

Pollutant diffusivity in water ,cm²-s x 100000: 1.76 ?

Height of transfer unit ,m: 0.747

Note: Mass flux of gas and liquid must be in applicable range according to the selected packing

Packing types (Size)	G	L
Raschig Ring (3/8)	200-500	500-1500
Raschig Ring (1)	200-800	400-500
Raschig Ring (1 1/2)	200-700	500-1500
Raschig Ring (2)	200-800	500-4500
Berl Saddles (1/2)	200-700	500-1500
Berl Saddles (1/2)	200-700	1500-4500
Berl Saddles (1)	200-800	400-4500
Berl Saddles (1 1/2)	200-1000	400-4500
Partition Rings (3)	150-900	3000-10000
Lanpac? (2.3)	400-3000	500-8000
Tri-Packs? (2)	100-900	500-10000
Tri-Packs? (3 1/2)	100-2000	500-10000

G : Gas flux applicable range ,lb/ft²-hr

L : Liquid flux applicable range ,lb/ft²-hr

Cal Close

ภาพที่ 49 การคำนวณหาความสูงของ Transfer unit

Packed Bed Column

Mole fraction of the pollutant in gaseous: 0.05 **Cal**

Pollutant molecular weight .kg/kmol: 17 **Cost**

Required removal efficiency, %: 95 **Clear**

Solubility constant: 0.706 **Home**

Height of transfer unit: 0.631 **Help**

Height of transfer units calculation **Print**

Back to system design

Click the table row to select packing material **Add New Packing**

Packing types	Nominal size (inch)	Packing Factor ₁ .m
Raching Rings ceramic	1/2	2100
Raching Rings(ceramic)	5/8	1247
Raching Rings(ceramic)	3/4	837
Raching Rings(ceramic)	1	525
Raching Rings(ceramic)	1/2	312
Raching Rings(ceramic)	2	213
Raching Rings(ceramic)	3	121
Raching Rings(metal)	1/2	1345
Raching Rings(metal)	5/8	951
Raching Rings(metal)	3/4	755
Raching Rings(metal)	1	449
Raching Rings(metal)	1/2	272
Raching Rings(metal)	2	187

Gas flow rate .m3/s: 2.5

Gas temperature, C: 30

Inlet gas pressure .Pa: 101325 **Clear**

Liquid (solvent) Properties

Temperature of liquid inlet, C: 25

Mole fraction of the pollutant in liquid: 0

Liquid molecular weight, kg/kmol: 18

Liquid density, kg/m3: 1000

Liquid viscosity, cp: 0.8

Actual gas flow rate to gas flow rate at flooding gas velocity ratio: 0.5

Actual liquid flow rate to minimum liquid flow rate ratio: 1.5

Liquid property information

Removal efficiency, %	95	Fan efficiency, %	60
Mole fraction of the pollutant in outlet gas	0.002625	Fan brake horsepower .hp	9.446
Pollutant concentration in outlet gas .ppm	2624.672	Pump head .m	6
Pressure drop .in.H2O	6.78	Pump efficiency, %	60
Power consumption .kw	4.222	Pump brake horsepower .hp	0.234
Liquid consumption .m3/day	6.417	Diameter column .m	2.552
Packing volume .m3	21.15	Height of packing .m	4.135

Preview

ภาพที่ 50 แสดงผลการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column

2.3.3 โปรแกรมประเมินราคา Packed Bed Column การประเมินราคา Packed Bed Column ผู้ใช้สามารถเข้าสู่หน้าต่างการประเมินราคาได้ทางหน้าต่าง Main menu โดยเลือกที่เมนูหลัก Cost Estimation จากนั้นเลือกเมนูย่อย Packed Bed Column หรือจะเข้าทางหน้าต่าง Packed Bed Column แล้วกดปุ่ม Cost เพื่อเรียกหน้าต่าง Packed Bed Column Cost ขึ้นมา

ภาพที่ 51 แสดงหน้าต่าง Packed Bed Column Cost หากมีการคำนวณเพื่อออกแบบ Packed Bed Column เรียบร้อยแล้ว ตัวแปรบางค่าที่กรอกหรือที่คำนวณในหน้าต่าง Packed Bed Column ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศเสีย (Gas flow rate) ปริมาณของเหลวที่ใช้ (Liquid consumption) ความสูงของตัวกลางในคอลัมน์ (Height of packing) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (Diameter of column) กำลังพัดลม (Fan brake horsepower) และกำลังของเครื่องสูบน้ำ (Pump brake horsepower) จะถูกส่งมาปรากฏ และนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินราคาของ Packed bed column ต่อไป ทั้งนี้ผู้ใช้อย่างสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่นที่ผู้ใช้ต้องกรอกเพิ่มเติมได้แก่

อายุการใช้งานของเวนทูรี (Equipment life time)

ประสิทธิภาพของพัดลม (Fan efficiency)

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (Pump efficiency)

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคา ณ ปี หรือ เวลาที่ต้องการทราบราคา (Cost index)

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Operating time)

ราคาสารละลายหรือของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม (Solvent/liquid cost)

ความสูงของคอลัมน์ (Height of column)

ค่าแรง (Labor cost) ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (Electricity cost)

จากนั้นเลือกชนิดวัสดุของอุปกรณ์ หากมีอุปกรณ์เสริมเข้ามาในระบบให้ทำการเลือกและกรอกราคาของอุปกรณ์เสริม กดปุ่ม Cal เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณและแสดงผลการคำนวณ

ผลการคำนวณประเมินค่าใช้จ่ายในอุปกรณ์ Packed Bed Column ที่ได้จากโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Capital Investment) แบ่งออกเป็น ค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยตรง (Direct Costs) และค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยอ้อม (Indirect Costs)

- ค่าใช้จ่ายรายปี (Annual Cost) แบ่งออกเป็น ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง (Direct Annual Costs) และค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อม (Indirect Annual Costs)

Packed bed column Cost

Gas flow rate, m³/s: 2.5 Equipment life, time, yr: 10

Liquid consumption, m³/h: 6.417 Fan brake horsepower, hp: 11.183

Height of Packing, m: 4.895 Fan efficiency, %: 70

Diameter column, m: 2.552 Pump brake horsepower, hp: 0.234

Height of column, m: 6 Pump efficiency, %: 70

Surface area column, m²: 58.305

Column Material

☒ Fiberglass reinforce plastic ☐ Polypropylene

☐ Polyvinylchloride ☐ 304 stainless steel

Auxiliary Equipment Cost, \$

☐ Ductwork: 0 ☐ Cyclone: 0

☐ Hood: 0 ☐ Fan: 0

☒ Packing: 26531 ☐ Pump: 0

Cost Index: 532.9

Operating time, hr/shift: 8

Solvent cost, \$/hr: 0.5

Labor cost, \$/hr: 10

Electricity, \$/kw-hr: 0.094

Capital Investment, \$

Direct Costs		Indirect Costs	
Equipment	132992.81	Foundation/Support	18831.78
Auxiliary	0	Handling/Erection	62772.61
Instrument	13299.28	Electrical	1569.32
Texes	3989.78	Insulation	1569.32
Freight	6649.64	Site preparation	0
Painting	1569.32	Facilities building	0
Piping	47079.46	Total	290323.32
		Engineering Supervision	15693.15
		Construction field	15693.15
		Construction fee	15693.15
		Start up	1569.32
		Performance test	1569.32
		Contingencies	4707.95
		Total	54926.04

Annual Cost, \$/year

Direct Annual Costs		Indirect Annual Costs	
Electricity	7003.9	Maintenance labor	5475
Solvent	28106.46	Maintenance material	5475
Chemical	0	Operator labor	5475
Water	0	Supervisor labor	821.25
		Waste disposal	0
		Total	52356.61
		Administrative charge	6904.99
		Property tax	3452.49
		Insurance	3452.49
		Overhead	10347.75
		Capital recovery	49025.41
		Total	73183.13

Cal Edit Home Help Print

ภาพที่ 51 การประเมินราคา Packed Bed Column

2.4 โปรแกรมออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ โปรแกรมออกแบบเตาเผาก๊าซและไอแบ่งออกเป็น โปรแกรมย่อยเพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบเตาเผาทั้ง 2 ชนิด และโปรแกรมย่อยเพื่อช่วยในการประเมินราคาเตาเผา

2.4.1 โปรแกรมคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ การเข้าสู่หน้าต่างการออกแบบเตาเผาก๊าซและไอทำได้โดยการเลือกเมนูย่อย Afterburners/VOC Incinerator จากเมนูหลัก Design by Equipment Selection หน้าต่าง Afterburner/Incinerator จะถูกเรียกขึ้นมา (ภาพที่ 52) ในหน้าต่างจะประกอบด้วย ช่องรับข้อมูลตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบ ผู้ใช้จะต้องกดปุ่ม VOC (ภาพที่ 54) ก่อนเพื่อเรียก หน้าต่าง VOC Data ภายในหน้าต่างนี้จะประกอบด้วยตารางที่ให้ผู้ใช้งานคลิกเพื่อเลือกชนิดและจำนวนของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC Name) และช่องว่างให้ผู้ใช้งานกรอกค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย จากนั้นกดปุ่ม Cal เพื่อคำนวณหาปริมาณร้อยละของออกซิเจน (Oxygen content) และร้อยละของปริมาณไอระเหยขึ้นต่ำของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดที่ทำให้เกิดการระเบิดหากมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอที่อยู่ในก๊าซไอเสีย (LEL mixture) โดยค่า Oxygen content จะต้องมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และ ค่า LEL mixture จะต้องมีค่าไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์

หากต้องการเพิ่มชนิดของสาร VOC เข้าไปในฐานข้อมูล ผู้ใช้สามารถทำได้โดยการกรอกข้อมูลในกรอบ Add new VOC ซึ่งประกอบด้วย ช่องรับข้อมูลชื่อของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Name) ปริมาณไอระเหยขึ้นต่ำของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ทำให้เกิดการระเบิดหากมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอที่อยู่ในก๊าซไอเสีย (Lower explosive limit) ค่าความร้อนเมื่อเกิดการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Heat content) จากนั้นกดปุ่ม Add เพื่อเพิ่มชนิด และคุณสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าในฐานข้อมูล

หลังจากตรวจสอบปริมาณออกซิเจนและ LEL mixture เรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม OK เพื่อปิดหน้าต่าง VOC Data และกลับเข้าสู่การทำงานของหน้าต่าง Afterburner/Incinerator เลือกชนิดของเตาเผาก๊าซและไอที่ต้องการใช้ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ เตาเผาแบบใช้ความร้อน (Thermal Incinerator) เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incinerator) และเลือกชนิดของรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดเตาเผาที่ต้องการ (Cross-sectional chamber shape) ซึ่งมีให้เลือก 3 แบบ ได้แก่ วงกลม (Circle) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) และ สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) จากนั้นผู้ใช้งานต้องกรอกข้อมูลดังต่อไปนี้ให้ครบ ได้แก่

อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย (Gas flow rate)
อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (Temperature)
ความดันของก๊าซไอเสีย (Pressure)
ประสิทธิภาพในการเผาทำลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC destruction efficiency)
ประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat recovery efficiency)
ความร้อนที่สูญเสีย (Heat loss)
ระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในเตาเผา (Residence time)
อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (Operating temperature)
ความเร็วของก๊าซในห้องเผาไหม้ (Gas velocity)
อุณหภูมิของก๊าซที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Inlet temperature to catalyst) สำหรับ Catalytic incinerator เท่านั้น
ส่วนกลับของความเร็วของก๊าซในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Space velocity of gas in catalyst) สำหรับ Catalytic incinerator เท่านั้น
อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature)
คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ (Fuel) ได้แก่
ค่าความร้อนเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Heat content)
ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (Density)
อุณหภูมิของเชื้อเพลิง (Fuel temperature)

ในการกำหนดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (Operating temperature) ผู้ใช้สามารถทำการตรวจสอบได้ว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่กำหนดมีค่าเหมาะสมหรือไม่โดยการกดปุ่ม? ข้างช่องที่ให้กรอกอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ โปรแกรมจะทำการเรียกหน้าต่าง Operating temperature for Thermal incinerator ขึ้นมา (ภาพที่ 56) โดยอุณหภูมิที่กำหนดไม่ควรมีค่าต่ำกว่าค่าที่ปรากฏในหน้าต่าง Operating temperature for Thermal incinerator

หลังจากกดปุ่ม Cal ในหน้าต่าง Afterburner/Incinerator แล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลการคำนวณ ดังต่อไปนี้

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Fuel consumption) ความยาวของเตาเผา (Chamber length)
ปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst volume) สำหรับเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา (Chamber diameter) สำหรับเตาเผาที่มีพื้นที่หน้าตัดที่มีรูปวงกลม

ความกว้างของเตาเผา (Chamber width) พื้นที่หน้าตัดที่มีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความสูงของเตาเผา (Chamber height) พื้นที่หน้าตัดที่มีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Afterburner/VOC Incinerator

Incinerator type
☒ Thermal Incinerator
☐ Catalytic Incinerator

Cross-sectional shape
☒ Circle
☐ Square
☐ Rectangular

Fuel
 Heat content, kJ/m³: 20000
 Fuel density, kJ/m³: 0.862
 Fuel temperature, C: 25

Auxiliary air
 Air flowrate: []
 Air temperature: 25

Operating parameters
 Operating temperature, C: 900
 Inlet temperature to catalyst, C: []
 Gas velocity, m/s: 10
 Space velocity of gas in catalyst, 1/s: []

Results
 VOC destruction efficiency, %: []
 Fuel consumption, kg/hr: []
 Pressure drop, in.H₂O: []
 Power consumption, kW: []

Fuel information
 Required VOC destruction efficiency, %: 98
 Heat recovery efficiency, %: 0
 Heat loss, %: 10
 Residence time, s: 0.7

Chamber dimensions
 Chamber length, m: []
 Chamber diameter, m: []
 Catalyst volume, m³: []
 Chamber width, m: []
 Chamber height, m: []

* for Catalytic Incinerator

ภาพที่ 52 การออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ

Fuel Information

Fuel Properties

Fuel name	Heating value (kJ/cum)	Density (kg/cum)
Natural gas	36622.19	0.777
Hydrogen	9710.66	0.0901
Still gas (in refineries)	48821.16	1.1585
Crude oil	35993662.11	843.421
Conventional gasoline	32224140	741.842

Source : adapted from <http://essom.com>

OK

ภาพที่ 53 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

VOC Data

Add New VOC

Name:

Lower explosive limit (LEL):

Heat content kJ./m3:

Autoignition, C:

Add

Delete Delete All

VOC Name	Conc.ppmv
Benzene	1000
Benzene	1000
Toluene	
Xylene	
Acetylene	
Naphthalene	
Methylalcohol	
Ethylalcohol	
Amonia	

Oxygen content, %	
LEL mixture, %	

Cal OK Cancel

ภาพที่ 54 การคำนวณ Oxygen content และ LEL mixture

VOC Data

Add New VOC

Name:

Lower explosive limit (LEL):

Heat content kJ./m3:

Autoignition, C:

Add

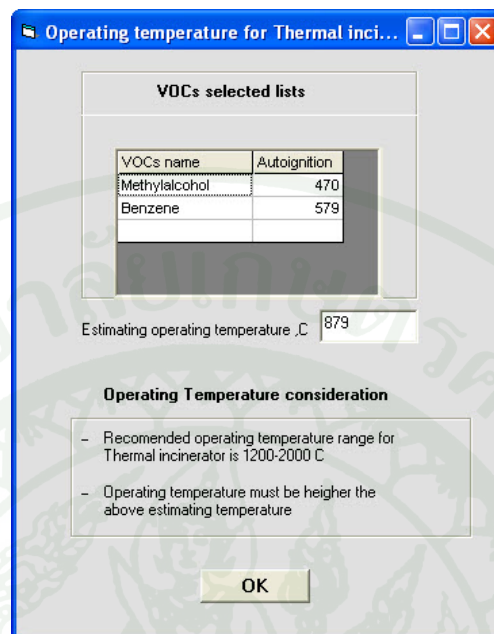
Delete Delete All

VOC Name	Conc.ppmv
Benzene	1000
Methylalcohol	1000

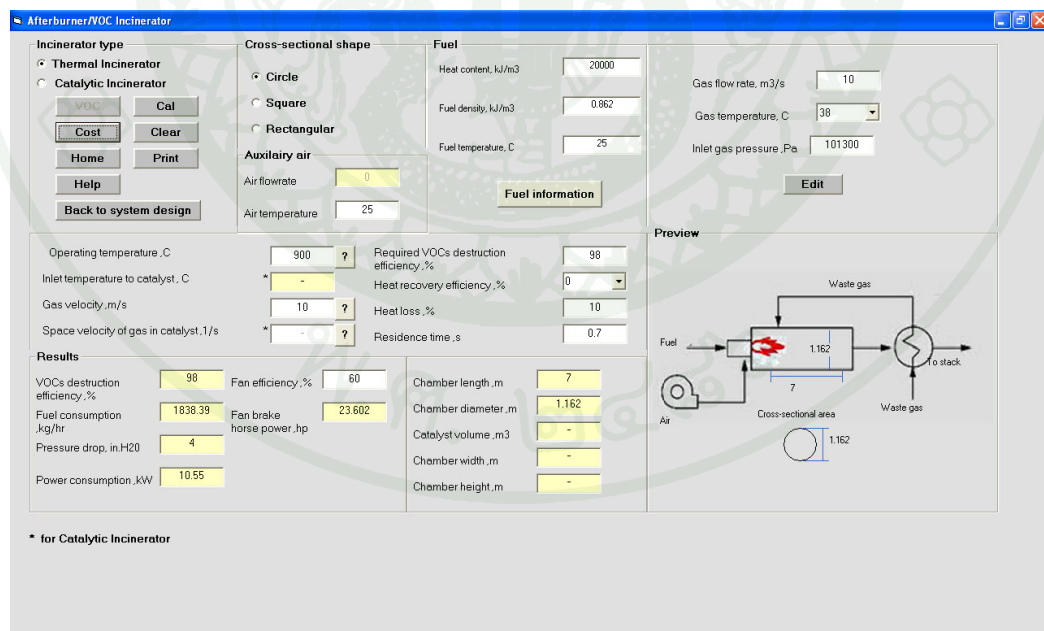
Oxygen content, %	20.858
LEL mixture, %	8.631

Cal OK Cancel

ภาพที่ 55 แสดงผลการคำนวณ Oxygen content และ LEL mixture



ภาพที่ 56 การประมาณค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้



ภาพที่ 57 ผลการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน

Afterburner/VOC Incinerator

Incinerator type
☐ Thermal Incinerator
☒ Catalytic Incinerator

Cross-sectional shape
☒ Circle
☐ Square
☐ Rectangular

Fuel
 Heat content, kJ/m³: 20000
 Fuel density, kJ/m³: 0.862
 Fuel temperature, C: 25

Auxiliary air
 Air flowrate: 0
 Air temperature: 25

Results
 VOC destruction efficiency, %: 98
 Fuel consumption, kg/hr: 466.486
 Pressure drop, in H₂O: 10
 Power consumption, kW: 25.274

Chamber dimensions
 Chamber length, m: 7
 Chamber diameter, m: 1.137
 Catalyst volume, m³: 2.03
 Chamber width, m: -
 Chamber height, m: -

Preview
 Schematic diagram of the incinerator showing fuel input, air input, waste gas output, and catalyst bed.

ภาพที่ 58 ผลการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4.2 โปรแกรมประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอ ผู้ใช้สามารถเข้าสู่หน้าต่างการประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอได้ทางหน้าต่าง Main menu โดยเลือกเมนู Cost Estimation จากนั้นเลือกเมนูย่อย Afterburner/Incinerator หรือจะเข้าทางหน้าต่าง Afterburner/Incinerator และกดปุ่ม Cost เพื่อเรียกหน้าต่าง Afterburner/Incinerator cost ขึ้นมา

ภาพที่ 59 และภาพที่ 60 แสดงหน้าต่าง Afterburner/Incinerator cost หากมีการคำนวณเพื่อออกแบบเตาเผาก๊าซและไอเรียบร้อยแล้ว ค่าตัวแปรบางค่าที่ผู้ใช้กรอก และที่คำนวณได้จากหน้าต่าง Afterburner/Incinerator ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย (Gas flow rate) อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่ไหลผ่านเตาเผา (Total gas flow rate through incinerator) ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Fuel consumption) และกำลังของพัดลม จะถูกส่งมาปรากฏและนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินราคาต่อไป ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆที่ผู้ใช้ต้องกรอกเพิ่มเติมได้แก่

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคา (Cost index)

ระยะเวลาในการเดินระบบ (Operating time)

ค่าแรง (Labor cost)

ราคาเชื้อเพลิง (Fuel cost)

ราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (Electricity cost)

จากนั้นกดปุ่ม Cal เพื่อทำการคำนวณประเมินราคา ผลการคำนวณประเมินค่าใช้จ่ายในอุปกรณ์ เตาเผาก๊าซและไอที่ได้จากโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Capital Investment) แบ่งออกเป็น ค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยตรง (Direct Costs) และค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยอ้อม (Indirect Costs)

- ค่าใช้จ่ายรายปี (Annual Cost Investment) แบ่งออกเป็น ค่าใช้จ่ายรายปีโดยตรง (Direct Costs) และค่าใช้จ่ายรายปีโดยอ้อม (Indirect Costs)

Afterburner/Incinerator Cost

Gas flow rate, m³/s: 10
 Total Gas flow rate through incinerator, m³/s: 10.382
 Fuel consumption, kg/hr: 1185.768
 Fan brake horse power, hp: 46.266
 Fan efficiency, %: 60

Incinerator Types
☒ Thermal Incinerator
☐ Fixed-bed, Monolith Catalytic Incinerator
☐ Fluid-bed Catalytic Incinerator

Equipment life time, yr: 10

% Heat Recovery
☐ 0%
☒ 35%
☐ 50%
☐ 70%

Auxiliary Equipment
☐ Cyclone
☐ Fan
☐ Hood
☐ Ductwork

Cost Index: 532.9
 Operating time, hr/shift: 0.5
 Labor cost, \$/hr: 10
 Fuel cost, \$/kg: 0.266
 Electricity cost/unit, \$/kW-hr: 0.094

Capital Investment, \$

Direct Costs		Indirect Costs	
Equipment	277858.27	Foundation/Support	26229.821
Auxiliary	0	Handling/Erection	45902.186
Instrument	27785.827	Electrical	13114.91
Texes	8335.748	Insulation	3278.728
Freight	13892.913	Site preparation	0
Painting	3278.728	Facilities building	0
Piping	6557.455	Total	426234.566
		Engineering Supervision	32787.276
		Construction field	16393.638
		Construction fee	32787.276
		Start up	6557.455
		Performance test	3278.728
		Contingencies	9836.183
		Total	101640.556

Annual Cost, \$/year

Direct Annual Costs		Indirect Annual Costs	
Electricity	1773.904	Maintenance labor	5475
Fuel	172689.323	Maintenance material	5475
		Operator labor	5475
		Supervisor labor	821.25
		Waste disposal	0
		Total	191709.477
		Administrative charge	10557.503
		Property tax	5278.751
		Insurance	5278.751
		Overhead	10347.75
		Capital recovery	74958.27
		Total	106421.025

Cal Edit Home Help Print

ภาพที่ 59 การคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอแบบใช้ความร้อน

Afterburner/Incinerator Cost

Gas flow rate, m³/s: 10
 Total Gas flow rate through incinerator, m³/s: 10.15
 Fuel consumption, kg/hr: 466.466
 Fan brake horse power, hp: 56.541
 Fan efficiency, %: 60

Incinerator Types
☐ Thermal Incinerator
☒ Fixed-bed, Monolith Catalytic Incinerator
☐ Fluid-bed Catalytic Incinerator

Equipment life time, yr: 10

% Heat Recovery
☐ 0%
☒ 35%
☐ 50%
☐ 70%

Auxiliary Equipment
☐ Cyclone: 0
☐ Fan: 0
☐ Hood: 0
☐ Ductwork: 0

Cost Index: 532.9
 Operating time, hr/shift: 0.5
 Labor cost, \$/hr: 10
 Fuel cost, \$/kg: 0.266
 Electricity cost/unit, \$/kW-hr: 0.094

Capital Investment, \$

Direct Costs		Indirect Costs	
Equipment	368124.474	Foundation/Support	34750.95
Auxiliary	0	Handling/Erection	60814.163
Instrument	36812.447	Electrical	17375.475
Texes	11043.734	Insulation	4343.869
Freight	18406.224	Site preparation	0
Painting	4343.869	Facilities building	0
Piping	8687.738	Total	564702.943
		Engineering Supervision	43438.688
		Construction field	21719.344
		Construction fee	43438.688
		Start up	8687.738
		Performance test	4343.869
		Contingencies	13031.606
		Total	134659.933

Annual Cost, \$/year

Direct Annual Costs		Indirect Annual Costs	
Electricity	2167.863	Maintenance labor	5475
Fuel	67936.689	Maintenance material	5475
		Operator labor	5475
		Supervisor labor	821.25
		Waste disposal	0
		Total	87350.802
		Administrative charge	13987.258
		Property tax	6993.629
		Insurance	6993.629
		Overhead	10347.75
		Capital recovery	98309.528
		Total	137631.794

Cal Edit Home Help Print

ภาพที่ 60 การคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

3. หลังจากผู้ใช้ทำการคำนวณออกแบบอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์และผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเก็บลงในฐานข้อมูล และแสดงผลเป็นรายงานให้ผู้ใช้เรียกดูและสามารถทำการพิมพ์ในรูปแบบรายงานโดยกดปุ่ม Print ที่ปรากฏในหน้าต่างการออกแบบและประเมินราคาของแต่ละอุปกรณ์

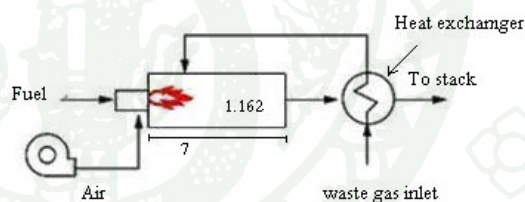
ภาพที่ 61 และภาพที่ 62 แสดงตัวอย่างของรายงานการออกแบบอุปกรณ์เตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน และการประเมินราคาของเตาเผาก๊าซและไอชนิดเดียวกัน ตามลำดับ

VOC Thermal Incinerator

VOC		Operating conditions		Fuel properties	
VOC name	Conc., ppmv	Gas flow rate, m ³ /s	10	Heat content, kJ/m ³	20000
Benzene	1000	Gas temperature, C	38	Fuel density, kg/m ³	0.862
Methylalcohol	1000	Pressure, Pa	101300	Temperature, C	25
-	-	Operating temperature, C	900	Auxiliary air	
-	-	Heat recovery efficiency, %	0	Air flow rate, m ³ /s	0
-	-	Heat loss, %	10	Air temperature, C	25
-	-	Gas velocity, m/s	0		
-	-	Residence time, s	0.7		
-	-	Oxygen content, %	20.858		
-	-	LEL _{mix} , %	8.631		
-	-	VOC destruction	98		
		Efficiency, %			
		Fuel consumption, m ³ /hr	1838.39		

Sizing

Using Circle	cross-sectional area
Chamber length, m	7
Chamber diameter, m	1.162
Chamber width, m	-
Chamber height, m	-



ภาพที่ 61 รายงานการคำนวณออกแบบเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน

Incinerator Cost					
Incinerator type	Thermal incinerator			Auxiliary equipment cost, \$	
% Heat recovery	35%			X Cyclone	0
Gas flow rate, m3/s	10			X Fan	0
Total gas flowrate, m3/s	10.592			X Hood	0
Fuel consumption, kg/hr	1838.39			X Ductwork	0
Equipment life time, yr	10				
Operating time, hr/shift	8				
Labor cost, \$/hr	10				
Fuel cost, \$/kg	0.266				
Electricity cost/unit, \$/unit	0.094				
Capital investment \$					
Direct capital investment				Indirect capital investment	
Equipment	279313.779	Foundation/Support	26367.221	Engineering,Supervision	32959.026
Auxiliary	0	Handling/Erection	46142.636	Construction field	16479.513
Instrument	27931.378	Electrical	46142.636	Construction fee	32959.026
Taxes	8379.413	Insulation	3295.903	Start up	6591.805
Freight	13965.689	Site preparation	0	Performance test	3295.903
Painting	3295.903	Facilities building	0	Contingencies	102172.981
Piping	6591.805				
		Total capital direct cost	428467.337	Total capital indirect cost	102172.981
Annual cost \$/yr					
Direct annual			Indirect annual cost		
Electricity	14478.949	Operator labor	5475	Administrative charge	10612.806
Fuel	4283742.84	Supervisor labor	821.25	Property tax	5306.403
Maintenance labor	5475	Waste disposal	0	Insurance	5306.403
Maintenance material	5475			Overhead	10347.75
				Capital recovery	75350.925
		Total annual direct cost	4315468.04	Total indirect annual cost	106924.287

ภาพที่ 62 รายงานการประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน

วิจารณ์

ผลจากการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับบำบัดและประเมินราคาอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศทั้ง 3 อุปกรณ์ ได้แก่ ไซโคลน เวทสกรับเบอร์และเตาเผาก๊าซและไอ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น นอกจากจะสามารถคำนวณออกแบบอุปกรณ์ ได้มากกว่า 1 อุปกรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศที่มีอยู่ เช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบไซโคลนที่พัฒนาโดย NSF แล้วโปรแกรมยังสามารถคำนวณเพื่อออกแบบอุปกรณ์บำบัดมลพิษชนิดฝุ่นและก๊าซได้ด้วย ซึ่งเป็นการพัฒนาความสามารถของโปรแกรมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบอุปกรณ์กำจัดฝุ่นที่พัฒนาโดยจุติมา (2547) และเพื่อให้โปรแกรมมีความสมบูรณ์มากขึ้น ผู้ศึกษาได้เพิ่มความสามารถให้โปรแกรมสามารถคำนวณออกแบบระบบบำบัดมลพิษอากาศ โดยโปรแกรมสามารถคำนวณออกแบบ ตั้งแต่ระบบรวบรวมอากาศเสีย (หัวดูดและท่อ) เข้าสู่อุปกรณ์และทำการคำนวณออกแบบอุปกรณ์และทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ทำการคำนวณออกแบบนั้น

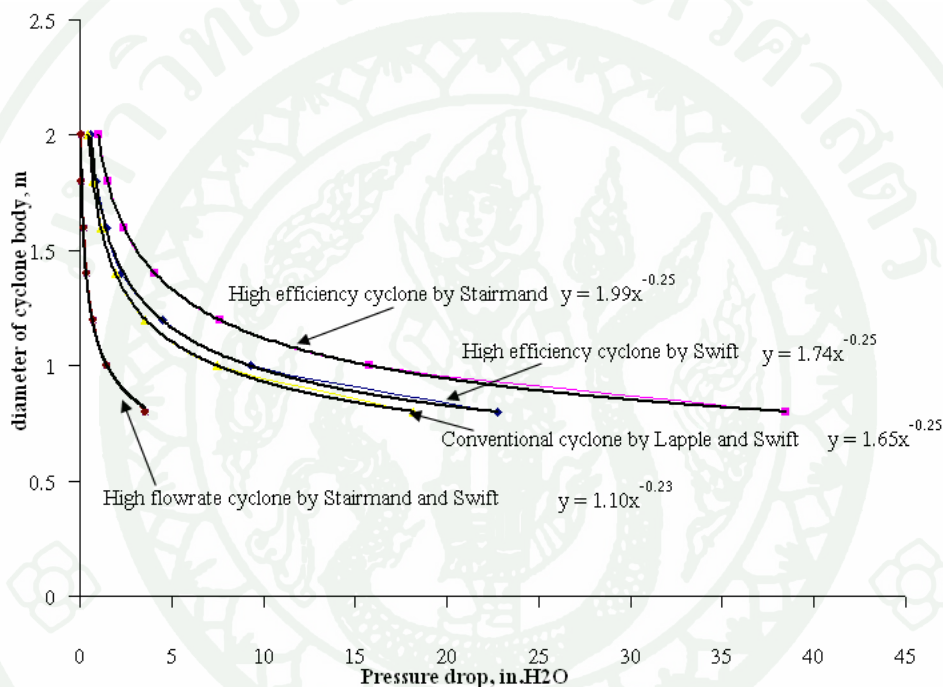
ข้อจำกัดในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์และความแตกต่างของผลการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบบำบัดมลพิษอื่นๆ ได้แก่

1. ไซโคลน

ในการออกแบบไซโคลนในโปรแกรมจะกำหนดไว้หากไซโคลนที่ต้องการออกแบบมีค่าความดันสูญเสียสูงเกิน 16 นิ้วน้ำ โปรแกรมจะทำการสอบถามและแนะนำผู้ใช้ให้ทำการเพิ่มจำนวนไซโคลนขึ้นมาอีก 1 ตัว ซึ่งจะต่อแบบขนานกับไซโคลนตัวเดิมเพื่อ แบ่งอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลนเป็น 2 ส่วน ทั้งนี้การที่ความดันสูญเสียมีค่าสูงเกินไป เนื่องมาจากอัตราเร็วของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลนมีค่าสูง ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนมีขนาดเล็ก ส่งผลให้พื้นที่ทางเข้ามีขนาดเล็ก การที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนมีขนาดเล็ก อาจเนื่องมาจากปริมาณของฝุ่นขนาดเล็กที่เข้าสู่ไซโคลนมีค่าสูง ส่งผลให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนที่คำนวณได้มีค่าน้อย

ภาพที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวไซโคลนกับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในไซโคลนแต่ละชนิด ไซโคลนชนิด Conventional cyclone ที่ทำการศึกษาโดย Swift และ Lapple จะมีค่าความดันสูญเสียเท่ากัน เนื่องจากในการคำนวณออกแบบสัดส่วนของ

ขนาดความสูงและความกว้างต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนมีค่าเท่ากันโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนในรูปแบบสมการกำลังสอง จากรูปจะเห็นได้ว่าไซโคลนชนิด High flowrate cyclone จากการศึกษารายงานของ Stairmand และ Swift มีค่าความดันสูญเสียที่น้อยที่สุด เมื่อขนาดของไซโคลนมีค่าเท่ากัน



ภาพที่ 63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียกับขนาดของไซโคลนชนิดต่างๆ

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบไซโคลนชนิด Conventional cyclone จากการศึกษารายงานของ Lapple ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรมการคำนวณออกแบบไซโคลนที่พัฒนาโดย NSF เมื่อกำหนดให้ข้อมูลการกระจายฝุ่น ความหนาแน่น ลักษณะของอากาศหรือก๊าซไอเสีย (อัตราการใช้ไอน้ำ อุณหภูมิ) มีค่าเท่ากัน พบว่าประสิทธิภาพรวมที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน (ภาคผนวก จ) ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมมีค่าต่างกัน

2. เวทสกรับเบอร์

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความดันสูญเสียในอุปกรณ์เวนทูรีสกรับเบอร์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียที่พัฒนาโดย AJ Design Software เมื่อกำหนดให้อัตราเร็วของก๊าซที่ผ่านคอเวนทูรีสกรับเบอร์มีค่าเท่ากับ 100 m/s และสัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่อก๊าซมีค่า 1 l/m^3 พบว่าค่าความดันสูญเสียที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ($32.74\text{ in.H}_2\text{O}$) มีค่าต่ำกว่าค่าความดันสูญเสียที่คำนวณโดยโปรแกรมของ AJ Design Software ($39.37\text{ in.H}_2\text{O}$) ทั้งนี้เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณในโปรแกรมนี้อาจใช้สมการที่พิจารณาว่าพลังงานทั้งหมดที่สูญเสียในกระแสน้ำถูกใช้เพื่อเร่งหยดน้ำให้มีความเร็วเท่ากับกระแสน้ำ (Calvert, 1972) ซึ่งคิดเฉพาะค่าความดันสูญเสียที่เกิดเฉพาะบริเวณของคอเวนทูรีเท่านั้น ไม่ได้คิดแรงเสียดทานที่ผนังของเวทสกรับเบอร์และโมเมนต์ของก๊าซกลับคืนในส่วนที่ขยายของเวนทูรี ดังนั้นหยดน้ำทั้งหมดถูกเร่งให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วของก๊าซในส่วนคอ และโมเมนต์ของหยดน้ำไม่ได้เปลี่ยนเป็นความดันสูญเสียในส่วนที่ขยายของเวนทูรี แต่ในความเป็นจริงความเร็วของหยดน้ำไม่อาจเท่าความเร็วของก๊าซได้เนื่องจากมี Residence Time ไม่เพียงพอ (Yung et al. 1977) ซึ่งแตกต่างจากสมการที่ใช้ในโปรแกรมที่ AJ Design Software ออกแบบโดยจีน ซึ่งได้พิจารณาประเด็นดังกล่าวด้วย ดังนั้นจึงทำให้ค่าความดันสูญเสียที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกัน

ข้อจำกัดของโปรแกรมในการคำนวณออกแบบเวทสกรับเบอร์ที่ใช้ในการกำจัดฝุ่นและก๊าซได้แก่ ค่าอุณหภูมิของก๊าซที่เข้าสู่อุปกรณ์ เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล Psychrometric chart (EPA, 2002) ซึ่งใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากระบบหมุนเวียนของของเหลวในโปรแกรมมีค่าสูงสุด 500°F

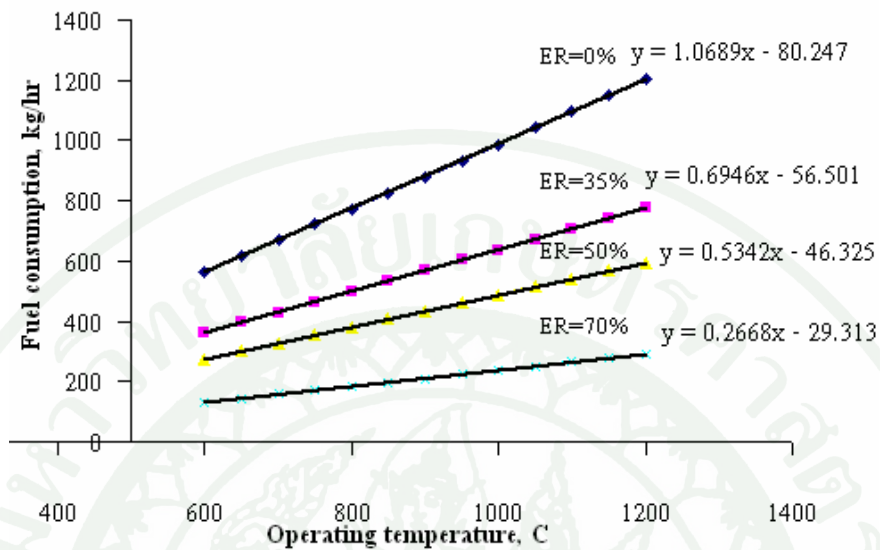
นอกจากนี้ในการคำนวณออกแบบเวทสกรับเบอร์เพื่อใช้ในการกำจัดมลพิษก๊าซชนิด Packed Bed Column จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการกำหนดค่าความเข้มข้น (สัดส่วนโมล) ของก๊าซมลพิษในอากาศเสียที่เข้าสู่คอลัมน์ ซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำๆ กราฟเส้นสมดุลจะเป็นเส้นตรง สามารถใช้สมการอย่างง่ายในการคำนวณหาจำนวน Transfer unit (Theodore, 2008) ซึ่งในสมการจะใช้เฉพาะค่าความชันของเส้นสมดุลระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษในส่วนอากาศและส่วนของของเหลว (Henry's law constant) และด้วยสาเหตุนี้ทำให้ไม่สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาโดย Laval University (2001) มาใช้ในการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column ในโปรแกรมได้ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การ

เคลื่อนย้ายมวลสารดังกล่าวสามารถที่จะนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบ Packed Bed Column ในกรณีที่มีการใช้วิธีการคำนวณหาจำนวน Transfer unit โดยวิธีการวาดกราฟ (Graphical method) (Cooper and Alley, 1984) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความยืดหยุ่น แต่ยากต่อการเขียนโปรแกรม โดยวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ได้ในแม้ในกรณีอากาศเสียมีความเข้มข้นของมลพิษมากกว่า 0.05

3. เตาเผาก๊าซและไอ

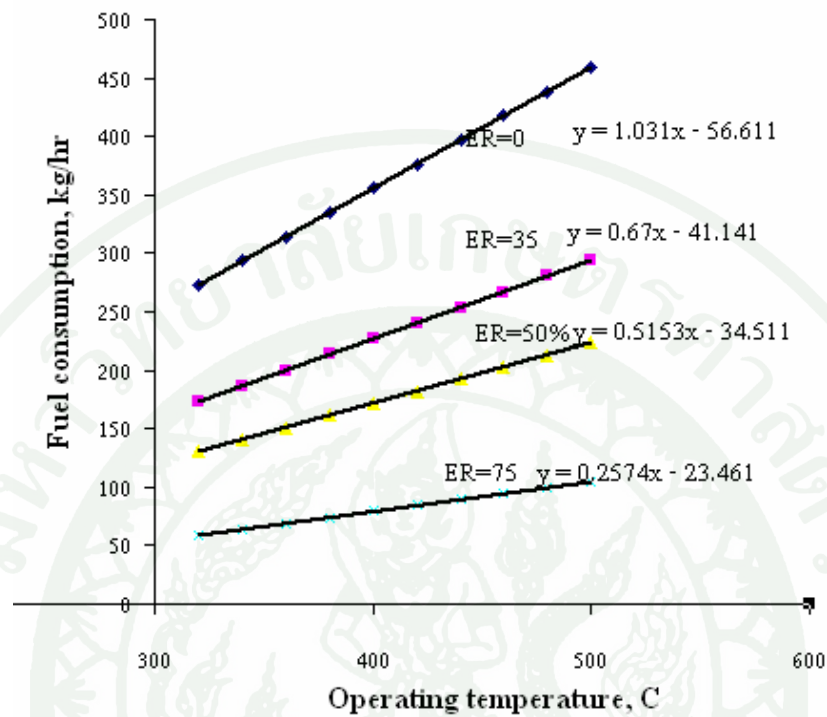
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาเผาจะขึ้นกับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้หรืออุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบซึ่งผู้ใช้โปรแกรมจะต้องกำหนดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ให้เหมาะสม โดยในเตาเผาแบบความร้อนช่วงอุณหภูมิเหมาะสมจะมีค่าประมาณ 1200°F - 2000°F (649°C - 1093°C) ส่วนเตาเผาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่า 700°F - 900°F (371°C - 402°C) นอกจากนี้อีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ได้แก่ ค่าร้อยละของการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากภาพที่ 64 และภาพที่ 65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ของเตาเผาแบบใช้ความร้อน และเตาเผาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ณ ที่ค่าความสามารถในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ที่แตกต่างกัน เตาเผาที่ไม่มีการนำความร้อนกลับมาใช้เลยจะมีความชันของกราฟมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาที่มีการนำความร้อนกลับมาใช้ซึ่งหมายถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้เชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่าเตาเผาที่มีการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

หากเราติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่าร้อยละความสามารถในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ จะทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น แต่ข้อจำกัดคือ ราคาของอุปกรณ์จะสูงขึ้น และความดันสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้น และอาจทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่คำนวณได้อาจมีค่าน้อยจนเกินไป (พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง < 5% ของพลังงานความร้อนในเตาเผาทั้งหมด) ทำให้เตาเผาไม่สามารถทำงานได้



หมายเหตุ ER = ร้อยละของการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ภาพที่ 64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาโดยใช้ความร้อน



หมายเหตุ ER = ร้อยละของการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ภาพที่ 65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้ในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์ทุกชนิดจะมีค่าพารามิเตอร์แนะนำและข้อจำกัดของพารามิเตอร์บางตัวในการออกแบบ ซึ่งแสดงไว้ใน ภาคผนวก จ

สรุปและข้อเสนอแนะ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยในการออกแบบระบบบำบัดมลพิษอากาศ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ไซโคลอน เวทสครับเบอร์ และเตาเผาก๊าซและไอ ได้ตามประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษที่ต้องการได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมจะแสดงขนาดของอุปกรณ์ ค่าความดันสูญเสีย พลังงานที่ใช้ในการเดินระบบ กำลังของปั๊มและพัดลม รวมทั้งทรัพยากรอื่น ๆ ที่ใช้ในการเดินระบบ เช่น ปริมาณของเหลวที่ใช้ ปริมาณเชื้อเพลิง เป็นต้น พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณออกแบบสามารถนำไปคำนวณประเมินราคาของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากทำงานของอุปกรณ์ได้ จากการทดลองการใช้โปรแกรมได้ตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมกับวิธีการคำนวณด้วยมือ และโปรแกรมอื่นๆที่ได้มีผู้จัดทำขึ้นพบว่ามีความใกล้เคียงกัน และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถช่วยให้การคำนวณมีความสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนการคำนวณปกติ จึงทำให้ผู้ใช้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยมือและผลลัพธ์จากโปรแกรม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระบบบำบัดมลพิษอากาศแต่ละประเภท และใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกระบบบำบัดที่เหมาะสม สามารถบำบัดมลพิษได้ตามประสิทธิภาพที่ต้องการ ในราคาที่เหมาะสมด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จิตติมา สิงห์โตทอง. 2547. การพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบระบบกำจัดฝุ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฉัตรชัย นิยมมล . 2551. ระบบกำจัดฝุ่นและการระบายอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 4 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- นพภาพร พานิช. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2 ศูนย์บริการวิชาการแห่ง จุฬาลงกรณ์, กรุงเทพฯ.
- สมรวัฐ เกิดสุวรรณ. 2549. การเผาไหม้และการควบคุม. บริษัทสกายบุ๊กส์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- A.J. Design Software. 2002. **Venturi Scrubbers Design Equations Formulas Calculator**. Available Source http://www.ajdesigner.com/phpventuriscrubber/venturi_scrubber_equation_pressure_drop.php, June 1, 2010.
- Bayer MaterialScience. 2008. **Caustic Soda Solution**. Available Source: www.Bayermaterials.cience.com, May 25, 2011.
- Bunicore, J. and T. Davis. 1992. **Air pollution Engineering Manual**. Van nostrand reinhold, New York.
- Calvert, S. 1977. Scrubbing. **Air Pollution**. Academic Press, New York.
- Calvert, S., J. Goldschmid, D. Leith and D. Mehat. 1972. Wet Scrubber System Study. **Scrubber Handbook** vol. 1 (1972): 51-55.
- Calvert, S. and H.M. Englund. 1984. **Handbook of Air Pollution Technology**. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Chemical engineering. 2011. **Cost Index**. Available Source: www.che.com, March 1, 2011.

Cooper, C. and F.C. Alley. 1994. **Air Pollution Control**. Waveland Press, Illinois.

Crane Company. 1988. **Flow of fluids through valves, fittings, and pipe**. Technical Paper No. TP 410.

EPA. 2002. **Air Pollution Cost Manual**. Report No. EPA/452/B-02-001.

Katari, V.S., W.M Vatauvuk and A.H Wehe. 1987. Incineration Techniques for Control of Volatile Organic Compound Emission (Part I: Fundamental and Process Design Consideration). **Journal of Air Pollution Control Association** 37: 91-99.

Lapple, C.E. 1951. Process Use Many Collector Types **Chemical Engineering** 84 (24): 153-158.

Laval University. 2001. **Randomly Packed Bed Simulator Hydrodynamics & Mass transfer**. Available Source: www.gch.ulaval.ca/~nnfit, June 1, 2010.

Mycock, C., D. McKenna and L. Theodore. 1995. **Hand book of Air Pollution Control Engineering and Technology**. CRC Press, Inc., New York.

National Science Foundation (NSF). 2005. **Design a Cyclone**. Available Source: <http://arosol.Ees.ufl.edu/cyclone.html>, June 1, 2010.

NorFalco. 2007. **Sulfuric Acid Handbook**. Available Source: www.norfulco.com, July 5, 2010.

Nukiyama, S. and Y.Tanasawa . 1938. An Experiment on the Atomization of Liquid by Means of an Air Stream. **Transactions of the Society of the Mechanical Engineers** 4 (14): 100-107.

Perry, J. 1973. **Chemical Engineers Handbook**. McGraw Hill, New York.

TechFlowMp. 2011. **Air properties: Density and Viscosity**. Available Source: <http://www.techflowmp.net/cmsdrl/node/36>, February 1, 2011.

Thakore, B. and I. Bhatt. 2009. **Introduction to Process Engineering and Design**. McGraw-Hill, New Delhi.

Theodore, L. and Depaola, V. 1980. Predicting Cyclone Efficiency. **Journal of the air pollution control Association** 30 (10): 80-85.

Vatavuk, W 1990. **Estimating Costs of Air Pollution Control**. Lewis Publishers, Mishigan
Cited Grelecki, C. 1976. **Fundamental of fire and Explosion Hazards Evaluation**.
AIChE Today Series, New York.

Vatavuk, W 1990. **Estimating Costs of Air Pollution Control**. Lewis Publishers, Mishigan.

Vatavuk, W. and R. B. Neverill. 1980. Estimating Costs of Air Pollution Control Systems. part II: Factors for Estimating Capital and Operating Costs. **Chemical Engineering** 11: 157-162.

Vatavuk, W 1990. **Estimating Costs of Air Pollution Control**. Lewis Publishers, Mishigan.
Cited Peter, M.S. and K.D.Timmerhaus. 1980. **Plant Design and Economics for Chemical Engineering**. McGraw-Hill, New York.

Vatavuk, W 1990. **Estimating Costs of Air Pollution Control**. Lewis Publishers, Mishigan.

Cited Calvert, S. and H.M. Englund. eds. 1984. **Handbook of Air Pollution Technology**. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Yuanhui Zang. 2005. **Indoor Air Quality Engineering**. CRC Press, Inc., New York.

Yung, C.S., H.F. Barbarika and S. Calvert. 1977. Pressure Loss in Venturi Scrubber. **Journal of the Air Pollution Control Association** 27: 48-51.





ภาคผนวก ก

การคำนวณออกแบบและประเมินราคาของอุปกรณ์บำบัดมลพิษอากาศด้วยมือ

การออกแบบอุปกรณ์กำจัดฝุ่น

1. ไซโคลน

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงข้อมูลแยกแยะขนาดของฝุ่น

ขนาดฝุ่น (μm)	ร้อยละน้ำหนัก
0 – 2	1
2 – 4	5
4 – 6	9
6 – 10	10
10 – 18	10
18 – 30	10
30-50	40
50-100	15

- อัตราการไหลของก๊าซ $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$

- อุณหภูมิ 50°C

- ความดันของก๊าซ 1 atm หรือ 101325 Pa

- ความหนาแน่นของฝุ่น 1600 kg/m^3

- ความหนืดของก๊าซ ณ 50°C (μ_g) = $0.00001985 \text{ kg/m-s}$

- ความหนาแน่นของก๊าซ ณ 50°C (ρ_g) = 1.08787 kg/m^3

- ความเข้มข้นของฝุ่น (C_{in}) = $400 \mu\text{g/m}^3$

จากข้อมูลการแยกแยะขนาดของฝุ่นในตารางและข้อมูลอื่นข้างต้น จงออกแบบและประเมินราคาไซโคลนชนิด High Efficiency By Stairmand ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นรวมทั้งหมดอย่างน้อย 70%

วิธีการคำนวณ

กำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) = 1.762 m (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน
ที่คำนวณได้จากโปรแกรม)

1. คำนวณหาขนาดของไซโคลน

$$H = 0.5 \times 1.762 \text{ m} = 0.881 \text{ m}$$

$$S = 0.5 \times 1.762 \text{ m} = 0.881 \text{ m}$$

$$L_b = 1.5 \times 1.762 \text{ m} = 2.643 \text{ m}$$

$$D_d = 0.375 \times 1.762 \text{ m} = 0.661 \text{ m}$$

$$L_c = 2.5 \times 1.762 \text{ m} = 4.405 \text{ m}$$

$$W = 0.2 \times 1.762 \text{ m} = 0.352 \text{ m}$$

$$D_e = 0.5 \times 1.762 \text{ m} = 0.881 \text{ m}$$

2. หาพื้นที่ของทางเข้า (A) ของไซโคลน

$$A = 0.355 \text{ m} \times 0.887 \text{ m} = 0.310 \text{ m}^2$$

3. ความเร็วของก๊าซ ณ ทางเข้าไซโคลน (V_G)

$$V_G = \frac{Q_G}{A}$$

$$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_G = \frac{2.5 \text{ m}^3/\text{s}}{0.310 \text{ m}^2} = 8.065 \text{ m/s}$$

4. จำนวนรอบของการหมุนประสิทธิภาพ (N_e)

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right]$$

$$N_e = \frac{1}{0.881 \text{ m}} \times \left(2.643 \text{ m} + \frac{4.405 \text{ m}}{2} \right) = 5.5$$

5. คำนวณหาขนาดคัทไซท์ของฝุ่น (d_{pc})

$$d_{pc} = \left[\frac{9 \mu_G W}{2 \pi N_e V_G (\rho_p - \rho_G)} \right]^{1/2}$$

$$d_{pc} \left[\frac{9 \times 0.00001985 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \times 0.352 \text{m}}{2 \times 3.14 \times 5.5 \times 8.065 \frac{\text{m}}{\text{s}} (1600 - 1.08787) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right]^{1/2} \times \frac{10^6 \mu\text{m}}{1\text{m}} = 11.882 \mu\text{m}$$

6. คำนวณหาประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นแต่ละขนาดและประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นรวมทั้งหมด (η_o) ของไซโคลน

ตัวอย่างเช่น ขนาดฝุ่นเฉลี่ย = $1 \mu\text{m}$ ร้อยละน้ำหนัก = 1 %

สัดส่วนประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นของไซโคลน

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pi}} \right)^2}$$

ร้อยละประสิทธิภาพย่อย ($\% \eta_i$) และประสิทธิภาพรวม (η_o) ในการกำจัดฝุ่นของไซโคลน

$$\eta_i = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pi}} \right)^2} \right] \quad \text{หรือ} \quad \% \eta_i = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pi}} \right)^2} \right] W_i$$

$$\eta_o = \sum \eta_i W_i \quad \text{หรือ} \quad \eta_o = \sum \% \eta_i$$

$$\% \eta_i = \frac{1}{1 + \left[\frac{11.882 \mu\text{m}}{1 \mu\text{m}} \right]^2} \times 1\% = 0.007\%$$

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการคำนวณประสิทธิภาพย่อย ประสิทธิภาพรวมของไซโคลน

ขนาดฝุ่น เฉลี่ย	น้ำหนักฝุ่นแต่ละช่วงขนาด	สัดส่วนการกำจัดฝุ่นแต่ละขนาด	ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นแต่ละขนาด
$d_{pi} (\mu m)$	$W_i (\%)$	η_i	$\% \eta_i (\%)$
1	1	0.007	0.007
3	5	0.060	0.300
5	9	0.150	1.354
8	10	0.312	3.119
14	10	0.581	5.813
24	10	0.803	8.031
40	40	0.919	36.757
75	15	0.976	14.633
ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นรวม (η_o)			70.013

7. ค่าความดันสูญเสียหรือความดันลด

จำนวนเฮดของความเร็วที่ทางเข้า (H_v)

$$H_v = K \left(\frac{HW}{D_c^2} \right)$$

K = ค่าคงที่มีค่าเป็น 16 สำหรับไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นบังคับการไหลที่ทางเข้าของไซโคลน (Vane)

$$H_v = \frac{16 \times 0.881 \text{ m} \times 0.352 \text{ m}}{(0.881 \text{ m})^2} = 6.393 \text{ m}$$

ความดันสูญเสีย (ΔP)

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g V_G^2 H_v$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times 1.08787 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(8.065 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \times 6.393 = 219.052 \text{ kg/m-s}^2 \text{ หรือ Pa}$$

พลังงานสูญเสีย (w)

$$W = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 219.052 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2} = 547.629 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 \text{ หรือ } 0.548 \text{ kW}$$

กำลังม้าของพัดลม (Fhp)

$$Fhp = \frac{547.629 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 1.225 \text{ hp}$$

8. หาความเข้มข้นของฝุ่นในแต่ละช่วงขนาดและฝุ่นรวมทั้งหมดที่ออกจากไซโคลน

ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นขนาด $1 \mu\text{m}$ ที่เข้า (Cini) และออกจากไซโคลน (Couti)

$$C_{ini} = C_{in} \frac{W_i}{100}$$

$$C_{outi} = C_{ini} - [\eta_i C_{ini}]$$

$$C_{in1} = 400 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\%}{100} = 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$C_{out1} = 4 - \left[\left(\frac{0.001}{100} \right) \times 4 \right] = 3.960 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

ตารางผนวกที่ ก3 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละช่วงขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นรวมทั้งหมดที่เข้าและออกจากไซโคลน

d_{pi} μm	W_i %	C_{ini} $\mu g/m^3$	η_i	C_{outi} $\mu g/m^3$
1	1	4	0.007	3.972
3	5	20	0.060	18.801
5	9	36	0.150	30.584
8	10	40	0.312	27.523
14	10	40	0.581	16.748
24	10	40	0.803	7.874
40	40	160	0.919	12.973
75	15	60	0.976	1.469
รวม		400		119.946

หมายเหตุ C_{ini} = ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้าไซโคลน ณ ขนาดใด ๆ; C_{outi} = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากไซโคลน ณ ขนาดใด ๆ

9. การประเมินราคาไซโคลน

กำหนดให้

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 1988 = 345.3

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 2010 (มกราคม) = 532.9

พื้นที่ทางเข้าของไซโคลน = 0.310 m^2 หรือ 3.337 ft^2

เลือกชุดติดตั้งของไซโคลนที่ประกอบไปด้วย Cyclone, Fan, Motor, Support,

Hopper/Drum และ Rotary air lock

ราคาในการสั่งซื้อชุดติดตั้งไซโคลนประกอบไปด้วย

- ราคาของชุดติดตั้งไซโคลนที่ประกอบด้วย Cyclone, Fan, Motor, Supports และ

Hopper/drum

$$EC = 6520(A^{0.903})$$

- ราคาของ Rotary Air Lock

$$EC = 2730(A^{0.0965})$$

- ราคาชุดติดตั้งไซโคลน = ราคาชุดไซโคลน + ราคา Rotary Air Lock

$$EC = 6520(A^{0.903}) + 2730(A^{0.0965})$$

ราคาชุดติดตั้งไซโคลนในปี 1988

$$EC = 6520 \times (3.337^{0.903}) + 2730 \times (3.337^{0.0965}) = 22424.410 \text{ USD}$$

ราคาชุดติดตั้งไซโคลนในปี 2010

$$EC_2 = EC_1 \left(\frac{\text{Index}_2}{\text{Index}_1} \right)$$

$$EC_2 = 22424.410 \times \left(\frac{532.9}{345.3} \right) = 34607.495 \text{ USD}$$

2. เวนทูริสกรับเบอร์

จากข้อมูลการแจกแจงการกระจายขนาดของฝุ่นข้างต้น จงคำนวณเพื่อออกแบบและประเมินราคาเวนทูริสกรับเบอร์ โดยกำหนดให้

ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นรวมอย่างน้อย = 70 %

อัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราไหลของก๊าซ (Q_L/Q_G) = 1 l/m^3
หรือ $0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$

ความหนาแน่นของฝุ่น = 1600 kg/m^3 หรือ 1.6 g/cm^3

อัตราการไหลของก๊าซ = $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ หรือ $5298 \text{ ft}^3/\text{min}$

อุณหภูมิของก๊าซ = 30°C

ความหนืดของก๊าซ ณ อุณหภูมิ 30°C = $1.886 \times 10^{-4} \text{ Poise}$ หรือ g/cm-s

ความหนาแน่นของก๊าซ ณ อุณหภูมิ 30°C = 1.159 kg/m^3 หรือ 1.159×10^{-3}

ความหนาแน่นของของเหลว ณ อุณหภูมิ 25°C 1 atm = 1 g/cm^3 หรือ 1000 kg/m^3

ความหนืดของของเหลว ณ อุณหภูมิ 25°C 1 atm = 0.01 Poise หรือ 0.01 dyne-s/cm^2

แรงตึงผิวของของเหลว ณ อุณหภูมิ 25°C 1 atm = 72 dyne/cm หรือ 72 g/s^2

ความยาวของคอเวนทรี = 0.3 m หรือ 30 cm

ความเร็วของก๊าซที่คอของเวนทรี = 4.704 m/s

ประสิทธิภาพของพัดลม = 60 %

ประสิทธิภาพของปั๊มหมุนเวียนของเหลว = 60 %

ค่า Empirical Factor (f) ของฝุ่นชนิด Hydrophilic Particle = 0.5

1.หาขนาดของของเหลวที่ใช้ในการดักจับฝุ่น

$$D_d = \frac{58600}{V_G} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \left(\frac{\mu_L}{(\sigma \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \left(1000 \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5}$$

$$D_d = \frac{58600}{4.704 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 100 \frac{\text{cm}}{1\text{m}}} \left(\frac{72 \frac{\text{dyne}}{\text{cm}}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \right)^{0.5} + 597 \left(\frac{0.01 \frac{\text{dyne} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{72 \frac{\text{dyne}}{\text{cm}} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}} \right)^{0.45} \times \left(1000 \times 0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right)^{1.5}$$

$$= 1085.765 \mu\text{m}$$

2.หาค่าพารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคแต่ละขนาด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = $1 \mu\text{m}$

ค่า Cunningham ham correction factor

$$C_1 = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4} (T_G + 273.15)}{d_{pi}}$$

$$K_p = C \frac{\rho_p d_{pi}^2 V_G}{9 \mu_G D_d}$$

$$C_1 = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4} (30^\circ \text{C} + 273.15)}{1 \mu\text{m}} = 1.188$$

$$K_{p1} = 1.188 \frac{1.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \left(1 \mu\text{m} \times \frac{10^{-4} \text{cm}}{1 \mu\text{m}} \right)^2 \times 4.704 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 \text{cm}}{1\text{m}}}{9 \times 1.886 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \times 1085.765 \times 10^{-4} \text{cm}} = 0.049$$

3. สัดส่วนของอนุภาคหรือฝุ่นแต่ละขนาดที่ไม่สามารถถูกดักจับด้วยสกรับเบอร์

$$P_{ii} = \exp \left\{ \frac{Q_L V_G \rho_L D_d}{55 Q_G \mu_G} \left[-0.7 - K_{pf} + 1.4 \ln \left(\frac{K_{pf} + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + K_{pf}} \right] \frac{1}{K_p} \right\}$$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = $1 \mu\text{m}$

$$P_{ti} = \text{Exp} \frac{0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 4.704 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 \text{cm}}{1 \text{m}} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 1085.765 \mu\text{m} \times \frac{10^{-4} \text{cm}}{1 \mu\text{m}}}{55 \times 1.886 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}} \times \left[-0.7 - (0.049 \times 0.5) + 1.4 \ln \left(\frac{(0.049 \times 0.5) + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + (0.049 \times 0.5)} \right] \times \frac{1}{0.049}$$

$$= 0.999$$

4. ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นแต่ละขนาดของเวนทูรีสกรับเบอร์

เมื่ออนุภาคขนาด = $1 \mu\text{m}$

$$\% \eta_i = (1 - P_{ti}) W_i$$

$$\% \eta_i = (1 - 0.999) \times 1\% = 0.001 \%$$

ตารางผนวกที่ ก4 แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพย่อย/รวม ในการกำจัดฝุ่นของเวนทูรีสกรับเบอร์

d_{pi} μm	W_i %	C	K_p	P_{ti}	η_i	$\% \eta_i$ %
1	1	1.188	0.049	0.999	0.001	0.001
3	5	1.063	0.391	0.957	0.043	0.215
5	9	1.038	1.059	0.821	0.179	1.610
8	10	1.024	2.675	0.574	0.426	4.257
14	10	1.013	8.112	0.302	0.698	6.976
24	10	1.008	23.707	0.172	0.828	8.279
40	40	1.005	65.649	0.122	0.878	35.136
75	15	1.003	230.292	0.098	0.902	13.532
ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นรวม (η_o)						70.005

5. ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนคอของเวนทูรีสกรับเบอร์

หาตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของหยดของเหลว

$$Re = \frac{D_d V_G \rho_G}{\mu_G}$$

$$Re = \frac{1085.765 \mu\text{m} \times \frac{10^{-4} \text{ cm}}{1 \mu\text{m}} \times 4.704 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \times 1.159 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{1.886 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}} = 313.866$$

สัมประสิทธิ์แรงลาก

$$C_D = \alpha Re^{-\beta}$$

$$C_D = 18.5 \times (313.866)^{-0.6} = 0.588$$

หาความยาวไม่มีหน่วยของส่วนคอเวนทรี

$$X = \frac{3l C_D \rho_G}{16 D_d \rho_L} + 1$$

$$X = \frac{3 \times 0.3 \text{ m} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \times 0.588 \times 1.159 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{16 \times 1085.765 \times 10^{-4} \text{ cm} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + 1 = 1.035$$

ความดันสูญเสีย

$$\Delta P = 2 \rho_L V_G^2 \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \left(1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right)$$

$$\Delta P = 2 \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times \left(4.704 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2 \times 0.001 \times \left(1 - 1.035^2 + \sqrt{1.035^4 - 1.035^2} \right)$$

$$= 91.020 \text{ dyne/cm}^2$$

$$= 9.102 \text{ Pa หรือ } 0.037 \text{ inH}_2\text{O}$$

พลังงานสูญเสีย

$$W = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 9.102 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 22.755 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 \text{ หรือ } 0.023 \text{ kW}$$

กำลังของพัดลม

$$F_{hp} = \frac{22.755 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 0.051 \text{ hp}$$

6. คำนวณหาอัตราการหมุนเวียนของของเหลวต่อชั่วโมง

$$Q_L = 0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} = 9 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

อุณหภูมิที่ออกจากคอลัมน์และอัตราการระเหยของของน้ำในคอลัมน์

จาก Psychrometric chart

อัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ ที่อุณหภูมิ 30 °C หรือ 86 °F ความชื้น 20 %

$$X_x = 0.0059 \text{ lbH}_2\text{O/lbair}$$

อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 60 °F

อัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ อุณหภูมิ 60 °F ความชื้น 100 %

$$X_s = 0.011 \text{ lbH}_2\text{O/lbair}$$

สัดส่วนโมลของของน้ำในอากาศแห้ง

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{29}{18} \frac{\text{lbair}}{\text{lbmolair}}}{\frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbmolH}_2\text{O}}} \times 0.0059 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}} = 9.506 \times 10^{-3} \text{ lbmolH}_2\text{O/lbmolair}$$

จำนวนโมลของอากาศแห้ง

$$n_{Q_G} = 1 - (9.506 \times 10^{-3}) = 0.990$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ(ก๊าซ)

$$Q_{G_{\text{mass}}} = \frac{\frac{29}{32} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 101325 \text{ Pa} \times 0.990 \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{8314}{\text{kmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (30 + 273) ^\circ \text{K}} = 2.887 \text{ kg/s หรือ } 6.351 \text{ lbair/s}$$

อัตราการระเหยของน้ำในคอลัมน์

$$Q_{\text{LEV}} = \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \times \left[\frac{(0.011 - 0.0059) \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}} \times 6.351 \frac{\text{lbair}}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}}} \right] = 0.053 \text{ m}^3/\text{hr}$$

7. หาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสียทั้งหมด

กำหนดให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss, Blown down และ การระเหยเท่ากับ 1 % ของปริมาณน้ำที่ใช้หมุนเวียน

ปริมาณน้ำสูญเสีย

$$Q_{\text{Loss}} = \frac{1}{100} \times 9 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} = 0.09 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss และ Blown down

$$Q_{LDB} = 0.09 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} - 0.053 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} = 0.037 \text{ m}^3/\text{hr}$$

8. กำลังของปั๊มเพื่อใช้ในการสูบของเหลว

Pump head (h) = 5 m

0.745 kw = 1hp

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.8 m/s^2

$$\begin{aligned} \text{Php} &= \frac{Q_L \rho_L g H_p}{0.745(1000)(\eta_p/100)} \\ \text{Php} &= \frac{5 \text{ m} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 9 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \times \frac{1000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 0.274 \text{ hp} \end{aligned}$$

9. พื้นที่ภาคตัดขวางของคอนทรี

$$A = \frac{2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4.704 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.531 \text{ m}^2$$

10. คำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวทสครับเบอร์

ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นขนาด $1 \mu\text{m}$ ที่เข้า (C_{ini}) และออกจากเวทสครับเบอร์ (C_{outi})

$$\begin{aligned} C_{ini} &= C_{in} \frac{W_i}{100} \\ C_{outi} &= C_{ini} - [\eta_i C_{ini}] \\ C_{in1} &= 400 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1}{100} = 4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ C_{out1} &= 4 - [0.001 \times 4] = 3.996 \mu\text{g}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก5 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวนทูรีสกรับเบอร์

d_{pi}	W_i	C_{ini}	η_i	C_{outi}
μm	%	$\mu g/m^3$		$\mu g/m^3$
1	1	4	0.001	3.996
3	5	20	0.043	19.140
5	9	36	0.179	29.560
8	10	40	0.426	22.974
14	10	40	0.698	12.096
24	10	40	0.828	6.883
40	40	160	0.878	19.455
75	15	60	0.902	5.874
รวม		400		119.978

11. ประเมินราคาเวนทูรีสกรับเบอร์

กำหนดให้

ชุดติดตั้งเวนทูรีที่ทำมาจากวัสดุชนิดเหล็กคาร์บอน

อายุการทำงานของอุปกรณ์เวนทูรีเท่ากับ 10 ปี

ช่วงเวลาในการเดินระบบ = 8 hr/shift

ราคาของสารละลาย (น้ำ) = 0.5 USD/m³

ราคาค่าแรง = 10 USD/shift

ราคาค่าไฟฟ้า = 0.094 USD/kW-hr

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 1988 = 345.3

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 2010 (มกราคม) = 532.9

อัตราดอกเบี้ย = 7 %

ราคาในการสั่งซื้อเวนทูรีสกรับเบอร์ปี 1988

$$EC = 8180 + 1.41Q_G$$

$$EC = 8180 + (1.41 \times 5298 \frac{ft^3}{min}) = 15650.18 \text{ USD}$$

ราคาในการสั่งซื้อเวนทูรีสกรับเบอร์ปี 2010 (มกราคม)

$$EC = 15650.18 \times \left(\frac{532.9}{345.3} \right) = 24152.855 \text{ USD}$$

1. ต้นทุนทั้งหมด

ตารางผนวกที่ ก6 แสดงผลการประเมินราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดในอุปกรณ์วิศวกรรม
เบอร์

รายการ	ราคา (USD)
1. Capital direct costs	
1.1 Purchased equipment	
- Control device(2010), x	$8180 + (1.41 \times 5298) \times \left(\frac{532.9}{345.3} \right)$ 24152.855
- Auxiliary, y	-
- Instrumentation, 0.1(x+y)	0.1×24152.855 2415.286
- Taxes, 0.03(x+y)	0.03×24152.855 724.586
- Freight, 0.05(x+y)	0.05×24152.855 1207.643
Total, PE	28500.369
1.2 Installation	
- Foundation, support, 0.06PE	0.06×28500.369 1710.022
- Handling ,erection, 0.40PE	0.4×28500.369 11400.148
- Electrical, 0.01PE	0.01×28500.369 285.004
- Piping, 0.05PE	0.05×28500.369 1425.018
- Insulation, 0.03PE	0.03×28500.369 855.011
- Painting, 0.01PE	0.01×28500.369 285.004
Total	15960.207
Total capital direct cost, DC	$28500.369 + 15960.207$ 44460.576

2. Capital Indirect Cost, IC

- Engineering, Supervision, 0.1PE	0.1×28500.369	2850.037
-----------------------------------	------------------------	----------

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

รายการ		ราคา (USD)
- Construction field, 0.1PE	0.1×28500.369	2850.037
- Construction fee, 0.1PE	0.1×28500.369	2850.037
- Start up, 0.01PE	0.01×28500.369	285.004
- Performance test, 0.01PE	0.01×28500.369	285.004
- Contingencies, 0.03PE	0.03×28500.369	855.011
Total capital indirect cost, IC		9975.129
Total Capital Investment, TCI	$44460.576 + 9975.129$	54435.71

2. ค่าใช้จ่ายรายปี

ตารางผนวกที่ 7 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดในการเดินระบบเวนทริสแคร็บเบอร์

รายการ		ราคา (USD)
1. Direct annual costs		
Operating labor operator		
- operator, 5hr/shift	$5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} \times 10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}}$	54750.000
- Supervisor, 15% of operator	0.15×54750	8212.500
Operating material		
- Solvent, 0.5USD/m ³	$0.5 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3} \times 9 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 8 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}}$	39420.000
- Chemicals	-	-
Waste water disposal	-	-
Maintenance		
- Labor, 1.5hr/shift	$10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}} \times 1.5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}}$	16425.000

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

รายการ	ราคา (ต่อ)
- Material ,100% of	16425
Maintenance labor	16425.000
Electric charge	
- Fan	$0.051 \text{ hp} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times 0.094 \frac{\text{USD}}{\text{kW} - \text{hr}} \times 8 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}}$
- Pump	$0.274 \text{ hp} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times 0.094 \frac{\text{USD}}{\text{kW} - \text{hr}} \times 8 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}}$
Total direct annual cost	135431.262
2.Indirect annual costs	
Administrative charges, 0.02(TCI)	$0.02 \times (44460.576 + 9975.129)$
Property tax, 0.01(TCI)	$0.01 \times (44460.576 + 9975.129)$
Insurance, 0.01(TCI)	$0.01 \times (44460.576 + 9975.129)$
Overhead, 60% of Labor and Material Costs	$0.6 \times (54750 + 8212.5 + 16425 + 16425)$
Capital recovery, 0.1098TCI	$0.1098 \times (44460.576 + 9975.129)$
Total indirect annual cost	62487.848

หมายเหตุ TCI =DC+IC

3. เวทสครีเบอร์แบบไหลสวนทาง

จากข้อมูลการแจกแจงการกระจายขนาดของฝุ่นข้างต้น จงออกแบบเวทสครีเบอร์แบบไหลสวนทาง โดยกำหนดให้

ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นรวมอย่างน้อย = 70 %

อัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราไหลของก๊าซ (Q_L/Q_G) = 1 l/m^3
หรือ $0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$

อุณหภูมิของก๊าซ เข้า = 30°C

ความหนาแน่นของฝุ่น = 1.6 g/cm^3

ความหนืดของก๊าซที่ 30°C = $1.886 \times 10^{-4} \text{ Poise}$ หรือ g/cm-s

ความหนาแน่นของของเหลวที่ 25°C = 1.159 kg/m^3 หรือ 1.159×10^{-3}

ความหนืดของของเหลวที่ 25°C = 0.01 Poise หรือ 0.01 dyne-s/cm^2

ขนาดหยดของของเหลว = $500 \mu\text{m}$

ความสูงของคอลัมน์ = 2 m

ประสิทธิภาพของพัดลม = 60 %

ประสิทธิภาพของปั๊มหมุนเวียนของเหลว = 60 %

ความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านคอลัมน์ = 0.773 m/s

วิธีการคำนวณ

1. หาค่าพารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคแต่ละขนาด

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = $1 \mu\text{m}$

ค่า Cunningham ham correction factor

$$C = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4} (T_G + 273.15)}{d_{pi}}$$

$$K_p = C \frac{\rho_{p d_{pi}}^2 V_G}{9 \mu_G D_d}$$

$$C_1 = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4} (30^\circ\text{C} + 273.15)}{1 \mu\text{m}} = 1.188$$

$$Kp1 = 1.188 \frac{1.6 \frac{g}{cm^3} \left(\frac{1 \mu m \times 10^{-4} cm}{1 \mu m} \right)^2 \times 0.773 \frac{m}{s} \times \frac{100 cm}{1 m}}{9 \times 1.886 \times 10^{-4} \frac{g}{cm \cdot s} \times 500 \times 10^{-4} cm} = 0.015$$

2. ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นของของเหลว 1 หยด

$$\eta_d = \left(\frac{Kp}{Kp + 0.7} \right)^2$$

$$\text{เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น} = 1 \mu m$$

$$\eta_d = \left(\frac{0.015}{0.015 + 0.7} \right)^2 = 4.159 \times 10^{-4}$$

3. หาความเร็วในการตกของหยดน้ำ

$$V_{td} = \frac{0.153 D_d^{1.14} \rho_L^{0.71} g^{0.71}}{\mu_G^{0.43} \rho_G^{0.29}}$$

$$V_{td} = \frac{0.153 \times \left(500 \mu m \times \frac{3.281 ft}{1 m} \times \frac{10^{-6} m}{1 \mu m} \right)^{1.14} \times \left(1000 \frac{kg}{m^3} \times \left(\frac{2.205 lb}{1 kg} \right) \times \left(\frac{1 m^3}{35.31 ft^3} \right) \right)^{0.71} \times \left(32.2 \frac{ft}{s^2} \right)^{0.71}}{\left(1.886 \times 10^{-4} \frac{g}{cm \cdot s} \times \left(\frac{242 \frac{lb}{ft \cdot hr}}{1 \frac{g}{cm \cdot s}} \right) \times \left(\frac{1 hr}{3600 s} \right) \right)^{0.43} \times \left(1.159 \frac{kg}{m^3} \times \frac{2.205 lb}{1 kg} \times \frac{1 m^3}{1 ft^3} \right)^{0.29}}$$

$$= 6.185 \text{ ft/s หรือ } 6.185 \times 30.281 = 187.288 \text{ cm/s}$$

ตรวจสอบ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

$$Re = \frac{500 \mu m \times \frac{3.281 ft}{1 m} \times \frac{10^{-6} m}{1 \mu m} \times \left[6.185 \frac{ft}{s} - \left(0.773 \frac{m}{s} \times \frac{3.281 ft}{1 m} \right) \right] \times \left(1.159 \frac{kg}{m^3} \times \frac{2.205 lb}{1 kg} \times \frac{1 m^3}{1 ft^3} \right)}{\left(1.886 \times 10^{-4} \frac{g}{cm \cdot s} \times \left(\frac{242 \frac{lb}{ft \cdot hr}}{1 \frac{g}{cm \cdot s}} \right) \times \left(\frac{1 hr}{3600 s} \right) \right)}$$

$$= 34.185$$

$Re < 500$ แสดงว่าค่าความเร็วในการตกของหยดของเหลวมีค่าถูกต้อง

4. สัดส่วนของอนุภาคหรือฝุ่นแต่ละขนาดที่ไม่สามารถถูกดักจับด้วยเวทสกรับเบอร์

$$P_{ti} = \exp \left(\frac{-3 Q_L Z V_{td} \eta_d}{4 Q_G \Gamma_d (V_{td} - V_G)} \right)$$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = $1 \mu\text{m}$

$$P1 = \text{Exp} \left[\frac{-3 \times 0.001 \times 0.2 \times 187.288 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times 200 \text{cm} \times 4.159 \times 10^{-4}}{4 \times 0.025 \text{cm} \times \left(187.288 \frac{\text{cm}}{\text{s}} - 77.3 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right)} \right] = 0.999$$

หมายเหตุ : $\frac{Q_L}{Q_G}$ ต้องคูณด้วย 0.2 สำหรับการสูญเสียของเหลวที่เกิดที่ผนังของสกรับเบอร์ (Calvert (1984))

5. ประสิทธิภาพย่อยในการดักจับฝุ่นของสกรับเบอร์

$$\% \eta_i = (1 - P_{ti}) \times 1$$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = $1 \mu\text{m}$

$$\% \eta_i = (1 - 0.999) \times 1 = 0.001 \%$$

ตารางผนวกที่ 8 แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพย่อย/รวม ในการกำจัดฝุ่นของเวทสกรับเบอร์ แบบไหลสวนทาง

d_{pi} μm	W_i %	K_p	nd	P_{ti}	η_i	$\% \eta_i$ %
1	1	0.015	4.159×10^{-4}	0.999	8.5×10^{-4}	0.001
3	5	0.131	0.025	0.950	0.050	0.248
5	9	0.364	0.117	0.787	0.213	1.916
8	10	0.933	0.326	0.513	0.487	4.867
14	10	2.856	0.645	0.268	0.732	7.324
24	10	8.394	0.852	0.175	0.825	8.246
40	40	23.317	0.943	0.146	0.854	34.171
75	15	81.972	0.983	0.134	0.866	12.988
ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นรวม						69.761

5. ขนาดคอลัมน์

พื้นที่ภาคตัดขวาง

$$A = \frac{2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.773 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3.234 \text{ m}^2$$

เส้นผ่านศูนย์กลางจาก

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} A} = \sqrt{1.3A}$$

$$D = \sqrt{1.3 \times 3.234 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.050 \text{ m}$$

6. คำนวณหาอัตราการหมุนเวียนของของเหลวต่อชั่วโมง

$$Q_L = 0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} = 9 \text{ m}^3/\text{hr}$$

อุณหภูมิที่ออกจากคอลัมน์และอัตราการระเหยของของน้ำในคอลัมน์

จาก Psychrometric chart

อัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ ที่อุณหภูมิก๊าซที่เข้า 30 °C หรือ 86 °F ความชื้น 20 %

$$X_x = 0.0059 \text{ lbH}_2\text{O} / \text{lbair}$$

อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ที่อ่านได้จาก Psychrometric chart เท่ากับ 60 °F

อัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ อุณหภูมิ 60 °F ความชื้น 100 %

$$X_s = 0.011 \text{ lbH}_2\text{O} / \text{lbair}$$

สัดส่วนโมลของของน้ำในอากาศแห้ง

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{29 \frac{\text{lbair}}{\text{lbmolair}} \times 0.0059 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}}}{18 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbmolH}_2\text{O}}} = 9.506 \times 10^{-3} \text{ lbmolH}_2\text{O} / \text{lbmolair}$$

จำนวนโมลของอากาศแห้ง

$$n_{Q_G} = 1 - (9.506 \times 10^{-3}) = 0.990$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ(ก๊าซ)

$$Q_{\text{Gmass}} = \frac{29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 101325 \text{ Pa} \times 0.990 \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (30 + 273) ^\circ \text{K}} = 2.887 \text{ kg/s หรือ } 6.351 \text{ lbair/s}$$

อัตราการระเหยของน้ำในคอลัมน์

$$Q_{LEV} = \frac{3600s}{1hr} \times \left[\frac{(0.011 - 0.0059) \frac{lbH_2O}{lbair} \times 6.351 \frac{lbair}{s}}{1000 \frac{kg}{m^3} \times \frac{2.2lb}{1kg}} \right] = 0.053 m^3/hr$$

7. หาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสีย

กำหนดให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss, Blown down และ การระเหยเท่า 1 % ของปริมาณน้ำที่ใช้หมุนเวียน

ปริมาณน้ำสูญเสีย

$$Q_{LLOSS} = 9 \frac{m^3}{hr} \times \frac{1}{100} = 0.09 m^3/hr$$

ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss และ Blown down

$$Q_{LDB} = 0.09 \frac{m^3}{hr} - 0.053 \frac{m^3}{hr} = 0.037 m^3/hr$$

8. กำลังของปั๊มเพื่อใช้ในการสูบของเหลว

$$\text{Pump head} = 5 m$$

$$0.745 kw = 1hp$$

$$g = \text{ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก} = 9.8 m/s^2$$

$$P_{hp} = \frac{Q_L \rho_L g H_p}{0.745(1000)(\eta_P/100)}$$

$$P_{hp} = \frac{5m \times 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 9 \frac{m^3}{hr}}{\frac{3600s}{1hr} \times \frac{1000 \frac{kg \cdot m^2}{s^3}}{1kW} \times \frac{0.745kW}{1hp} \times \left(\frac{60}{100} \right)} = 0.274 hp$$

8. หาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวทสครับเบอร์

ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นขนาด $1 \mu m$ ที่เข้า (Cini) และออกจากเวทสครับเบอร์ (Couti)

$$C_{ini} = C_{in} \frac{W_i}{100}$$

$$C_{outi} = C_{ini} - [\eta_i C_{ini}]$$

$$C_{in1} = 400 \frac{\mu g}{m^3} \times \frac{1}{100} = 4 \mu g/m^3$$

$$C_{out1} = 4 - [0.001 \times 4] = 3.997 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

ตารางผนวกที่ ก9 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวทสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง

d_{pi} μm	W_i %	C_{ini} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	η_i	C_{outi} $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	1	4	0.001	3.997
3	5	20	0.050	19.008
5	9	36	0.213	28.335
8	10	40	0.487	20.533
14	10	40	0.732	10.705
24	10	40	0.825	7.014
40	40	160	0.854	23.316
75	15	60	0.866	8.048
รวม		400		120.955

4. เวทสกรับเบอร์แบบไหลตามขวาง

จากข้อมูลการแจกแจงการกระจายขนาดของฝุ่นข้างต้น จึงออกแบบสกรับเบอร์แบบไหลตามขวาง โดยกำหนดให้

ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นรวมอย่างน้อย = 70 %

อุณหภูมิของก๊าซ เข้า = 30 °C

อัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราไหลของก๊าซ (Q_L/Q_G) = 1 l/m³
หรือ 0.001 m³/m³

ความหนาแน่นของฝุ่น = 1.6 g/cm³

ความหนืดของก๊าซที่ 30 °C = 1.886x10⁻⁴ Poise หรือ g/cm-s

ความหนาแน่นของก๊าซที่ 30 °C = 1.159 kg/m³

ความหนาแน่นของของเหลวที่ 25 °C = 1 g/cm³

ความหนืดของของเหลวที่ 25 °C = 0.01 Poise หรือ dyne-s/cm²

ขนาดหยดของของเหลวที่ 25 °C = 500 μm

ความยาวของคอลัมน์ = 5 m

ความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านคอลัมน์ = 1 m/s

ความสูงของคอลัมน์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม = 2.2 m

1. หาค่าพารามิเตอร์การชนเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคแต่ละขนาด

ค่า Cunningham ham correction factor

$$C = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4} (T_G + 273.15)}{d_{pi}}$$

$$K_p = C \frac{\rho_p d_{pi}^2 V_G}{9 \mu_G D_d}$$

$$C_1 = 1 + \frac{6.21 \times 10^{-4} (30^\circ C + 273.15)}{1 \mu m} = 1.188$$

$$K_{p1} = 1.188 \frac{1.6 \frac{g}{cm^3} \times \left(1 \mu m \times \frac{10^{-4} cm}{1 \mu m} \right)^2 \times 1 \frac{m}{s} \times \frac{100 cm}{1 m}}{9 \times 1.886 \times 10^{-4} \frac{g}{cm \cdot s} \times 500 \times 10^{-4} cm} = 0.019$$

2. ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของของเหลว 1 หยด

$$\eta_d = \left(\frac{K_p}{K_p + 0.7} \right)^2$$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = 1 μm

$$\eta_{d1} = \left(\frac{0.019}{0.019 + 0.7} \right)^2 = 6.878 \times 10^{-4}$$

3. สัดส่วนของอนุภาคหรือฝุ่นแต่ละขนาดที่ไม่สามารถถูกดักจับด้วยเวทสกรับเบอร์

$$P_{di} = \exp \left(\frac{-3 Q_i Z \eta_d}{4 Q_{Grd}} \right)$$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = 1 μm

$$P = \exp \left[\frac{-3 \times 0.001 \times 0.2 \times 3.3 \times 100 \frac{cm}{m} \times 6.878 \times 10^{-4}}{4 \times 0.025 cm} \right]$$

$$= 0.999$$

4. ประสิทธิภาพย่อยในการดักจับฝุ่นของเวทสกรับเบอร์

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น = $1 \mu\text{m}$

$$\eta_1 = (1 - 0.999) \times 1 = 0.001 \%$$

ตารางผนวกที่ ก10 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพย่อย/รวม ในการดักจับฝุ่นของสกรับเบอร์ แบบไหลตามขวาง

d_{pi} μm	W_i %	K_p	nd	P_{ii}	$\% \eta_i$ %
1	1	0.019	6.878×10^{-4}	0.999	0.001
3	9	0.170	0.038	0.927	0.363
5	10	0.471	0.162	0.726	2.468
8	30	1.207	0.400	0.452	5.475
14	30	3.695	0.707	0.247	7.533
24	14	10.859	0.883	0.174	8.258
40	5	30.164	0.955	0.151	33.964
75	1	106.045	0.987	0.142	12.875
ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นรวม					70.938

5. ขนาดคอลิมน์

กำหนดความยาวของคอลิมน์ = 5 m

ความสูงของคอลิมน์ = 3.3 m

พื้นที่ภาคตัดขวางของคอลิมน์

$$A = \frac{2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.5 \text{ m}^2$$

ความกว้างของคอลิมน์

$$X = \frac{2.5 \text{ m}^2}{3.3 \text{ m}} = 0.747 \text{ m}$$

6. คำนวณหาอัตราการผลิตฝุ่นของของเหลวต่อชั่วโมง

$$Q_L = 0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{3600\text{s}}{1\text{hr}} = 9 \text{ m}^3/\text{hr}$$

อุณหภูมิที่ออกจากคอลัมน์และอัตราการระเหยของของน้ำในคอลัมน์

จาก Psychrometric chart

อัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ ที่อุณหภูมิของก๊าซ เข้า 30°C หรือ 86°F ความชื้น 20 %

$$X_x = 0.0059 \text{ lbH}_2\text{O}/\text{lbair}$$

อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 60°F

อัตราส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์
อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ 60°F ความชื้น 100 %

$$X_s = 0.011 \text{ lbH}_2\text{O}/\text{lbair}$$

สัดส่วนโมลของของน้ำในอากาศแห้ง

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{29 \frac{\text{lbAir}}{\text{lbmolAir}}}{18 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbmolH}_2\text{O}}} \times 0.0059 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbAir}} = 9.506 \times 10^{-3} \text{ lbmolH}_2\text{O}/\text{lbmolAir}$$

จำนวนโมลของอากาศแห้ง

$$n_{\text{G}} = 1 - (9.506 \times 10^{-3}) = 0.990$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ(ก๊าซ)

$$Q_{\text{Gmass}} = \frac{29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 101325 \text{Pa} \times 0.990 \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}} \times (30 + 273) ^\circ\text{K}} = 2.887 \text{ kg/s หรือ } 6.351 \text{ lbAir/s}$$

อัตราการระเหยของน้ำในคอลัมน์

$$Q_{\text{LEV}} = \frac{3600\text{s}}{1\text{hr}} \times \left[\frac{(0.011 - 0.0059) \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}} \times 6.351 \frac{\text{lbair}}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2.2\text{lb}}{1\text{kg}}} \right] = 0.053 \text{ m}^3/\text{hr}$$

7. หาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสีย

กำหนดให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss Blown down และ การระเหยเท่า 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ใช้หมุนเวียน

ปริมาณน้ำสูญเสีย

$$Q_{\text{Loss}} = 9/100 = 0.09 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss และ Blown down

$$Q_{\text{LDB}} = 0.09 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} - 0.053 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} = 0.037 \text{ m}^3/\text{hr}$$

8. กำลังของปั๊มเพื่อใช้ในการสูบของเหลว

Pump head = 5 เมตร

$$\begin{aligned} \text{Php} &= \frac{Q_L \rho_L g H_p}{0.745(1000)(\eta_p/100)} \\ \text{Php} &= \frac{5 \text{ m} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 9 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \times \frac{1000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 0.274 \text{ hp} \end{aligned}$$

ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นขนาด $1 \mu\text{m}$ ที่เข้า (Cini) และออกจาก
เวทสกรีนเบอร์ (Couti)

$$\begin{aligned} C_{\text{ini}} &= C_{\text{in}} \frac{W_i}{100} \\ C_{\text{outi}} &= C_{\text{ini}} - [\eta_i C_{\text{ini}}] \\ C_{\text{ini}} &= 400 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\%}{100} = 4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ C_{\text{outi}} &= 4 - [0.001 \times 4] = 3.997 \mu\text{g}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก11 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นที่ออกจากเวทสครับเบอร์แบบไหลตามขวาง

d_{pi}	W_i	C_{ini}	η_i	C_{outi}
μm	%	$\mu g/m^3$		$\mu g/m^3$
1	1	4	0.0014	3.995
3	5	20	0.073	18.548
5	9	36	0.274	26.126
8	10	40	0.548	18.100
14	10	40	0.753	9.869
24	10	40	0.826	6.969
40	40	160	0.849	24.142
75	15	60	0.858	8.501
รวม		400		116.250

การออกแบบอุปกรณ์กำจัดมลพิษชนิดก๊าซ

1. เวนทูรีสครับเบอร์

จงออกแบบเวนทูรีสครับเบอร์ เพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซไอเสีย $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ประกอบด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 4000 ppm หรือ $0.004 \text{ kmol SO}_2/\text{kmol Gas}$ โดยกำหนดให้

อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่เวนทูรีสครับเบอร์เท่ากับ 80°C หรือ 176°F

ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียที่ต้องการ = 85%

ความดันของก๊าซที่เข้าสู่คอลัมน์ = 1 atm หรือ 101325 Pa

ความหนาแน่นของก๊าซที่ 80°C = 0.995 kg/m^3

ความหนืดของก๊าซ ที่ 80°C = $2.121 \times 10^{-4} \text{ Poise}$

ใช้น้ำเพื่อเป็นสารละลายในการดูดซึม

ค่าความชันของเส้นสมดุลการละลายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในของน้ำ = 40.63

มวลโมเลกุลของน้ำ = 18 kg/kmol

ความหนืดของน้ำที่ 25°C = 0.8 cp

ความหนาแน่นของของน้ำ ที่ 25°C = 1000 kg/m^3 หรือ 62.2 lb/ft^3

ความเร็วของก๊าซในเวนทูรี = 100 m/s

ความยาวของคอเวนทูรี = 0.3 m

ประสิทธิภาพของพัดลม = 60%

ประสิทธิภาพของปั๊มที่ใช้ในสูบของน้ำ = 60%

วิธีการคำนวณ

1. คำนวณหาประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายมวลสาร

โดยทั่วไปจำนวน Transfer units ในเวนทูรีสครับเบอร์จะมีค่าประมาณ 1 – 2 ในที่นี้กำหนดให้จำนวน Transfer units มีค่าเท่ากับ 2 สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mef) ได้จาก

$$\text{Mef} = 1 - e^{-\text{Nog}}$$

$$\text{Mef} = 1 - e^{-2} = 0.8647$$

2. คำนวณหาความเข้มข้น (สัดส่วน โมล) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากเวนทูรีสครับเบอร์

$$Y_t = Y_b - \left[Y_b \left(\frac{n}{100} \right) \right]$$

$$Y_t = 0.004 \frac{\text{kmolSO}_2}{\text{kmol gas}} - \left[0.004 \frac{\text{kmolSO}_2}{\text{kmol gas}} \left(\frac{85}{100} \right) \right] = 0.0006 \text{ kmolSO}_2/\text{kmolGas}$$

3. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงโมลต่อพื้นที่ในส่วนคอนเวอเตอร์ของก๊าซต่อของเหลว

$$G_{\text{mol}}/L_{\text{mol}} = \frac{M_{\text{ef}} - \left(\frac{mX_{\text{L}}M_{\text{ef}}}{Y_t} \right) - \left(\frac{n}{100} \right)}{m \left(\frac{n}{100} \right)}$$

$$G_{\text{mol}}/L_{\text{mol}} = \frac{0.8647 - \left(\frac{40.63 \times 0.8647}{0.0006} \right) - \left(\frac{85}{100} \right)}{40.63 \times \left(\frac{85}{100} \right)}$$

$$= 4.256 \times 10^{-4} \frac{\text{kmol gas}/\text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{kmol liquid}/\text{m}^2 \cdot \text{s}} \text{ หรือ } \text{kmolGas}/\text{kmolLiquid}$$

4. คำนวณหาอัตราการไหลของน้ำโดยโมลต่อพื้นที่ของคอนเวอเตอร์

$$G_{\text{mol}} = \frac{35.28 P Q_G}{R(T_G + 273.15)}$$

$$L_{\text{mol}} = \frac{G_{\text{mol}}}{G_{\text{mol}}/L_{\text{mol}}}$$

$$G_{\text{mol}} = \frac{\frac{35.28 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} \times 1 \text{ atm} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.314 \frac{\text{atm} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (80 + 273.15) ^\circ \text{K} \times \frac{2.2 \text{ lbmol}}{1 \text{ kmol}}}$$

$$L_{\text{mol}} = \frac{G_{\text{mol}}}{G_{\text{mol}}/L_{\text{mol}}}$$

$$G_{\text{mol}} = \frac{\frac{35.28 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} \times 1 \text{ atm} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.314 \frac{\text{atm} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (80 + 273.15) ^\circ \text{K} \times \frac{2.2 \text{ lbmol}}{1 \text{ kmol}}} = 8.642 \times 10^{-2} \text{ kmolGas} / \text{s}$$

$$L_{\text{mol}} = \frac{8.642 \times 10^{-2} \frac{\text{kmol Gas}}{\text{s}}}{4.256 \times 10^{-4} \frac{\text{kmol Liquid}}{\text{kmol Gas}}} = 203.054 \text{ kmol Liquid / s}$$

5. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเหลว

$$Q_L = \frac{M_{\text{WL}} L_{\text{mol}}}{\rho_L} \times 3600$$

$$Q_L = \frac{18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 203.054 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 13158 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ หรือ } 3.655 \text{ m}^3/\text{s}$$

6. คำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากการระเหย

จาก Psychrometric chart

สัดส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ อุณหภูมิ 80 °C หรือ 176 °F ความชื้น 20 %

$$X_x = 0.12 \text{ lbH}_2\text{O/lbair}$$

อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 136 °F

สัดส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ อุณหภูมิ 136 °F ความชื้น 100 %

$$X_s = 0.13 \text{ lbH}_2\text{O/lbair}$$

สัดส่วนโมลของของน้ำในอากาศแห้ง

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{29 \frac{\text{lbair}}{\text{lbmolair}}}{18 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbmolH}_2\text{O}}} \times 0.12 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}} = 0.193 \frac{\text{lbmolH}_2\text{O}}{\text{lbmolair}}$$

จำนวนโมลของอากาศแห้ง

$$n_{\text{G}} = 1 - 0.193 = 0.807$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (ก๊าซ)

$$Q_{\text{Gmass}} = \frac{29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 101325 \text{ Pa} \times 0.807 \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (80 + 273.15) ^\circ \text{K}} = 2.019 \text{ kg/s}$$

อัตราการระเหยของน้ำในคอลัมน์

$$Q_{LEV} = \frac{3600s}{1hr} \times \left[\frac{(0.13-0.12) \frac{lbH_2O}{lbair} \times 2.019 \frac{kg}{s} \times \frac{2.2lb}{1kg}}{1000 \frac{kg}{m^3} \times \frac{2.2lb}{1kg}} \right] = 0.073 \text{ m}^3/hr$$

หาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสีย

กำหนดให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียทั้งหมดซึ่งเกิดจากการ Drift loss, Blown down และ การระเหยมีค่าเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ของปริมาณน้ำที่ใช้หมุนเวียน

ปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด

$$Q_{Lloss} = 13158 \frac{m^3}{hr} \times \frac{1}{100} = 131.58 \text{ m}^3/hr$$

ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss และ Blown down

$$Q_{LDB} = 131.58 \frac{m^3}{hr} - 0.073 \frac{m^3}{hr} = 131.507 \text{ m}^3/hr$$

7. หาอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซ

$$Q_L / Q_G = \frac{3.655 \frac{m^3}{s}}{2.5 \frac{m^3}{s}} = 1.462 \text{ m}^3/m^3 \text{ หรือ } 1462 \text{ l/m}^3$$

8. ค่าอัตราการไหลของน้ำต่อก๊าซที่คำนวณได้มีค่าเกินกว่า $0.7-2.7 \text{ l/m}^3$ ต้องทำการปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

กำหนดให้ค่าอัตราการไหลของน้ำต่อก๊าซใหม่เท่ากับ 2.7 l/m^3 หรือ $0.0027 \text{ m}^3/m^3$

8.1 คำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้และปริมาณน้ำสูญเสียเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราการไหลของน้ำต่อก๊าซเท่ากับ 2.7 l/m^3

$$\text{หาปริมาณน้ำที่ใช้} = 0.0027 \times 2.5 = 6.75 \times 10^{-3} \text{ m}^3/s \text{ หรือ } 24.3 \text{ m}^3/hr$$

หาปริมาณน้ำสูญเสียที่เกิดจากการระเหย Drift loss และ Blown down

$$24.3 \frac{m^3}{hr} \times \frac{1}{100} = 0.243 \text{ m}^3/hr$$

หาปริมาณน้ำสูญเสียจาก Drift loss และ Blown down

$$0.243 \frac{m^3}{hr} - 0.073 \frac{m^3}{hr} = 0.17 \text{ m}^3/hr$$

8.2 คำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์

หาอัตราการไหลเชิงโมลของน้ำต่อพื้นที่ของคอกวนทูลี่

$$L_{\text{mol}} = \frac{6.75 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.375 \text{ kmol/s}$$

หาสัดส่วนอัตราการไหลของก๊าซโดยโมลต่อพื้นที่ส่วนคอเวนทรีของก๊าซต่อน้ำ

$$G_{\text{mol}} / L_{\text{mol}} = \frac{8.642 \times 10^{-2} \frac{\text{kmol Gas}}{\text{s}}}{0.375 \frac{\text{kmol Liquid}}{\text{s}}} = 0.230 \text{ kmol Gas/kmol Liquid}$$

หาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของเวนทรีสครับเบอร์

$$\eta = \frac{M_{\text{ef}} \left(1 - mX_i/Y_i \right)}{\left(1 + \frac{mG_{\text{mol}}}{L_{\text{mol}}} \right)} \times 100$$

$$\eta = \left[\frac{0.8647(1-0)}{1 + (40.63 \times 0.230)} \right] \times 100 = 8.36 \%$$

สัดส่วนโมลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากเวนทรี

$$Y_i = 0.004 - \left(0.004 \times \left(\frac{8.36}{100} \right) \right) = 3.665 \times 10^{-3} \text{ kmol SO}_2/\text{kmol Gas}$$

9. คำนวณหาค่าความดันสูญเสียของก๊าซ

หาขนาดของหยดน้ำ

$$D_d = \frac{58600}{V_G} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \left(\frac{\mu_L}{(\sigma \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \left(1000 \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5}$$

$$D_d = \frac{58600}{100 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}}}{1 \text{m}} \left(\frac{72 \frac{\text{dyne}}{\text{cm}}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \right)^{0.5} + 597 \left(\frac{0.01 \frac{\text{dyne} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{72 \frac{\text{dyne}}{\text{cm}} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}} \right)^{0.45} \times \left(1000 \times 0.0027 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right)^{1.5}$$

$$= 177.094 \text{ } \mu\text{m}$$

หาเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของหยดน้ำ

$$Re = \frac{D_d V_G \rho_G}{\mu_G}$$

$$Re = \frac{177.094 \mu\text{m} \times \frac{10^{-4} \text{ cm}}{1 \mu\text{m}} \times 100 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \times 0.995 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{2.121 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}} = 830.780$$

$Re \geq 500$ ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากเท่ากับ 0.44

หาค่าความยาวไม่มีหน่วยของคอเวนทรี

$$X = \frac{3 \times 0.3 \text{ m} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \times 0.44 \times 0.995 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{16 \times 177.094 \times 10^{-4} \text{ cm} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + 1 = 1.1$$

หาค่าความดันสูญเสีย

$$\begin{aligned} \Delta P &= 2 \rho_L V_G^2 \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \left(1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right) \\ \Delta P &= 2 \times 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times \left(100 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2 \times 0.0027 \times \left(1 - 1.14^2 + \sqrt{1.14^4 - 1.14^2} \right) \\ &= 17517.6 \text{ dyne/cm}^2 \\ &= 1751.76 \text{ Pa หรือ kg/m-s}^2 \end{aligned}$$

พลังงานที่ใช้

$$\begin{aligned} W &= Q_G \Delta P \\ W &= 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1751.76 \frac{\text{kg}}{\text{m-s}^2} = 4379.4 \text{ Watt หรือ } 43.794 \text{ kW} \end{aligned}$$

10. กำลังของพัดลมที่ต้องใช้

$$F_{hp} = \frac{4379.4 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 97.973 \text{ hp}$$

11. กำลังของปั๊ม

$$P_{hp} = \frac{Q_L \rho_L g H_p}{0.745(1000)(\eta_p/100)}$$

$$\text{Php} = \frac{6 \text{ m} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 24.3 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}}{\frac{1000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 0.888 \text{ hp}$$

12. หาพื้นที่ส่วนคอของเวนทูรี

$$A = \frac{2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{100 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.025 \text{ m}^2$$

2. เวทสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง

จงออกแบบเวทสกรับเบอร์แบบไหลสวนทาง เพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซไอเสีย $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ประกอบด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 4000 ppm หรือ $0.004 \text{ kmol SO}_2/\text{kmol Gas}$

อุณหภูมิของก๊าซที่เข้าสู่สกรับเบอร์ 80°C หรือ 176°F

ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียที่ต้องการ = 85 %

ความดันของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่คอลัมน์ = 1 atm หรือ 101325 Pa

ความหนาแน่นของก๊าซไอเสีย ณ ที่อุณหภูมิ 80°C = 0.995 kg/m^3

ความหนืดของก๊าซไอเสีย ณ ที่อุณหภูมิ 80°C = $2.121 \times 10^{-4} \text{ poise}$

ใช้ 1% Lime เป็นสารละลายเพื่อใช้ในการดูดซึมซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ความเร็วของก๊าซในสกรับเบอร์ = 1.5 m/s

ประสิทธิภาพของพัดลม = 60 %

ประสิทธิภาพของปั๊มที่ใช้ในสูบของเหลว (สารละลาย) = 60 %

ข้อมูลของสกรับเบอร์แบบไหลสวนทางที่ใช้งานจริงอยู่จริง

อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย = $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$

บำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เข้มข้น 4000 ppm หรือ $0.004 \text{ kmol SO}_2/\text{kmol Gas}$ โดยใช้ 1% Lime เป็นสารละลายดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย 90°C

ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ = 90 %

ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากเวทสกรับเบอร์ = 400 ppm

$$\text{อัตราการหมุนเวียนของสารละลายที่ใช้} = 30 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\text{ความสูงของคอลัมน์} = 3.5 \text{ m}$$

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์} = 1.7 \text{ m}$$

$$\text{ค่าความดันสูญเสียของก๊าซที่ผ่านคอลัมน์} = 980 \text{ Pa}$$

วิธีการคำนวณ

1. คำนวณหาจำนวน Transfer units ในอุปกรณ์รีบเบอร์แบบไหลสวนทางที่ใช้งานจริง

$$EN_{OG} = \frac{EY_b - EY_i}{EY_i}$$

$$EN_{OG} = \frac{4000 \text{ ppm} - 400 \text{ ppm}}{400 \text{ ppm}} = 9$$

2. คำนวณหาปริมาตรคอลัมน์ของเวทสรีบเบอร์แบบไหลสวนทางเดิมที่ใช้งานจริง

$$EV = \frac{\pi}{4} ED^2 EZ$$

$$EV = \frac{3.14}{4} (1.7 \text{ m})^2 \times 3.5 \text{ m} = 7.940 \text{ m}^3$$

3. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงโมลของเวทสรีบเบอร์แบบไหลสวนทางเดิมที่ใช้งานจริง

$$EG_{mol} = \frac{35.28 EPEQ_G}{R(ET_G + 273.15)}$$

$$EG_{mol} = \frac{\frac{35.28 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} \times 1 \text{ atm} \times 3.3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.314 \frac{\text{atm} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (90 + 273.15) ^\circ \text{K} \times \frac{2.2 \text{ lbmol}}{1 \text{ kmol}}} = 0.111 \text{ kmol/s}$$

4. คำนวณหาสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในก๊าซในอุปกรณ์เวทสรีบเบอร์แบบไหลสวนทางเดิมที่ใช้งานจริง

$$EK_{ya} = \frac{EN_{OG} (EG_{mol})}{EV}$$

$$EK_{ya} = \frac{9 \times 0.111 \frac{\text{kmol}}{\text{s}}}{7.940 \text{ m}^3} = 0.126 \text{ kmol/s} \cdot \text{m}^3$$

5. คำนวณหาสัดส่วนโมลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากเวทสรีบเบอร์

$$Y_i = Y_b - \left(\frac{\eta_r Y_b}{100} \right)$$

$$Y_t = 0.004 - \left(\frac{85 \times 0.004}{100} \right) = 0.0006$$

6. คำนวณหาจำนวน Transfer units

$$N_{OG} = \frac{Y_b - Y_t}{Y_t}$$

$$N_{OG} = \frac{0.004 - 0.0006}{0.0006} = 5.67$$

7. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซที่เข้าสู่คอลัมน์

$$G_{mol} = \frac{35.28 P Q_G}{R(T_G + 273.15)}$$

$$G_{mol} = \frac{\frac{35.28 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} \times 1 \text{ atm} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.314 \frac{\text{atm} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (80 + 273.15) ^\circ \text{K} \times \frac{2.2 \text{ lbmol}}{\text{kmol}}} = 8.642 \times 10^{-2} \text{ kmol/s}$$

8. คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D), ปริมาตร (V), ความสูง (Z) ของคอลัมน์

$$D = \sqrt{\frac{4 Q_G}{\pi V_G}}$$

$$V = \frac{(N_{OG}) G_{mol}}{E K_y a}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{3.14 \times 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 1.457 \text{ m}$$

$$V = \frac{5.67 \times 8.642 \times 10^{-2} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}}{0.126 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}}} = 3.889 \text{ m}^3$$

$$Z = \frac{3.889 \text{ m}^3 \times 4}{3.14 \times (1.457 \text{ m})^2} = 2.334 \text{ m}$$

9. คำนวณหาปริมาณสารละลาย

$$Q_L = \frac{Q_G}{E Q_G} (E Q_L)$$

$$Q_L = \frac{2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{3.3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \times 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 22.727 \text{ m}^3/\text{s}$$

10. คำนวณหาปริมาณน้ำที่ระเหยและอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจากคอลัมน์

จาก Psychrometric chart

สัดส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ ที่อุณหภูมิ 80 °C หรือ 176 °F ความชื้น 20 %

$$X_x = 0.12 \text{ lbH}_2\text{O/lbair}$$

อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 136 °F

สัดส่วนของของเหลวต่ออากาศแห้ง ณ อุณหภูมิ 136 °F ความชื้น 100 %

$$X_s = 0.13 \text{ lbH}_2\text{O/lbair}$$

สัดส่วนโมลของของน้ำในอากาศแห้ง

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{29 \frac{\text{lbair}}{\text{lbmolair}}}{18 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbmolH}_2\text{O}}} \times 0.12 \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}} = 0.193 \frac{\text{lbmolH}_2\text{O}}{\text{lbmolair}}$$

จำนวนโมลของอากาศแห้ง

$$n_{Q_G} = 1 - 0.193 = 0.807$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (ก๊าซ)

$$Q_{\text{Gmass}} = \frac{29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 101325 \text{ Pa} \times 0.807 \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (80 + 273.15) ^\circ \text{K}} = 2.019 \text{ kg/s}$$

อัตราการระเหยของน้ำในคอลัมน์

$$Q_{\text{LEV}} = \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \times \left[\frac{(0.13 - 0.12) \frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbair}} \times 2.019 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}}} \right] = 0.073 \text{ m}^3/\text{hr}$$

หาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเนื่องจากการสูญเสีย

กำหนดให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss, Blown down และ การระเหยเท่า 1 % ของปริมาณน้ำที่ใช้หมุนเวียน

ปริมาณน้ำสูญเสีย

$$Q_{\text{Loss}} = 22.727 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1}{100} = 0.227 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณน้ำที่สูญเสียจาก Drift loss และ Blown down

$$Q_{\text{LDB}} = 0.227 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} - 0.073 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} = 0.154 \text{ m}^3/\text{hr}$$

11. คำนวณหาค่าความดันสูญเสีย

$$\Delta P = E \Delta P \left[\frac{Q_G}{EQ_G} \right]^{1.84} \left[\frac{D}{ED} \right]^{-4.84} \left[\frac{Z}{EZ} \right]$$

$$\Delta P = 980 \text{ Pa} \left[\frac{2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{3.3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \right]^{1.84} \left[\frac{1.457 \text{ m}}{1.7 \text{ m}} \right]^{-4.84} \left[\frac{2.334 \text{ m}}{3.5 \text{ m}} \right] = 827.24 \text{ Pa}$$

12. คำนวณหาพลังงานที่ต้องใช้

$$W = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 827.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2068 \text{ Watt หรือ } 2.068 \text{ kW}$$

13. คำนวณหากำลังของพัดลม

$$F_{\text{hp}} = \frac{2068 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 4.626 \text{ hp}$$

14. คำนวณหากำลังของปั๊มที่ใช้

Pump head = 6 m

$$P_{\text{hp}} = \frac{Q_L \rho_L g H_p}{0.745(1000)(\eta_P/100)}$$

$$P_{\text{hp}} = \frac{22.727 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 6 \text{ m}}{\frac{1000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 0.830 \text{ hp}$$

3. Packed Bed Column

จงออกแบบ Packed Bed Column เพื่อกำจัดก๊าซแอมโมเนียในก๊าซหรืออากาศเสีย $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่ประกอบด้วยแอมโมเนียเข้มข้น 5 % หรือ $0.05 \text{ kmol NH}_3/\text{kmol Gas}$

อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 30°C ความดัน 1 atm

ความหนืดของอากาศเสียที่ $30^\circ\text{C} = 0.0000133 \text{ lb/ft-s}$

ความหนาแน่นของอากาศเสียที่ $30^\circ\text{C} = 0.071 \text{ lb/ft}^3$

ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย = 95 %

ความดันของอากาศเสียที่เข้าสู่คอลัมน์ = 1 atm หรือ 101325 Pa

ใช้น้ำเพื่อเป็นสารละลายในการดูดซึมแอมโมเนีย

ชนิดของตัวกลางที่ใช้บรรจุในคอลัมน์ คือ Ceramic Rascing rings ขนาด 1 in

ค่าความชื้นของเส้นสมดุลการละลายของแอมโมเนียในน้ำ = 0.706

ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ = 0

มวลโมเลกุลของน้ำ = 18 kg/kmol

ความหนืดของน้ำที่ $25^\circ\text{C} = 0.8 \text{ cp}$

ความหนาแน่นของน้ำที่ $25^\circ\text{C} = 1000 \text{ kg/m}^3$ หรือ 62.2 lb/ft^3

สัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวที่แท้จริงต่ออัตราการไหลของของเหลวต่ำสุด = 1.5

สัดส่วนอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่แท้จริงต่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียทำให้เกิด

การไหลย้อนกลับของของเหลว = 0.5

ประสิทธิภาพของพัดลม = 60 %

ประสิทธิภาพของปั๊มที่ใช้ในสูบน้ำ = 60 %

วิธีการคำนวณ

1. สัดส่วนโมลของแอมโมเนียที่ละลายในน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์

$$X_b = Y_b / m$$

$$X_b = \frac{0.05}{0.706} = 0.0708$$

2. สัดส่วนโมลของแอมโมเนียที่ในก๊าซที่ออกจากคอลัมน์

$$G = 1 - Y_b$$

$$Y_t = \frac{\left(1 - \frac{\eta}{100}\right) Y_b}{G + \left(\left(1 - \frac{\eta}{100}\right) Y_b\right)}$$

$$G = 1 - 0.05 = 0.95$$

$$Y_t = \frac{\left(1 - \left(\frac{95}{100}\right)\right) \times 0.05}{0.95 + \left(\left(1 - \left(\frac{95}{100}\right)\right) \times 0.005\right)} = 0.0026$$

3. สัดส่วนโมลของน้ำที่ต้องการต่อโมลของก๊าซต่ำสุดที่ใช้ในการเดินระบบ

$$(L/G)_{mn} = \frac{\left(\frac{Y_t}{1 - Y_t} - \frac{Y_b}{1 - Y_b}\right)}{\frac{X_t}{1 - X_t} - \frac{X_b}{1 - X_b}}$$

$$L/G_{mn} = \frac{\left(\frac{0.0026}{1 - 0.0026} - \frac{0.05}{1 - 0.05}\right)}{\left(\frac{0}{1 - 0} - \frac{0.0708}{1 - 0.0708}\right)} = 0.656$$

4. สัดส่วนโมลของน้ำที่ต้องการต่อโมลของก๊าซที่ใช้ในการเดินระบบ

$$L/G = (L/G)_{mn} R_L$$

$$L/G = 0.656 \times 1.5 = 0.984$$

5. จำนวน Transfer units

คำนวณหา Absorption factor

$$A = \frac{L/G}{m}$$

$$A = \frac{0.984}{0.706} = 1.394$$

5. จำนวน Transfer units

$$NTU = \frac{\ln \left[\frac{\left(\frac{Y_b}{1-Y_b} \right) - m \left(\frac{X_t}{1-X_t} \right)}{\left(\frac{Y_t}{1-Y_t} \right) - m \left(\frac{X_t}{1-X_t} \right)} \times \left(1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{1 - \frac{1}{A}}$$

$$NTU = \frac{\ln \left[\frac{\left(\frac{0.05}{1-0.05} - 0.706 \times 0 \right)}{\left(\frac{0.0026}{1-0.0026} - 0.706 \times 0 \right)} \times \left(1 - \frac{1}{1.394} \right) + \frac{1}{1.394} \right]}{1 - \left(\frac{1}{1.394} \right)} = 6.581$$

6. คำนวณความหนาแน่นของก๊าซ

$$\rho_v = \frac{P[(29G + Y_b M_{wy})]}{0.08206(T_G + 273.15)}$$

$$\rho_v = \frac{1 \text{ atm} \left[\left(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 0.95 \right) + \left(0.05 \times 17 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) \right] \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}}}{0.08206 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{gmol} \cdot ^\circ \text{K}} (30 + 273.15)^\circ \text{K} \times \frac{1000 \text{ gmol}}{1 \text{ kmol}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{35.28 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3}} = 0.071 \text{ lb/ft}^3$$

7. คำนวณหาค่าในแกน X ใน U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation Diagram

$$X = \frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x - \rho_y}}$$

โดยที่

$$\frac{G_x}{G_y} = \frac{LM_{wx}}{[(G29) + (Y_b M_{wy})]}$$

$$L = (L/G)G$$

$$L = 0.984 \times 0.95 = 0.934 \text{ kmol}$$

$$X = \frac{0.934 \text{ kmol} \times 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{\left[\left(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times 0.95 \text{ kmol} \right) + \left(0.05 \text{ kmol} \times 17 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) \right]} \times \sqrt{\frac{0.071 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{62.2 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} - 0.071 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}} = 0.02$$

จาก U.S Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation Diagram ค่าแกน Y ที่

$$\text{Pressure drop/ft เท่ากับ } 1.5 \text{ in/ft} = 0.5$$

$$\text{ค่าแกน Y ที่ X เท่า } 0.02 = 0.06$$

8. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงโมลต่อพื้นที่ของคอลัมน์ ที่ทำให้เกิดการไหลกลับของน้ำ (G_{Yf})

$$\text{โดยที่ F คือ ค่า Packing Factor} = 525 \text{ m}^{-1}$$

$$G_{Yf} = \left[\frac{g_{Y_{axis}} \rho_Y [(\rho_X - \rho_Y)]}{F (\mu_X)^{0.1}} \right]^{0.5}$$

$$G_{Yf} = \left[\frac{32.174 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \times 0.06 \times 0.071 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \left[\left(62.2 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} - 0.071 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \right]}{\left(525 \frac{1}{\text{m}} \times \frac{1 \text{ m}}{3.28 \text{ ft}} \right) (0.8)^{0.1}} \right]^{0.5} = 0.233 \text{ lb/ft}^2\text{-s}$$

9. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงโมลต่อพื้นที่ของก๊าซไอเสียที่แท้จริง (G_{act})

$$R_G = 0.5$$

$$G_{act} = R_G G_{Yf}$$

$$G_{act} = 0.233 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2\text{-s}} \times 0.5 = 0.116 \text{ lb/ft}^2\text{-s}$$

10. อัตราไหลเชิงโมลของก๊าซไอเสีย

$$G_{mol} = \frac{35.28 P Q_G}{R(T_G + 273.15)}$$

$$G_{mol} = \frac{\frac{35.28 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} \times 1 \text{ atm} \times 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.314 \frac{\text{atm} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbmol} \cdot ^\circ \text{K}} \times (30 + 273.15) ^\circ \text{K} \times \frac{2.2 \text{ lbmol}}{1 \text{ kmol}}} = 0.101 \text{ kmol/s}$$

11. อัตราไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสีย

$$G_{mass} = G_{mol} [(1 - Y_b) 29 + (Y_b M_{wy})]$$

$$G_{mass} = 0.101 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \left[\left(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \times (1 - 0.05) \right) + \left(0.05 \times 17 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) \right] = 2.868 \text{ kg/s}$$

12. พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)

m

$$A = \left[\frac{G_{\text{mass}}}{G_{\text{act}}} \right]$$

$$A = \frac{2.868 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.116 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}} \times \left(\frac{3.281 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right)^2 \times \left(\frac{1 \text{ kg}}{2.2 \text{ lb}} \right)} = 5.053 \text{ m}^2$$

13. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 5.053 \text{ m}^2}{\pi}} = 2.536 \text{ m}$$

14. อัตราการหมุนเวียนโดยโมลของน้ำ

$$Q_{\text{Lmol}} = 0.984 \times 0.101 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} = 9.94 \times 10^{-2} \text{ kmol/s}$$

15. อัตราการหมุนเวียนของน้ำเชิงปริมาตร

$$Q_L = \left[\frac{Q_{\text{Lmol}} M_{\text{wy}}}{\rho_x} \right] \times 3600$$

$$Q_L = \frac{9.94 \times 10^{-2} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \times 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{\left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \right)} \times 3600 = 6.467 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ หรือ } 1.796 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

16. การคำนวณหาความสูงของตัวกลาง

กรณีไม่ทราบความสูง Transfer Unit (HTU) และในกรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวดูดซึมสามารถคำนวณได้โดย

ตรวจสอบอัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่ของคอลัมน์ว่าอยู่ในช่วงที่สามารถคำนวณหา HTU ได้หรือไม่ โดย

หาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซต่อพื้นที่ของคอลัมน์ (G_{sfr})

$$G_{\text{sfr}} = 0.116 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} = 417.586 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{hr}$$

G_{sfr} อยู่ในช่วง 400-500 lb/ft²·hr

หาอัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว (L_{sfr})

$$L_{fsr} = \frac{9.94 \times 10^{-2} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \times \frac{18 \text{ kg}}{\text{kmol}} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}}}{5.053 \text{ m}^2 \times \left(\frac{3.281 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right)^2} = 260.508 \text{ lb/ft}^2\text{-hr}$$

L_{fsr} อยู่ในช่วง 200-800 lb/ft²-hr

จากตารางค่าคงที่ของตัวกลางชนิด Ceramic Raching rings ขนาด 1 in

$$\alpha = 7$$

$$\beta = 0.39$$

$$\gamma = 0.58$$

$$\phi = 0.00357$$

$$b = 0.35$$

$$f = 0.65$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของก๊าซแอมโมเนียในอากาศ (D_y) เท่ากับ 0.236 cm²/s
หรือ 2.540x10⁻⁴ ft²/s

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของก๊าซแอมโมเนียในน้ำ (D_x) เท่ากับ 1.76x10⁵ cm²/s
หรือ 189.445 ft²/s

หาความสูง Transfer Unit เมื่อพิจารณาในส่วนของก๊าซ (H_{OG})

$$H_{OG} = \left[\alpha \frac{(fG_{flux})^\beta}{(L_{flux})^\gamma} \right] \sqrt{\frac{\mu_y}{\rho_y D_y}}$$

$$H_{OG} = 7 \text{ ft} \times \frac{\left(0.65 \times 417.586 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2\text{-hr}} \right)^{0.39}}{\left(260.508 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2\text{-hr}} \right)^{0.58}} \times \sqrt{\frac{0.0000133 \frac{\text{lb}}{\text{ft-s}}}{0.071 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 2.54 \times 10^{-4} \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}}} = 2.071 \text{ ft}$$

หาความสูงของ Liquid Transfer Unit เมื่อพิจารณาในส่วนของของเหลว (H_{OL})

$$H_{OL} = \phi \left(\frac{L_{flux}}{\mu_x} \right)^b \sqrt{\frac{\mu_x}{\rho_x D_x}}$$

$$H_{OL} = 0.00357 \times \left[\frac{260.508 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{hr}}}{2.42 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{0.8 \text{cp} \cdot \text{hr}} \cdot \frac{1 \text{cp}}{1 \text{cp}}} \right]^{0.35} \times \sqrt{\frac{2.42 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{hr}}{3600 \text{s}}}{0.8 \text{cp} \cdot \frac{1 \text{cp}}{62.2 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 189.445 \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}}}} = 4.248 \times 10^{-6} \text{ ft}$$

คำนวณหาความสูง Transfer Unit (HTU)

$$HTU = H_{OG} + \frac{1}{A} H_{OL}$$

$$HTU = 2.071 \text{ ft} + \frac{1}{1.394} \times 4.248 \times 10^{-6} \text{ ft} = 2071 \text{ ft หรือ } 0.631 \text{ m}$$

คำนวณหาความสูงของตัวกลาง (Z)

$$Z = HTU \times NTU$$

$$Z = 0.631 \text{ m} \times 6.581 = 4.153 \text{ m}$$

17. คำนวณหาค่าความดันสูญเสีย

$$\Delta P = Z(\Delta P / Z)$$

$$\Delta P = 3.281 \frac{\text{ft}^3}{\text{m}} \times 4.153 \text{ m} \times 0.5 \frac{\text{inH}_2\text{O}}{\text{m}} \times \frac{249 \text{ Pa}}{1 \text{ inH}_2\text{O}} = 1696.436 \text{ Pa}$$

18. คำนวณหาพลังงานที่ใช้

$$W = Q_G \Delta P$$

$$W = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1696.436 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 4241.09 \text{ Watt หรือ } 4.241 \text{ kW}$$

19. คำนวณหากำลังของพัดลม

$$F_{hp} = \frac{W}{0.745(1000)(\eta_F/100)}$$

$$F_{hp} = \frac{4241.090 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 9.488 \text{ hp}$$

20 คำนวณหากำลังของปั๊มที่ใช้ในสูบของเหลว

$$\text{Pump Head } (H_p) = 6 \text{ m}$$

$$P_{hp} = \frac{Q_L \rho_L g H_p}{0.745(1000)(\eta_P/100)}$$

$$\text{Php} = \frac{1.796 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 6\text{m}}{\frac{1000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{1\text{kW}} \times \frac{0.745\text{kW}}{1\text{hp}} \times \frac{60}{100}} = 0.243 \text{ hp}$$

21. การประเมินราคา Packed Bed Column

กำหนดให้

$$\text{ความสูงของคอลัมน์มีค่า} = 6 \text{ m}$$

$$\text{ราคาของตัวกลางที่ใช้} = 26531 \text{ USD}$$

$$\text{อายุการทำงานของอุปกรณ์เท่ากับ} 10 \text{ ปี}$$

$$\text{ช่วงเวลาในการเดินระบบ} = 8 \text{ hr/shift}$$

$$\text{ราคาของสารละลาย (น้ำ)} = 0.5 \text{ USD/m}^3$$

$$\text{ราคาค่าแรง} = 10 \text{ USD/hr}$$

$$\text{ราคาค่าไฟฟ้า} = 0.094 \text{ USD/kW-hr}$$

$$\text{ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 1991} = 361.3$$

$$\text{ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 2010 (มกราคม)} = 532.9$$

$$\text{อัตราดอกเบี้ย} = 7 \%$$

21.1 คำนวณหาพื้นที่ผิวของคอลัมน์

$$S = \pi D \left(Z + \frac{D}{2} \right)$$

$$S = 2.536\text{m} \times 3.14 \times \left(6\text{m} + \frac{2.536\text{m}}{2} \right) = 58.358 \text{ m}^2 \text{ หรือ } 628.218 \text{ ft}^2$$

21.2 คำนวณประเมินราคาของคอลัมน์ในปี 1991

$$\text{TTC} = 115S$$

$$\text{TTC} = 115 \times 628.218 = 72245.07 \text{ USD}$$

คำนวณประเมินราคาของคอลัมน์ในปี 2010

$$\text{TTC} = 72245.07 \times \left(\frac{532.9}{361.3} \right) = 106557.979 \text{ USD}$$

21.3 คำนวณประเมินราคาของ Packed Bed Column

$$\text{EC} = \text{TTC} + \text{Packing Costs} + \text{Auxiliary Equipments}$$

$$\text{EC} = 26531 + 106557.979 + 0 = 133089 \text{ USD}$$

21.4 กำหนดหาราคาในการลงทุนทั้งหมดแสดงในตารางผนวกที่ ก12

ตารางผนวกที่ ก12 แสดงผลการประเมินราคาการลงทุนทั้งหมดใน Packed Bed Column

รายการ		ราคา (USD)
1. Direct costs		
1.1 Purchased equipment		
- Control device(2010), x		133089.000
- Auxiliary, y		-
- Instrumentation, 0.1(x+y)	0.1x133089	13308.900
- Taxes, 0.03(x+y)	0.03x133089	3992.670
- Freight, 0.05(x+y)	0.05x133089	6654.450
Total (PE)		157045.020
1.2 Installation		
- Foundation, support, 0.12PE	0.12x157045.020	18845.402
- Handling ,erection, 0.4PE	0.4x157045.020	62818.008
- Electrical, 0.01PE	0.01x157045.020	1570.450
- Piping, 0.3PE	0.3x157045.020	47113.506
- Insulation, 0.01PE	0.01x157045.020	1570.450
- Painting, 0.01PE	0.01x157045.020	1570.450
Total		133488.267
Total capital direct cost, DC		290533.287
1.3 Site preparation		
1.4 Facilities building		
2. Indirect costs		
Installation		
- Engineering, supervisor, 0.1PE	0.1x157045.020	15704.502
- Construction, field, 0.1PE	0.1x157045.020	15704.502

ตารางผนวกที่ ก12 (ต่อ)

รายการ	ราคา (USD)
- Construction, fee, 0.1PE	0.1×157045.020
- startup, 0.01PE	0.01×157045.020
- Performance test, 0.01PE	0.01×157045.020
- Contingencies, 0.03PE	0.03×157045.020
Total capital indirect cost, IC	54965.757

4. คำนวณหาค่าใช้จ่ายรายปี

ตารางผนวกที่ ก13 แสดงผลการผลการประเมินค่าใช้จ่ายรายปีใน Packed Bed Column

รายการ	ราคา (USD)
1. Direct annual costs	
Operating Labor Operator	
- operator, 5hr/shift	$5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} \times 10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}}$
- Supervisor, 15% of operator	0.15×5475
Operating Material	
- Solvent t, 0.5USD/m ³	$0.5 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3} \times 6.467 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 8 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}}$
Maintenance	
- Labor, 0.5hr/shift	$10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}} \times 0.5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}}$
- Material, 100% of	5475
Maintenance labor	
Utilities	

ตารางผนวกที่ ก13 (ต่อ)

รายการ	ราคา (USD)
Electric charge	
- Fan	$11.517 \text{ hp} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times 0.094 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \times 8 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} = 7065.251$
- Pump	$0.234 \text{ hp} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times 0.094 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \times 8 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} = 143.550$
Total annual direct cost	52780.511
2. Indirect annual costs	
Administrative charges, 0.02(TCI)	$0.02 \times (290533.287 + 54965.757) = 6909.981$
Property tax, 0.01(TCI)	$0.01 \times (290533.287 + 54965.757) = 3454.990$
Insurance, 0.01(TCI)	$0.01 \times (290533.287 + 54965.757) = 3454.990$
Overhead, 60% of Labor and Material Costs	$0.6 \times (290533.287 + 54965.757) = 9855.000$
Capital recovery 0.1098TCI	$0.1098 \times (290533.287 + 54965.757) = 49060.864$
Total annual indirect cost	72735.826

หมายเหตุ TCI=DC+IC

4. เตาเผาโดยใช้ความร้อน

จงออกแบบเตาเผาก๊าซและไอ ชนิดเตาเผาโดยใช้ความร้อน เพื่อเผาทำลายเบนซีน 1000 ppm และ เมทิลแอลกอฮอล์ 1000 ppm ในอากาศเสียที่มีอัตราการไหล $10 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 38°C โดยกำหนดให้

ประสิทธิภาพในการเผาทำลาย = 98 %

ประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ = 35 %

อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ = 900°C

อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่เตาเผา = 38°C

ความเร็วของก๊าซในห้องเผาไหม้ = 10 m/s

ระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในห้องเผาไหม้ = 0.7 s

ความร้อนที่สูญเสียในห้องเผาไหม้ = 10 %

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (ก๊าซธรรมชาติ) = 20000 kJ/m^3

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง = 0.862 kg/m^3

อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาเผา = 25°C

ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ 25°C เท่ากับ $1.0022 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

ค่าความหนาแน่นของอากาศ 1.18 kg/m^3 ที่ $25^\circ\text{C} = 1.18 \text{ kg/m}^3$

ค่าความร้อนเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเบนซีน = $134077.537 \text{ kJ/m}^3$

ค่าความร้อนเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเมทิลแอลกอฮอล์ = 28595.263 kJ/m^3

วิธีการคำนวณ

1. ตรวจสอบปริมาณออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบในก๊าซไอเสียว่าเพียงพอต่อการเผาไหม้หรือไม่

$$A = 100 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{10^{-6}} \right) \times 100$$

$$= 99.8 \%$$

$$\text{O}_2 = 0.209A$$

$$\text{O}_2 = 0.209 \times 99.8 = 20.858 \%$$

$\text{O}_2 > 20 \%$ แสดงว่าปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้

2. ตรวจสอบค่าร้อยละของ LEL ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายรวมทั้งหมดในก๊าซไอเสีย

ค่า ร้อยละ LEL ของ

เบนซีน = 1.4 หรือ 14,000 ppmv

เมทิลแอลกอฮอล์ = 6.72 หรือ 67,200 ppmv

$$Y_T = \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$Y_T = 1000 \text{ ppmv} + 1000 \text{ ppmv}$$

$$LEL_{mix} = \left[\frac{Y_T}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{Y_T LEL_i} \right)} \right]^{-1} \times 100$$

$$LEL_{mix} = \left[\frac{2000 \text{ ppmv}}{\left(\frac{1000 \text{ ppmv}}{2000 \text{ ppmv} \times 14000 \text{ ppmv}} + \frac{1000 \text{ ppmv}}{2000 \text{ ppmv} \times 67200 \text{ ppmv}} \right)} \right]^{-1} \times 100 = 8.628\%$$

3. ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$\Delta h_V = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i \Delta h_{Vi}) \times 10^{-6} \right]$$

$$\Delta h_V = \left(1000 \text{ ppmv} \times 134077.535 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times 10^{-6} \right) + \left(1000 \text{ ppmv} \times 28595.263 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times 10^{-6} \right)$$

$$= 162.673 \text{ kJ/m}^3$$

4. คำนวณหาอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$T_{wo} = T_{wi} + (Er/100)(T_{fi} - T_{wi})$$

$$T_{wo} = 38^\circ \text{C} + \left(\frac{35}{100} \times (900^\circ \text{C} - 38^\circ \text{C}) \right) = 339.7^\circ \text{C}$$

5. หาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

$$Q_{af} = \left[\frac{Q_{wi}(H_{fi} - H_{wo}) + Q_a(H_{fi} - H_a) - \left[(\Delta h_V) \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right]}{\left[(\Delta h_{af}) \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right] - [H_{fi} - H_{af}]} \right]$$

โดยที่

$$H_{fi} = C_{p_{air}} \rho_{wi} (T_{fi} - 25)$$

$$H_a = C_{p\text{air}} \rho_a (T_a - 25)$$

$$H_{af} = C_{p\text{af}} \rho_{af} (T_{af} - 25)$$

$$H_{wo} = C_{p\text{air}} \rho_{wo} (T_{wo} - 25)$$

$$H_{fi} = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (900^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 1034.771 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_a = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (25^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 0 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_{af} = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 0.862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (25^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 0 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_{wo} = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (339.7^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 372.163 \text{ kJ/m}^3$$

$$Q_{af} = \left[\frac{10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \left(1034.7715 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 372.163 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \left(1034.7715 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 0 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) - \left(162.673 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - \left(1 - \frac{10}{100} \right) \right) }{20000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times \left(1 - \left(\frac{10}{100} \right) \right) - \left(1034.7715 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 0 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)} \right]$$

$$= 0.382 \text{ m}^3/\text{s}$$

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อชั่วโมง

$$Q_{af} = 0.382 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 0.862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{3600\text{s}}{1\text{hr}} = 1185.232 \text{ kg/hr}$$

6. หาขนาดของห้องเผาไหม้

หาอัตราการไหลเชิงปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้

$$Q_{fi} = 10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 0.382 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 10.382 \text{ m}^3/\text{s} \text{ หรือ } 22003.552 \text{ ft}^3/\text{min}$$

หาขนาดความยาวของห้องเผาไหม้

$$L = V_G t$$

$$L = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.7\text{s} = 7 \text{ m}$$

พื้นที่ตัดขวางของห้องเผาไหม้

$$A = \frac{10.381 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.038 \text{ m}^2$$

ปริมาตรของห้องเผาไหม้

$$\text{Vol} = 1.038 \text{ m}^2 \times 7 \text{ m} = 7.267 \text{ m}^3$$

เตาเผาแบบพื้นที่หน้าตัดทรงกลม

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{1.038 \text{ m}^2 \times 4}{3.142}} = 1.150 \text{ m}$$

เตาแบบพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$X = \sqrt{A}$$

$$X = \sqrt{1.038 \text{ m}^2} = 1.019 \text{ m}$$

เตาแบบพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความสูง

$$X = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

$$X = \sqrt{\frac{1.038 \text{ m}^2}{2}} = 0.720 \text{ m}$$

ความกว้าง

$$Y = 2X$$

$$Y = 0.720 \text{ m} \times 2 = 1.44 \text{ m}$$

7. คำนวณหาค่าความดันสูญเสีย

$$\Delta P = \Delta P_{\text{In}} + \Delta P_{\text{Ex}}$$

$$\Delta P = 4 \text{ in. H}_2\text{O} + 4 \text{ in. H}_2\text{O} = 8 \text{ in. H}_2\text{O}$$

หมายเหตุ: ค่าความดันสูญเสียที่เกิดในห้องเผาไหม้สำหรับ Thermal Incinerator มีค่าเท่ากับ 4 in.H₂O ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพ 35% มีค่าเท่ากับ 4 in.H₂O

8. คำนวณหากำลังของพัดลมที่ใช้

$$W = \frac{249 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{1 \text{ in. H}_2\text{O}} \times 10.382 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 8 \text{ in. H}_2\text{O} = 20680.822 \text{ Watt หรือ } 20.681 \text{ kW}$$

$$F_{hp} = \frac{20680.822 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 46.262 \text{ hp}$$

9. การคำนวณประเมินราคา กำหนดให้

อายุการทำงานของอุปกรณ์เท่ากับ 10 ปี

ช่วงเวลาในการเดินระบบ = 8 hr/shift

ราคาของเชื้อเพลิง = 0.266 USD/kg

ราคาค่าแรง = 10 USD/shift

ราคาค่าไฟฟ้า = 0.094 USD/kW-hr

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 1988 = 342.5

ดัชนีการปรับเปลี่ยนราคาในปี 2010 (มกราคม) = 532.9

อัตราดอกเบี้ย = 7 %

คำนวณเพื่อประเมินราคาสั่งซื้อเตาเผาในปี 1988

$$EC = 13149 Q_{tot}^{0.2609}$$

$$13149 \times (22001.433)^{0.2609} = 178582.207 \text{ USD}$$

คำนวณเพื่อประเมินราคาสั่งซื้อเตาเผาในปี 2010

$$178582.206 \text{ USD} \times \left(\frac{532.9}{342.5} \right) = 2277858.270 \text{ USD}$$

9.1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด

ตารางผนวกที่ ก14 แสดงผลการคำนวณประเมินราคาในการลงทุนทั้งหมดในเตาเผาโดยใช้ความร้อน (TCI)

รายการ	รายจ่าย (USD)
1. Direct Cost	
1.1 Purchased equipment	
- Control device (2010), x	$13149 \times (22001.433)^{0.2609} \times \left(\frac{532.9}{342.5} \right)$ 277858.270
- Auxiliary, y	0.000
- Instrumentation , 0.1(x+y)	$0.1 \times (277858.270 + 0)$ 27785.827
- Taxes, 0.03(x+y)	$0.03 \times (277858.270 + 0)$ 8335.748
- Freight, 0.05(x+y)	$0.05 \times (277858.270 + 0)$ 13892.913
Total (PE)	327872.758
1.2 Installation	
- Foundation, support, 0.08(PE)	0.08×327872.758 26229.821
- Handling ,erection, 0.14(PE)	0.14×327872.758 45902.186
- Electrical, 0.04(PE)	0.04×327872.758 13114.910
- Piping, 0.02(PE)	0.02×327872.758 6557.455
- Insulation, 0.01(PE)	0.01×327872.758 3278.728
- Painting, 0.01(PE)	0.01×327872.758 3278.728
Total direct cost, DC	426234.586
1.3 Site preparation	-
1.4 Facilities building	-
2. Indirect costs	
Installation	
- Engineering, supervision, 0.1(PE)	0.1×327872.758 32787.276

ตารางผนวกที่ ก14 (ต่อ)

รายการ	รายจ่าย (USD)
- Construction, field, 0.05(PE)	0.05×327872.758 16393.638
- Construction, fee, 0.1(PE)	0.1×327872.758 32787.276
- Startup, 0.02(PE)	0.02×327872.758 6557.455
- Performance test, 0.01(PE)	0.01×327872.758 3278.728
- Contingencies, 0.03(PE)	0.03×327872.758 9836.183
Total indirect cost, IC	101640.555

9.2 ค่าใช้จ่ายรายปี

ตารางผนวกที่ ก15 แสดงผลการคำนวณประเมินค่าใช้จ่ายรายปีที่ใช้ในการเดินระบบเตาเผาโดยใช้ความร้อน

รายการ	รายจ่าย
1. Direct annual cost	
Operating Labor Operator	
- Operator, 0.5 hr/shift	$0.5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} \times 10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}}$ 5475.000
- Supervisor, 15% of Operator labor	0.15×5475 821.250
Maintenance	
- Labor	$0.5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} \times 10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}}$ 5475.000
- Material	$0.5 \frac{\text{hr}}{\text{shift}} \times 3 \frac{\text{shift}}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{yr}} \times 10 \frac{\text{USD}}{\text{hr}}$ 5475.000
Utilities	

ตารางผนวกที่ ก15 (ต่อ)

รายการ	รายจ่าย
- Fan (Electric)	$0.094 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \times 46.266 \text{ hpx}$ $\frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{\text{shift}}{3} \times \frac{\text{hr}}{8} \times \frac{\text{d}}{365} \times \frac{\text{yr}}{\text{shift}}$
- Fuel	$0.266 \frac{\text{USD}}{\text{kg}} \times 1185.232 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ $\times \frac{\text{hr}}{8} \times \frac{\text{shift}}{3} \times \frac{\text{d}}{365} \times \frac{\text{yr}}{\text{shift}}$
Total direct annual cost	2807408.917
2. Indirect annual cost	
Administrative Charges, 0.02(TCI)	$0.02 \times (426234.586 + 101640.555)$
Property tax, 0.01(TCI)	$0.01 \times (426234.586 + 101640.555)$
Insurance, 0.01(TCI)	$0.01 \times (426234.586 + 101640.555)$
Overhead, 60% of Labor and Material Costs	$0.6 \times (5475 + 5475 + 5475 + 821.25)$
Capital Recovery	$\frac{0.07 \times (1 + 0.07)^{10}}{(1 + 0.07)^{10} - 1}$
CRF(TCI)	$\times (426234.586 + 101640.555)$
Total indirect annual cost	106421.026

หมายเหตุ $TCI = IC + DC$, $CRF = \frac{[i(1+i)^m]}{[(1+i)^m - 1]}$

5. เตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

จงออกแบบเตาเผาแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเผาทำลายเบนซีน 1000 ppm และ เมทิลแอลกอฮอล์ 1000 ppm ในอากาศเสียที่มีอัตราการไหล $10 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 38°C โดยกำหนดให้

ประสิทธิภาพในการเผาทำลาย = 98 %

ประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ = 35 %

อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ = 400°C

ความเร็วของก๊าซในห้องเผาไหม้ = 10 m/s

ระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในห้องเผาไหม้ = 0.7 s

ความร้อนที่สูญเสียในห้องเผาไหม้ = 10 %

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง = 20000 kJ/m^3

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง = 0.862 kg/m^3

อุณหภูมิของเชื้อเพลิง = 25°C

ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ 25°C เท่ากับ $1.18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$

ค่าความหนาแน่นของอากาศ 1.18 kg/m^3

Space Velocity = 5 s^{-1}

ค่าความหนาแน่นของอากาศ 1.18 kg/m^3 ที่ 25°C = 1.18 kg/m^3

ค่าความร้อนเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเบนซีน = $134077.537 \text{ kJ/m}^3$

ค่าความร้อนเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเมทิลแอลกอฮอล์ = 28595.263 kJ/m^3

วิธีการคำนวณ

1. ตรวจสอบปริมาณออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบในก๊าซไอเสียว่าเพียงพอต่อการเผาไหม้หรือไม่

$$A = 100 - \left[\frac{(1000 + 1000)}{10^6} \times 100 \right] = 99.8 \%$$

$$\text{O}_2 = 0.209 \times 99.8 = 20.858 \%$$

$\text{O}_2 > 20$ เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้

2. ตรวจสอบค่า LEL รวมทั้งหมดในก๊าซไอเสีย

ค่าร้อยละ LEL ของ

เบนซีน = 1.4 หรือ 14,000 ppmv

เมทิลแอลกอฮอล์ = 6.72 หรือ 67,200 ppmv

$$Y_T = 1000 \text{ ppmv} + 1000 \text{ ppmv}$$

$$\text{LEL}_{\text{mix}} = \left[\frac{2000 \text{ ppmv}}{\left(\frac{1000 \text{ ppmv}}{2000 \text{ ppmv} \times 14000 \text{ ppmv}} + \frac{1000 \text{ ppmv}}{2000 \text{ ppmv} \times 672000 \text{ ppmv}} \right)} \right]^{-1} \times 100$$

$$= 8.628 \%$$

3. ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$\Delta h_v = (1000 \times 134077.535 \times 10^{-6}) + (1000 \times 28595.263 \times 10^{-6})$$

$$= 162.673 \text{ kJ/m}^3$$

4. หาอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$T_{wo} = 38 + \left(\frac{35}{100} \times (400 - 38) \right) = 164.7^\circ \text{C}$$

5. หาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

$$Q_{af} = \frac{Q_{wi}(H_{fi} - H_{wo}) + Q_a(H_{fi} - H_a) - \left[(\Delta h_v) \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right]}{\left[(\Delta h_{af}) \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right] - [H_{fi} - H_{af}]}$$

$$H_{fi} = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (400^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}) = 443.474 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_a = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (25^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}) = 0 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_{af} = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \times 0.862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (25^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}) = 0 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_{wo} = 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (164.7^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}) = 165.209 \text{ kJ/m}^3$$

$$Q_{af} = \frac{10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \left(443.474 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 165.209 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \left(443.474 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 0 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) - \left(162.673 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times \left(1 - \frac{10}{100} \right) \right)}{20000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times \left(1 - \left(\frac{10}{100} \right) \right) - \left(443.474 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} - 0 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$= 0.150 \text{ m}^3/\text{s}$$

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อชั่วโมง

$$Q_{af} = 0.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 0.862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{3600\text{s}}{1\text{hr}} = 465.969 \text{ kg/hr}$$

6. หาอุณหภูมิของก๊าซที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

หาค่าความร้อนของก๊าซที่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยา

$$H_{ri} = \frac{Q_{af} \left[\Delta h_{af} \left(1 - \frac{HL}{100} \right) \right] + Q_{af} H_a + Q_{wi} H_{wo}}{Q_{wi} + Q_a + Q_{af}}$$

$$T_{ri} = \frac{H_{ri} + 25 \rho_{wi} C_{p\text{mair}}}{\rho_{wi} C_{p\text{mair}}}$$

$$H_{ri} = \frac{0.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \left[20000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times \left(1 - \frac{10}{100} \right) \right] + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 0 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} + 10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 165.209 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}}{10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 0.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}$$

$$= 429.050 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ri} = \frac{429.050 \text{ } ^\circ\text{C} + \left(25 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right)}{1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.0022 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}}$$

$$= 387.804 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7. หาขนาดของห้องเผาไหม้

หาอัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้

$$Q_{fi} = Q_{wo} + Q_a + Q_{af}$$

$$Q_{fi} = 10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 0.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 10.150 \text{ m}^3/\text{s}$$

หาขนาดความยาวของห้องเผาไหม้

$$L = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.7\text{s} = 7 \text{ m}$$

พื้นที่ตัดขวางของห้องเผาไหม้

$$A = \frac{10.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.015 \text{ m}^2$$

ปริมาตรของห้องเผาไหม้

$$\text{Vol} = 1.015 \text{ m}^2 \times 7 \text{ m} = 7.105 \text{ m}^3$$

เตาเผาแบบพื้นที่หน้าตัดทรงกลม

$$d = \sqrt{\frac{1.015 \text{ m}^2 \times 4}{3.14}} = 1.137 \text{ m}$$

เตาเผาแบบพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$X = \sqrt{1.015 \text{ m}^2} = 1.007 \text{ m}$$

เตาเผาแบบพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

กำหนดให้ขนาดด้านยาว (Y) ของพื้นที่ภาคตัดขวางของเตาเผาเป็นค่าเป็น สองเท่าของด้าน

กว้าง (X)

ความกว้าง

$$X = \sqrt{\frac{1.015 \text{ m}^2}{2}} = 0.712 \text{ m}$$

ความกว้าง

$$Y = 0.712 \text{ m} \times 2 = 1.424 \text{ m}$$

8. หาปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา

หาอัตราการไหลของก๊าซ ณ อุณหภูมิ 60 °F

$$Q_{60} = \frac{15.6 Q_{fi}}{T_{ref}}$$

$$Q_{60} = \frac{10.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 15.6^\circ \text{C}}{25^\circ \text{C}} = 6.334 \text{ m}^3/\text{s}$$

หาปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$V_{cat} = \frac{Q_{fi}}{\phi}$$

$$\text{Vol}_{cat} = \frac{10.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{5 \text{ s}^{-1}} = 2.030 \text{ m}^3$$

หาความหนาของตัวเร่งปฏิกิริยา (CL)

$$CL = \frac{V_{cat}}{A}$$

$$CL = \frac{2.030 \text{ m}^3}{1.105 \text{ m}^2} \quad 2 \text{ m}$$

9. คำนวณหาอัตราค่าความดันสูญเสีย

10. คำนวณหาอัตราค่าความดันสูญเสีย

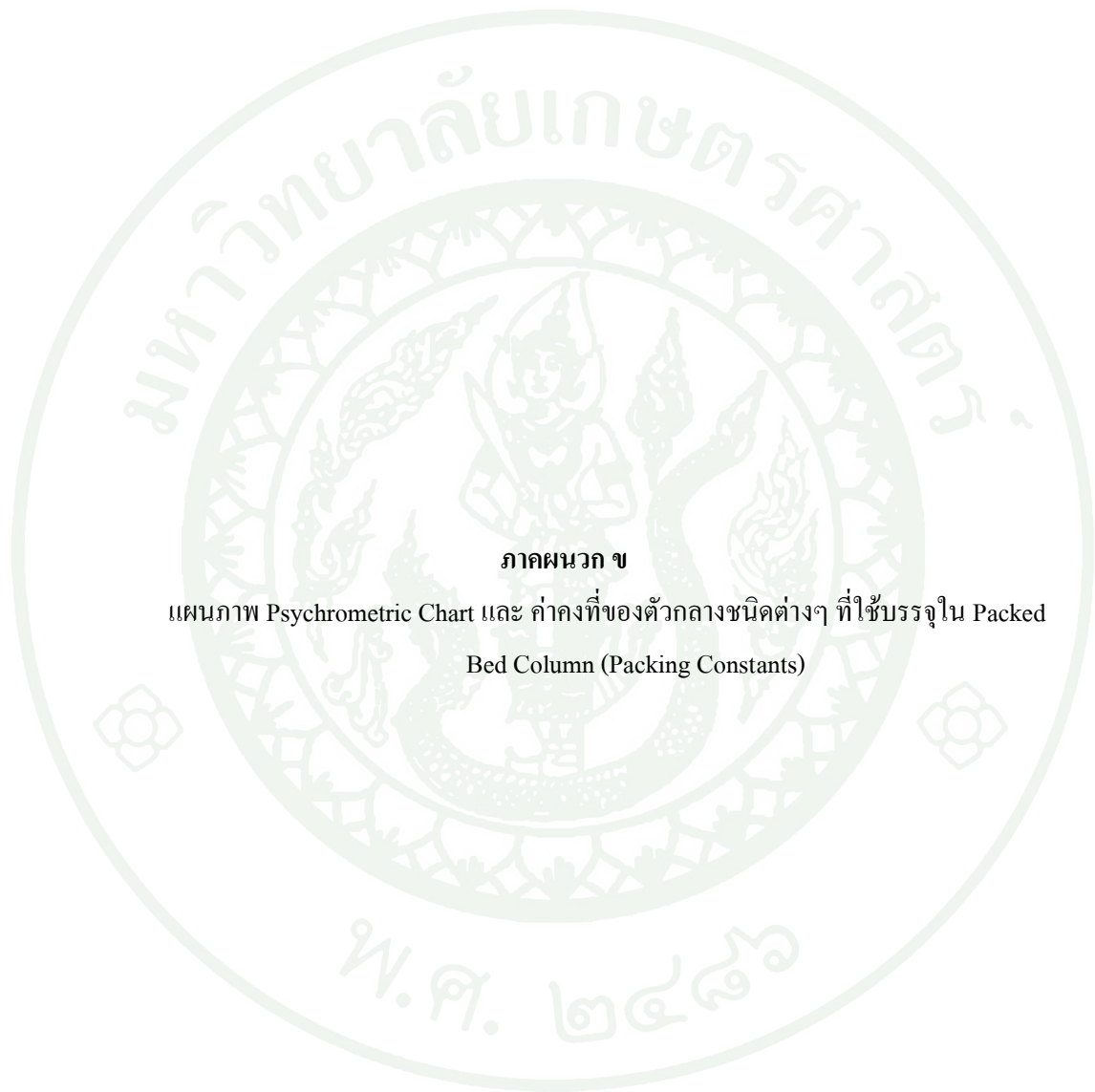
$$\Delta P = 6 \text{ in.H}_2\text{O} + 4 \text{ in.H}_2\text{O} = 10 \text{ in.H}_2\text{O}$$

หมายเหตุ: ค่าความดันสูญเสียที่เกิดในห้องเผาไหม้สำหรับ Catalytic Incinerator มีค่าเท่ากับ 6 in.H₂O ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพ 35% มีค่าเท่ากับ 4 in.H₂O

11. คำนวณหา กำลังของพัดลมที่ใช้

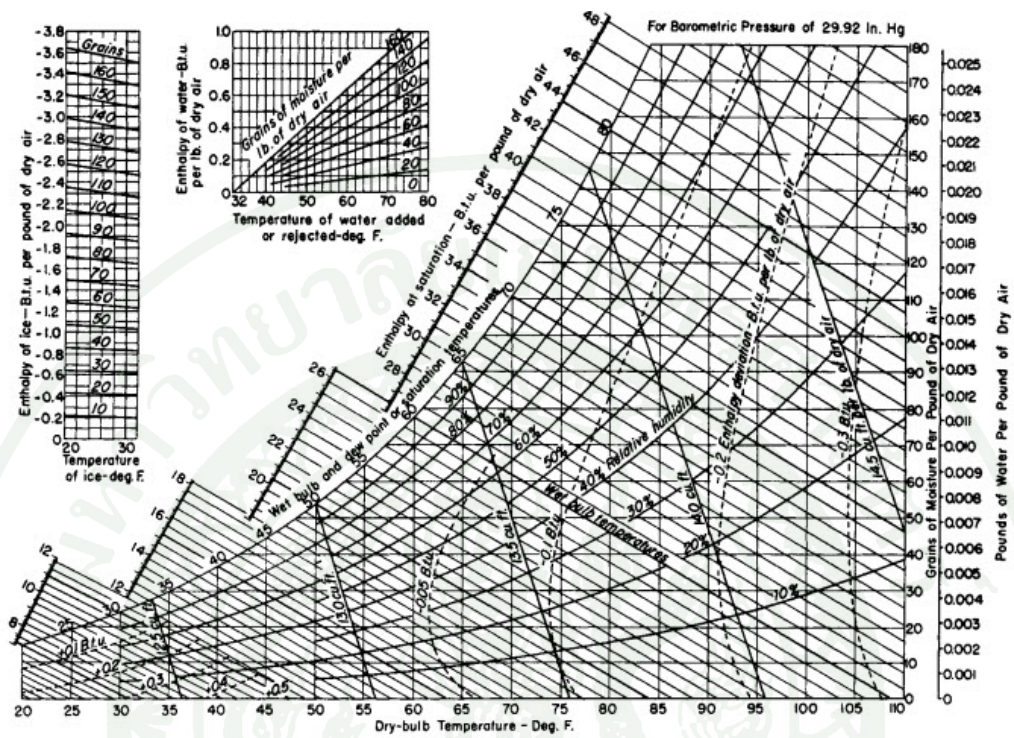
$$W = \frac{249 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{1 \text{ in.H}_2\text{O}} \times 10.150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 10 \text{ in.H}_2\text{O} = 25273.892 \text{ Watt หรือ } 25.274 \text{ kW}$$

$$Fhp = \frac{25273.892 \text{ Watt}}{\frac{1000 \text{ Watt}}{1 \text{ kW}} \times \frac{0.745 \text{ kW}}{1 \text{ hp}} \times \frac{60}{100}} = 56.541 \text{ hp}$$



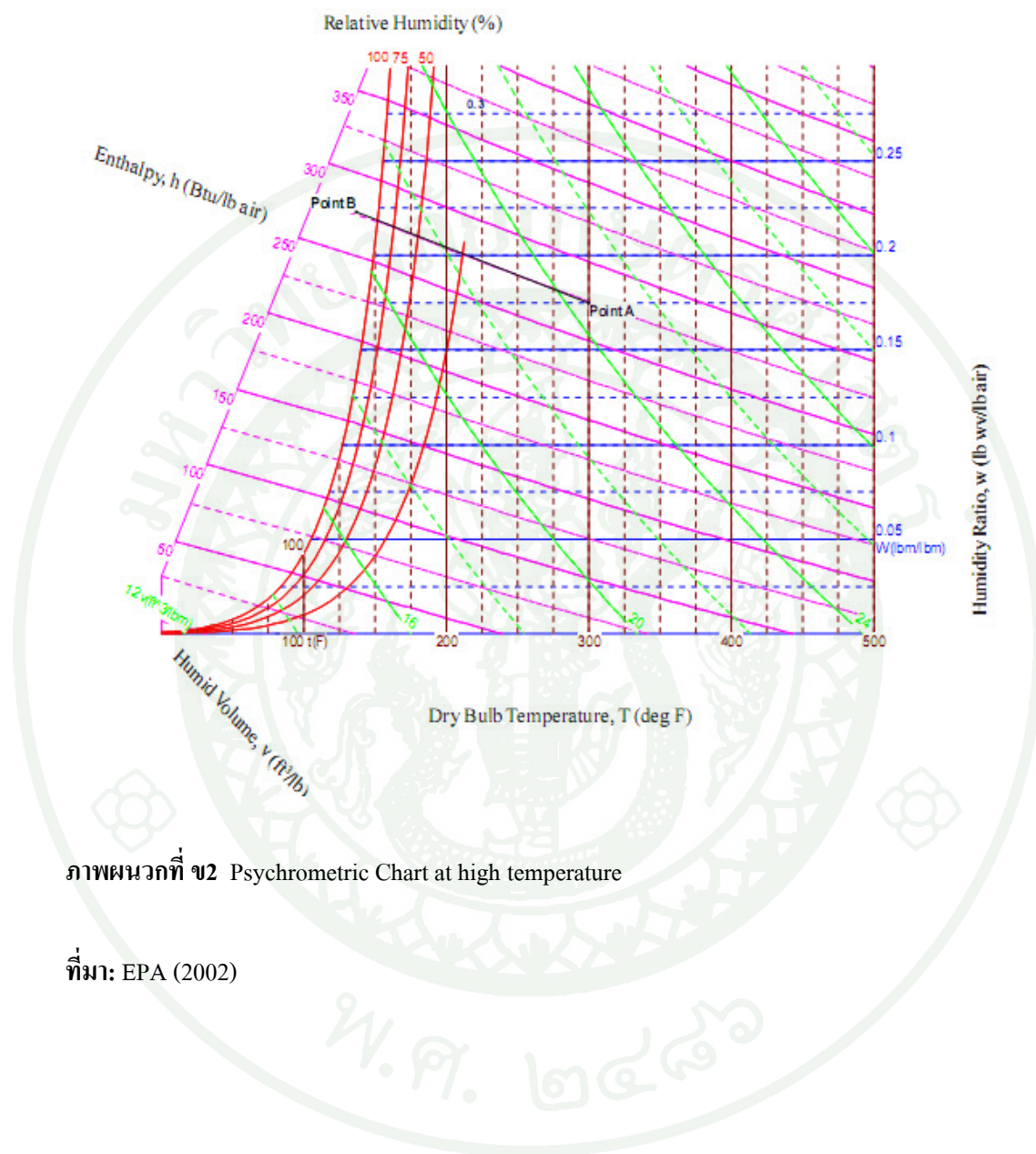
ภาคผนวก ข

แผนภาพ Psychrometric Chart และ ค่าคงที่ของตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ใช้บรรจุใน Packed
Bed Column (Packing Constants)



ภาพผนวกที่ ข1 Psychrometric Chart at normal temperature

ที่มา: Cooper and Alley (1984)



ภาพผนวกที่ ข2 Psychrometric Chart at high temperature

ที่มา: EPA (2002)

ตารางผนวกที่ ข1 ค่า Packing factor ของตัวกลาง

Packing types	Size	Packing Factor
Rachig Rings(ceramic)	1/2	2099.84
Rachig Rings(ceramic)	5/8	1246.78
Rachig Rings(ceramic)	3/4	836.655
Rachig Rings(ceramic)	1	524.96
Rachig Rings(ceramic)	1/2	311.695
Rachig Rings(ceramic)	2	213.265
Rachig Rings(ceramic)	3	121.397
Rachig Rings(metal)	1/2	1345.21
Rachig Rings(metal)	5/8	951.49
Rachig Rings(metal)	3/4	754.63
Rachig Rings(metal)	1	449.497
Rachig Rings(metal)	1/2	272.323
Rachig Rings(metal)	2	187.017
Rachig Rings(metal)	3	104.992
Pall Rings(metal)	5/8	229.67
Pall Rings(metal)	1	157.488
Pall Rings(metal)	1 1/2	91.868
Pall Rings(metal)	2	65.62
Pall Rings(metal)	3 1/2	52.496
Pall Rings(Polypropylene)	5/8	318.257
Pall Rings(Polypropylene)	1	170.612
Pall Rings(Polypropylene)	1 1/2	104.992
Pall Rings(Polypropylene)	2	82.025
Berl Saddles(Ceramic)	1/2	787.44

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Packing types	Size	Packing Factor
Berl Saddles(Ceramic)	3/4	557.77
Berl Saddles(Ceramic)	1	360.91
Berl Saddles(Ceramic)	1 1/2	213.265
Berl Saddles(Ceramic)	2	147.645

ที่มา : EPA (2002)

ตารางผนวกที่ ข2 คุณสมบัติการแพร่กระจายของก๊าซมลพิษบางชนิดในอากาศและของเหลว

Pollutant	Molecular weight lb/lb-mol	Diffusivity in air ¹ cm ² /s	Diffusivity in water ¹ cm ² /s x 10 ⁵
Ammonia	17	0.236	1.76
Methanol	32	0.159	1.28
Ethyl Alcohol	46	0.119	1
Propyl Alcohol	60	0.1	0.87
Butyl Alcohol	74	0.09	0.77
Acetic acid	60	0.133	0.88
Hydrogen Chloride	36	0.187	2.64
Hydrogen Bromide	36	0.129	1.93
Hydrogen Fluoride	20	0.753	3.33

หมายเหตุ ¹ ณ อุณหภูมิ 25 °C

ที่มา : EPA (2002)

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าคงที่ α , β , γ , ϕ , b ของตัวกลางที่ใช้บรรจุใน Packed Bed Column

Packing types	Size	Packing Constant					Applicable Range(lb/hr-ft ²)	
		α	β	γ	ϕ	b	Gas	Liquid
Raschig Ring	3/8	2.32	0.45	0.47	0.00182	0.46	200-500	500-1500
Raschig Ring	1	7	0.39	0.58	0.00357	0.35	200-800	400-500
Raschig Ring	1 1/2	1.73	0.38	0.66	0.01	0.22	200-700	500-1500
Raschig Ring	2	3.82	0.41	0.45	0.0125	0.22	200-800	500-4500
Berl Saddles	1/2	32.4	0.3	0.74	0.00666	0.28	200-700	500-1500
Berl Saddles	1/2	0.81	0.3	0.24	0.00666	0.28	200-700	1500-4500
Berl Saddles	1	1.97	0.36	0.4	0.00588	0.28	200-800	400-4500
Berl Saddles	1 1/2	5.05	0.32	0.45	0.0625	0.28	200-1000	400-4500
Partition Rings	3	640	0.58	1.06	0.0625	0.09	150-900	3000-10000
Lanpac®	2.3	7.6	0.33	-0.48	0.039	0.33	400-3000	500-8000
Tri-Packs®	2	1.4	0.33	0.4	0.0031	0.33	100-900	500-10000
Tri-Packs®	3 1/2	1.7	0.33	0.45	0.004	0.33	100-2000	500-10000

ที่มา: EPA (2002)



ภาคผนวก ค
คุณสมบัติของก๊าซและของเหลว

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของอากาศ

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (lb/hr-ft)	ความหนืด (kg/m-hr)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)
25	0.04505	0.06713	1.19576	0.07364
26	0.04517	0.06730	1.19172	0.07339
27	0.04529	0.06748	1.18771	0.07315
28	0.04541	0.06766	1.18373	0.07290
29	0.04552	0.06783	1.17977	0.07266
30	0.04564	0.06801	1.17583	0.07242
31	0.04576	0.06818	1.17193	0.07218
32	0.04588	0.06836	1.16805	0.07194
33	0.04600	0.06853	1.16419	0.07171
34	0.04611	0.06871	1.16036	0.07147
35	0.04623	0.06888	1.15656	0.07124
36	0.04635	0.06906	1.15278	0.07101
37	0.04646	0.06923	1.14902	0.07078
38	0.04658	0.06941	1.14529	0.07055
39	0.04670	0.06958	1.14158	0.07032
40	0.04681	0.06975	1.13790	0.07010
41	0.04693	0.06993	1.13424	0.06987
42	0.04705	0.07010	1.13061	0.06965
43	0.04716	0.07027	1.12699	0.06943
44	0.04728	0.07044	1.12340	0.06921
45	0.04739	0.07062	1.11984	0.06899
46	0.04751	0.07079	1.11629	0.06877
47	0.04762	0.07096	1.11277	0.06856
48	0.04774	0.07113	1.10927	0.06834

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (lb/hr-ft)	ความหนืด (kg/m-hr)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)
49	0.04785	0.07130	1.10579	0.06813
50	0.04797	0.07147	1.10233	0.06792
51	0.04808	0.07164	1.09890	0.06771
52	0.04820	0.07181	1.09549	0.06750
53	0.04831	0.07198	1.09209	0.06729
54	0.04842	0.07215	1.08872	0.06709
55	0.04854	0.07232	1.08537	0.06688
56	0.04865	0.07249	1.08204	0.06668
57	0.04876	0.07266	1.07873	0.06647
58	0.04888	0.07283	1.07544	0.06627
59	0.04899	0.07300	1.07217	0.06607
60	0.04910	0.07316	1.06892	0.06587
61	0.04922	0.07333	1.06569	0.06568
62	0.04933	0.07350	1.06248	0.06548
63	0.04944	0.07367	1.05929	0.06528
64	0.04955	0.07383	1.05612	0.06509
65	0.04966	0.07400	1.05296	0.06490
66	0.04978	0.07417	1.04983	0.06470
67	0.04989	0.07433	1.04671	0.06451
68	0.05000	0.07450	1.04361	0.06432
69	0.05011	0.07467	1.04053	0.06413
70	0.05022	0.07483	1.03747	0.06395
71	0.05033	0.07500	1.03443	0.06376
72	0.05044	0.07516	1.03140	0.06357

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (lb/hr-ft)	ความหนืด (kg/m-hr)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)
73	0.05056	0.07533	1.02839	0.06339
74	0.05067	0.07549	1.02540	0.06321
75	0.05078	0.07566	1.02243	0.06303
76	0.05089	0.07582	1.01947	0.06284
77	0.05100	0.07598	1.01653	0.06266
78	0.05111	0.07615	1.01361	0.06248
79	0.05122	0.07631	1.01070	0.06231
80	0.05133	0.07648	1.00782	0.06213
81	0.05144	0.07664	1.00494	0.06195
82	0.05154	0.07680	1.00209	0.06178
83	0.05165	0.07696	0.99925	0.06160
84	0.05176	0.07713	0.99642	0.06143
85	0.05187	0.07729	0.99361	0.06126
86	0.05198	0.07745	0.99082	0.06109
87	0.05209	0.07761	0.98804	0.06092
88	0.05220	0.07777	0.98528	0.06075
89	0.05231	0.07794	0.98254	0.06058
90	0.05241	0.07810	0.97981	0.06041
91	0.05252	0.07826	0.97709	0.06025
92	0.05263	0.07842	0.97439	0.06008
93	0.05274	0.07858	0.97170	0.05992
94	0.05284	0.07874	0.96903	0.05975
95	0.05295	0.07890	0.96638	0.05959
96	0.05306	0.07906	0.96373	0.05943

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (lb/hr-ft)	ความหนืด (kg/m-hr)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)	ความหนาแน่น (lb/ft ³)
97	0.05317	0.07922	0.96111	0.05927
98	0.05327	0.07938	0.95849	0.05911
99	0.05338	0.07954	0.95589	0.05895
100	0.05349	0.07970	0.95331	0.05879

1. การคำนวณหาความหนาแน่นของอากาศ

ค่าความหนาแน่นของอากาศ ณ อุณหภูมิต่าง สามารถทำนายได้จากสมการ (TechFlowMp, 2011)

$$\rho_G = 360.77819 T_G^{1.00336}$$

โดย

ρ_G = ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³

T_G = อุณหภูมิของอากาศ, °C

2. การคำนวณหาความหนืดของอากาศ

ความหนืดของอากาศและก๊าซบางชนิดสามารถคำนวณได้จาก Sutherland's Formula (Crane, 1988)

$$\mu_G = \mu_o \left(\frac{a}{b} \right) \left(\frac{T_G}{T_o} \right)^{3/2}$$

โดยที่

$$a = 0.555 T_o + C$$

$$b = 0.555 T_G + C$$

μ_G = ความหนืดของก๊าซ

μ_o = ความหนืดของก๊าซ ณ อุณหภูมิอ้างอิง (524.07 °R) สำหรับอากาศมีค่าเท่ากับ 0.01827 cp

T_G = อุณหภูมิของก๊าซ

T_0 = อุณหภูมิอ้างอิงของก๊าซ ในการคำนวณหาความหนืดของอากาศกำหนดให้อุณหภูมิอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 524.07°R โดยที่

C = ค่าคงที่ของ Sutherland (Sutherland's Constant) สำหรับอากาศมีค่าเท่ากับ 120

ตารางผนวกที่ ค 2 คุณสมบัติของน้ำ

อุณหภูมิ		ความหนาแน่น		ความหนืด		ความตึงผิว
$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	lb/ft^2	kg/m^3	cp	poise	dynes/cm
40	4.44	62.43	1000.01	1.55	0.0155	75
50	10.00	62.42	999.85	1.31	0.0131	74.2
60	15.56	62.37	999.05	1.13	0.0113	73.5
70	21.11	62.3	997.93	0.98	0.0098	72
80	26.67	62.22	996.64	0.86	0.0086	71.7
90	32.22	62.11	994.88	0.76	0.0076	70.8
100	37.78	62	993.12	0.68	0.0068	69.9
120	48.89	61.71	988.47	0.56	0.0056	68.1
200	93.33	60.12	963.01	0.3	0.003	60.1

ที่มา: Cooper and Alley (1994)

ตารางผนวกที่ 3 ความหนาแน่นและความหนืดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

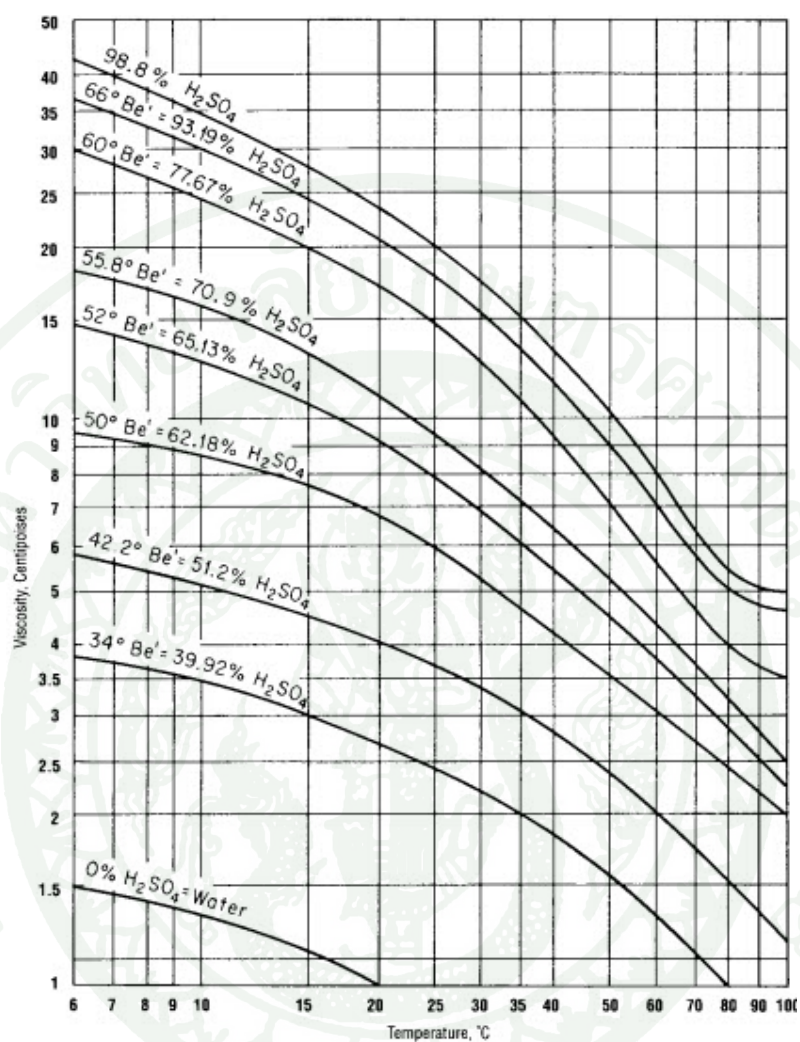
NaOH (%)	ความหนาแน่น (Density at 20 oC)	kg/m ³	ความหนืด (Centipoise: cp)	อุณหภูมิ (°C)			
				20	40	60	80
10		1109		1.9	1.2	0.83	0.65
20		1109		4.2	2.3	1.5	1
30		1109		13	6	3.1	1.9
32		1109		17	7	3.7	2.2
33		1109		18	7.5	3.8	2.3
40		1109		37	12	6.1	3.4
45		1109		56	17	7.8	4.4
50		1109		85	23	9.7	5.4

ที่มา: Bayer MaterialScience (2008)

ตารางผนวกที่ 4 ความหนาแน่นของสารละลายซัลฟิวริก (H₂SO₄)

H ₂ SO ₄ (%)	อุณหภูมิ (°C)								
	0	10	15	20	25	30	40	50	60
90	1836	1825	1820	1814	1809	1804	1793	1783	1773
91	1841	1830	1825	1820	1814	1809	1799	1788	1778
92	1845	1835	1829	1824	1819	1814	1803	1793	1783
93	1849	1838	1833	1828	1823	1818	1807	1797	1788
94	1852	1842	1836	1831	1826	1821	1811	1801	1791
95	1854	1844	1839	1834	1829	1824	1814	1804	1794
96	1856	1846	1841	1836	1831	1826	1816	1806	1797
97	1857	1847	1841	1836	1831	1826	1817	1807	1798
98	1857	1846	1841	1836	1831	1826	1816	1807	1798
99	1855	1845	1839	1834	1829	1824	1815	1805	1796
100	1852	1841	1836	1831	1823	1821	1811	1801	1792

ที่มา: NorFalco (2007)



ภาพผนวกที่ 1 ไดอะแกรมแสดงค่าความหนืดของสารละลายซัลฟิวริก (H_2SO_4)

ที่มา: NorFalco (2007)



ภาคผนวก ง
คุณสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ตารางผนวกที่ 1 อุณหภูมิติดไฟของสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิด (Autoignition temperature)

สาร	อุณหภูมิติดไฟ °F	สาร	อุณหภูมิติดไฟ, °F
Acetone	1000	Ethylene Dichloride	775
Acrolein	453	Hexane	820
Acrylonitrile	898	Hydrogen	1076
Ammonia	1200	Hydrogen Cyanide	1000
Benzene	1075	Hydrogen Sulfide	500
m-Butane	896	Isobutene	950
1-Butene	723	Methane	999
m-Butyl Alcohol	693	Methanol	878
Carbon monoxide	1205	Methyl Chloride	1170
Chlorobenzene	1245	Methyl Ethyl Ketone	960
Cyclohexane	514	Phenol	1319
Ethane	986	Propane	871
Ethanol	799	Propylene	851
Ethyl Acetate	907	Styrene	915
Ethylbenzene	870	Toluene	1026
Ethylchloride	965	Vinyl Chloride	882
Ethylene	842	Xylene	924

ที่มา: Cooper and Alley (1982)

ตารางผนวกที่ ๖2 ค่า Lower Explosive Limit (LEL) และค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้
สารอินทรีย์ระเหยง่ายบาง

สาร	LEL	ค่าความร้อน (kJ/m ³)
Acethylene	2.5	53913.978
Amonia	15	13590.19684
Benzene	1.4	134077.5352
Ethene	3	61100.03984
Ethylalcohol	3.28	54025.6908
Ethylene	2.75	56334.17096
isobutane	1.8	115609.7776
Isobutene,Isobutylene	1.8	106822.6663
Isopentane	1.4	138359.3571
Methane	5	33994.10881
Methylalcohol	6.72	28595.26349
Napthalene	0.9	210630.7188
n-Butane	1.86	115907.6366
n-Butene	1.75	107418.4261
Neopentane	1.4	137503.0178
n-Hexane	1.18	164273.8398
n-Pentane	1.5	138098.7358
n-pentene	1.65	133519.013
Propane	2.12	88801.71808
Propylene	2	81392.23064
Toluene	1.27	159507.9709
Xylene	1	185422.4117

ที่มา : Vatauvuk (1990)



ภาคผนวก จ

เปรียบเทียบการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ

1. เปรียบเทียบผลการคำนวณออกแบบไซโคลนจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรมที่พัฒนาโดย National Science Foundation (NSF)

Particle size distribution

Size Range (micron)		% Mass
0	2	1
2	4	9
4	6	10
6	10	30
10	18	30
18	30	14
30	50	5
50	100	1
		0
		0
		100

☒ Hydrophillic particles
☐ Hydrophobic particles

Gas flow rate, m3/s 2.5
Gas temperature, C 77
Inlet gas pressure, Pa 101325
Particle density, kg/m3 1600
Particle concentration, ug/m3 400

Equipments

☒ Cyclone
☐ Wet Scrubber
☐ Cyclone + Wet Scrubber

Equipment selection by using particle size constraint

Back to System design Back Next Home

ภาพผนวกที่ ๑1 ข้อมูลการกระจายฝุ่น คุณสมบัติ และลักษณะอากาศเสีย

Cyclone

Cyclone design

☒ Conventional cyclone by Lapple
☐ design with body diameter, m 1
☐ design with removal efficiency, %

Inlet types

☒ Vane
☐ Without Vane

Cal Cost
 Next Clear
 Home Help
 Print
 Back to system design

Gas flow rate, m3/s 2.5
Gas temperature, C 77
Inlet gas pressure, Pa 101325
Particle density, kg/m3 1600
Particle concentration, ug/m3 400
 Clear

Results

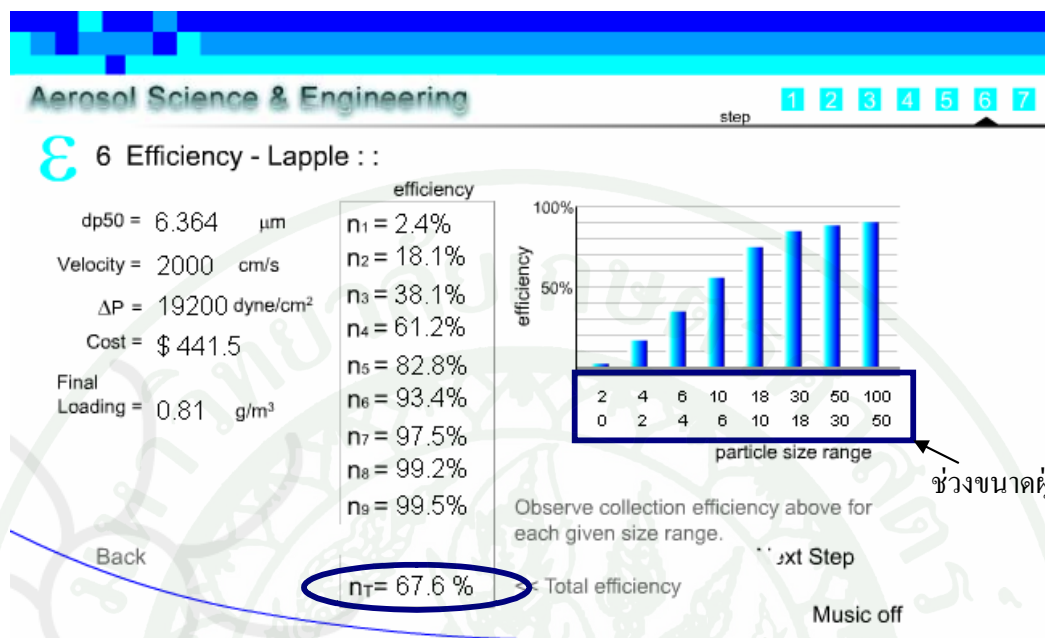
Total number of cyclone	1
Removal efficiency, %	68.116
Outlet particle concentration, ug/m3	127.536
Pressure drop, in.H2O	6.449
Power consumption, kW	4.015
Fan efficiency, %	60
Fan brake horsepower, hp	8.982

Cyclone size

Body diameter, m	1
Height of inlet, m	0.5
Width of inlet, m	0.25
Diameter of gas exit, m	0.5
Length of vortex, m	0.625
Length of body, m	2
Length of cone, m	2
Diameter of dust outlet, m	0.25

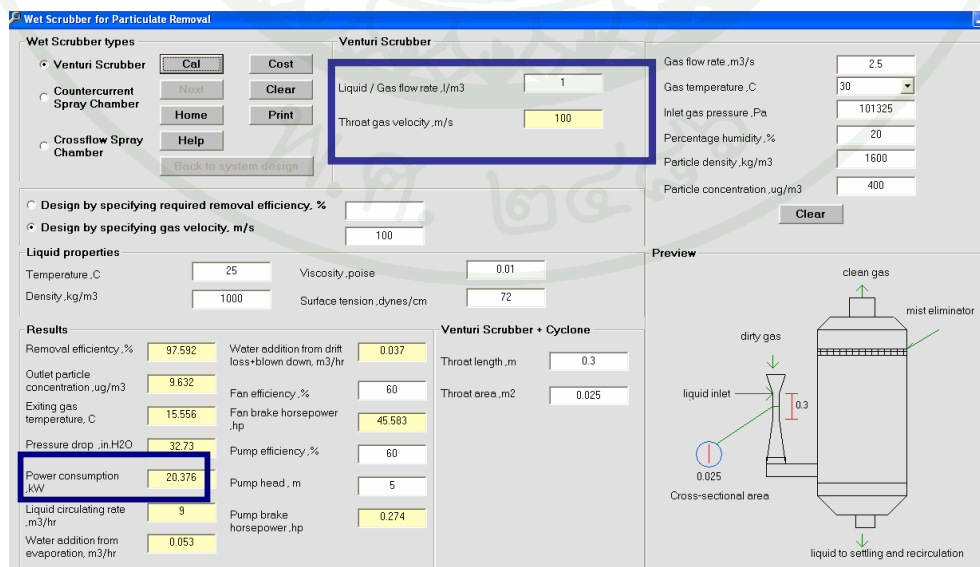
Preview

ภาพผนวกที่ ๑2 ผลการคำนวณออกแบบไซโคลนจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น



ภาพผนวกที่ ๑3 ผลการคำนวณออกแบบไซโคลนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดย NSF

2. เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความดันสูญเสียจากเวนทิวรีสครับเบอร์จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น กับโปรแกรมที่พัฒนาโดย AJ Design Software เมื่อกำหนดให้ความเร็วของก๊าซที่ผ่านคอเวนทิวรีมีค่า 100 m/s และ สัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซมีค่า 1 l/m³



ภาพผนวกที่ ๑4 ผลการคำนวณค่าความดันสูญเสียจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

Solving for estimated pressure drop

$$P_{drop} = 10^{-6} v^2 L$$

Inputs:

gas velocity (v) meter/second

water to gas volume ratio (L) liter/meter^3

Conversions:

v = 100 meter/second = 10000 centimeter/second

L = 1 liter/meter^3 = 1 liter/meter^3

Solution:

estimated pressure drop (P_{drop}) = 100 centimeter

Solution:

estimated pressure drop (P_{drop}) = 100 centimeter

Other Units:

estimated pressure drop (P_{drop}) = 1	meter
estimated pressure drop (P_{drop}) = 1.0E+18	attometer
estimated pressure drop (P_{drop}) = 100	centimeter
estimated pressure drop (P_{drop}) = 0.049709695378987	chain
estimated pressure drop (P_{drop}) = 0.1	dekameter
estimated pressure drop (P_{drop}) = 10	decimeter
estimated pressure drop (P_{drop}) = 1.0E-18	exameter
estimated pressure drop (P_{drop}) = 1.0E+15	femtometer
estimated pressure drop (P_{drop}) = 3.2808398950131	foot
estimated pressure drop (P_{drop}) = 1.0E-9	gigameter
estimated pressure drop (P_{drop}) = 0.01	hectometer
estimated pressure drop (P_{drop}) = 39.370078740157	inch
estimated pressure drop (P_{drop}) = 0.001	kilometer
estimated pressure drop (P_{drop}) = 1.0570234105361E-16	light year
estimated pressure drop (P_{drop}) = 4.9578582052553	link

ภาพผนวกที่ ๑๕ ผลการคำนวณค่าความดันสูญเสียจากโปรแกรมที่พัฒนาโดย AJ Design Software



ภาคผนวก จ

ค่าพารามิเตอร์แนะนำและข้อจำกัดของพารามิเตอร์บางค่าในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์

1. ไซโคลน

1.1 พารามิเตอร์ที่แนะนำในการออกแบบไซโคลน

- อัตราเร็วของอากาศเสียที่เข้าประมาณ Gas velocity) 15-30 m/s
- ความดันสูญเสีย (Pressure drop) $\leq 16 \text{ in. H}_2\text{O}$

1.2 ข้อจำกัดในการประเมินราคาไซโคลน ข้อจำกัดในการคำนวณประเมินราคาชุดติดตั้งไซโคลนคือ ขนาดของพื้นที่ทางเข้าของไซโคลน (Inlet area : A) ซึ่งต้องมีค่าอยู่ในช่วงต่อไปนี้

- สำหรับชุดติดตั้งไซโคลนที่ไม่มี Rotary air locked: $0.20 \leq A \leq 2.64$
- สำหรับชุดติดตั้งไซโคลนที่มี Rotary air locked: $0.350 \leq A \leq 2.64$

2. เวทสกรับเบอร์

2.1 พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบ พารามิเตอร์แนะนำในการคำนวณออกแบบเวทสกรับเบอร์ทั้ง 3 ชนิด แสดงในตารางผนวกที่ 1

ตารางผนวกที่ ๑1 พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบอุปกรณ์เวชสครับเบอร์ ทั้ง 3 ชนิด

พารามิเตอร์	คำแนะนำในการออกแบบ		
	Venturi Scrubber	Countercurrent Spray chamber	Crossflow Spray chamber
ขนาดหยดของเหลว (Droplet size), μm	500-1000	500-1000	500-1000
สัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตรา การไหลของก๊าซ (Liquid to gas ratio), l/m^3	0.5-2.7	0.5-2.7	0.5-2.7
อัตราเร็วของก๊าซในส่วนคอเวนทอรี่ (Throat Gas velocity), m/s	60-244	-	-
อุณหภูมิของก๊าซเข้า, $^{\circ}\text{F}$	≤ 500	≤ 500	≤ 500
ความดันสูญเสีย (Pressure drop), Pa	1494-17430	249-498	249-498
ความสูงของคอลัมน์ (Height of column), m	-	as required	as required
ความยาวของคอลัมน์ (Length of column), m	-	-	as required

2.2 ข้อจำกัดในการประเมินราคาเวนทอรี่สครับเบอร์ -ข้อจำกัดในการคำนวณประเมิน
ราคาเวนทอรี่สครับเบอร์ คือ อัตราการไหลของอากาศเสีย (Gas flowrate) ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 600-
59000 ft^3/min ($0.3\text{-}27.8 \text{ m}^3/\text{s}$)

3. Packed Bed Column

3.1 พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบ พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบ Packed Bed
Column แสดงในตารางผนวกที่ ๑2

ตารางผนวกที่ ๓2 พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบ Packed Bed Column

พารามิเตอร์	คำแนะนำ
สัดส่วนอัตราการไหลของอากาศเสียที่แท้จริงต่ออัตราการไหลของอากาศเสีย ณ ความเร็วของก๊าซที่ทำให้เกิดการไหลล้น (Actual gas flowrate to gas flowrate at flooding gas velocity ratio)	0.5-0.75
สัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวที่แท้จริงต่ออัตราการไหลของเหลวต่ำสุด (Actual liquid flowrate to minimum liquid flowrate ratio)	1.5
ความเข้มข้นของมลพิษในอากาศเสีย (สัดส่วนโมล)	≤ 0.05

3.2 ข้อจำกัดในการประเมินราคา Packed Bed Column ข้อจำกัดในการประเมินราคาชุดติดตั้ง Packed Bed column ได้แก่ พื้นที่ผิวของหอคอลซึม (Column surface area) ซึ่งต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 69 ft² - 1507 ft²

4. เตาเผาก๊าซและไอ

4.1 พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบ พารามิเตอร์แนะนำสำหรับการใช้เตาเผาแบบ เตาเผาแบบใช้ความร้อนและเตาเผาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงในตารางผนวกที่ ๓3

ตารางผนวกที่ ๓ พารามิเตอร์แนะนำในการออกแบบเตาเผาแบบใช้ความร้อนและเตาเผาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พารามิเตอร์	คำแนะนำในการออกแบบ	
	Thermal incinerator	Catalytic incinerator
ประสิทธิภาพในการเผาทำลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs destruction efficiency), %	>90	>90
ประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat recovery efficiency), %	0,35,50,70	0,35,50,70
ความร้อนที่สูญเสีย (Heat loss), %	10	10
ระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในเตาเผา (Residence time), s	0.2-2.0	0.2-2.0
อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (Operating temperature), °F	1200-2000	700-900
ความเร็วของก๊าซในห้องเผาไหม้ (Gas velocity), ft/s	20-40	20-40
ส่วนกลับของความเร็วของก๊าซในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Space velocity of gas in catalyst), hr ⁻¹	-	10000-60000

4.2 ข้อกำหนดในการประเมินราคาเตาเผาก๊าซและไอ ข้อกำหนดในการคำนวณประเมินราคาชุดติดตั้งเตาเผาก๊าซและไอ คือ อัตราการไหลของก๊าซเสียทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผา (Total gas flowrate through incinerator)

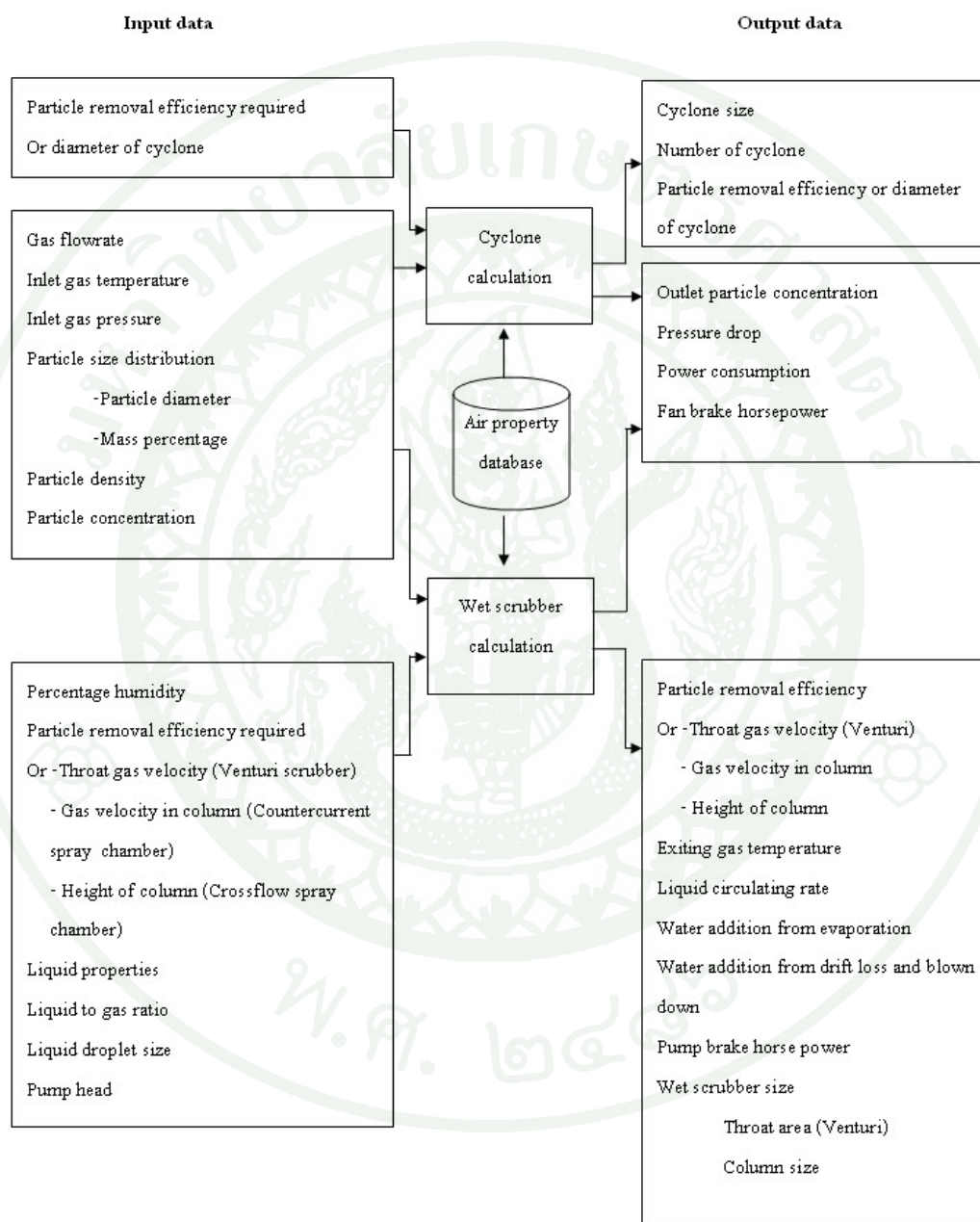
1. อัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าสู่เตาเผามีค่าอยู่ในช่วง 2,000 - 50,000 ft³/min (0.9-23.6 m³/s) สำหรับ Thermal Incinerator และ Fixed bed Catalytic Monolith
2. อัตราการไหลของก๊าซเสียที่เข้าสู่เตาเผามีค่าอยู่ในช่วง 2,000 - 25,000 ft³/min (0.9-11.3 m³/s) สำหรับ Fluidized-Bed Catalyst



ภาคผนวก ข

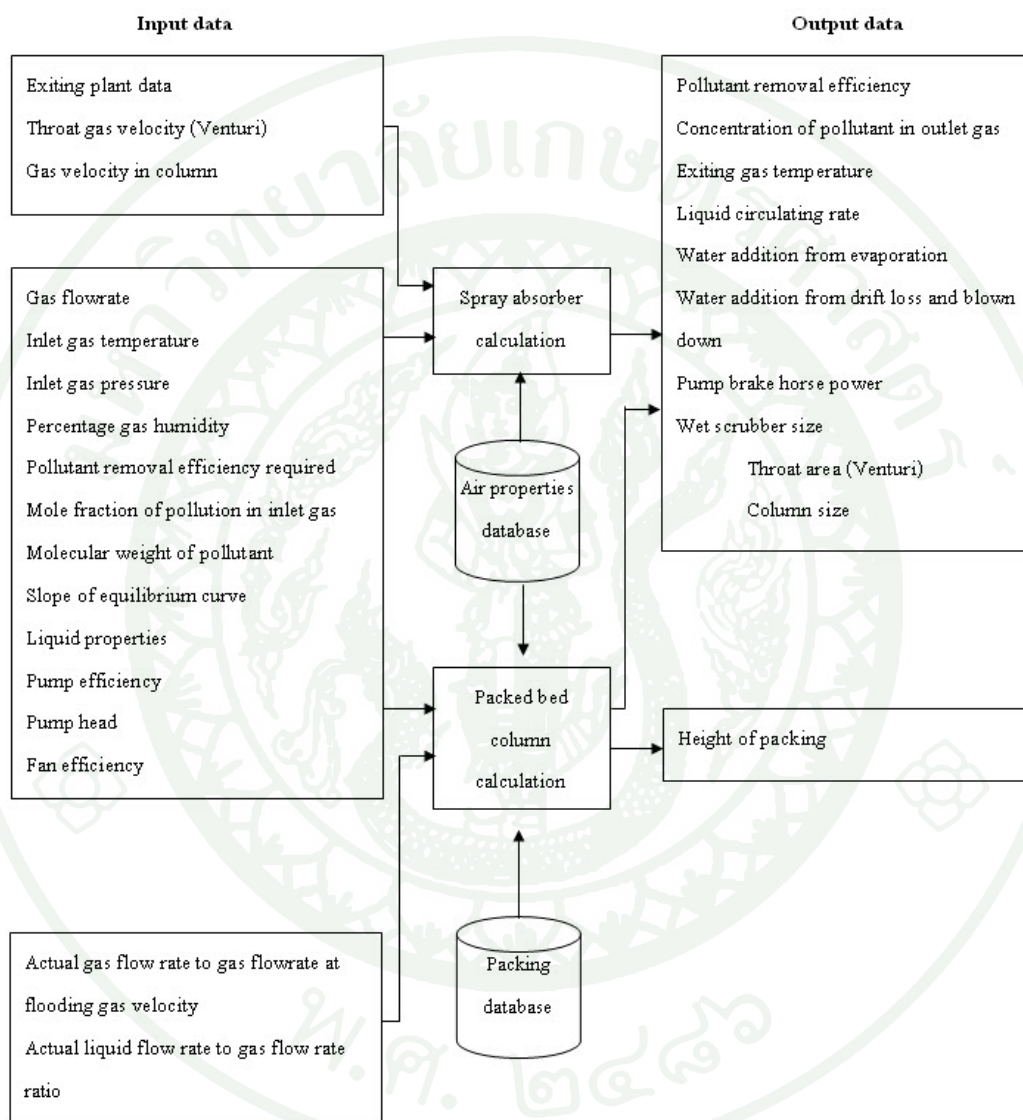
สรุปพารามิเตอร์ที่ใส่เข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม

สรุปข้อมูลที่ใส่เข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม



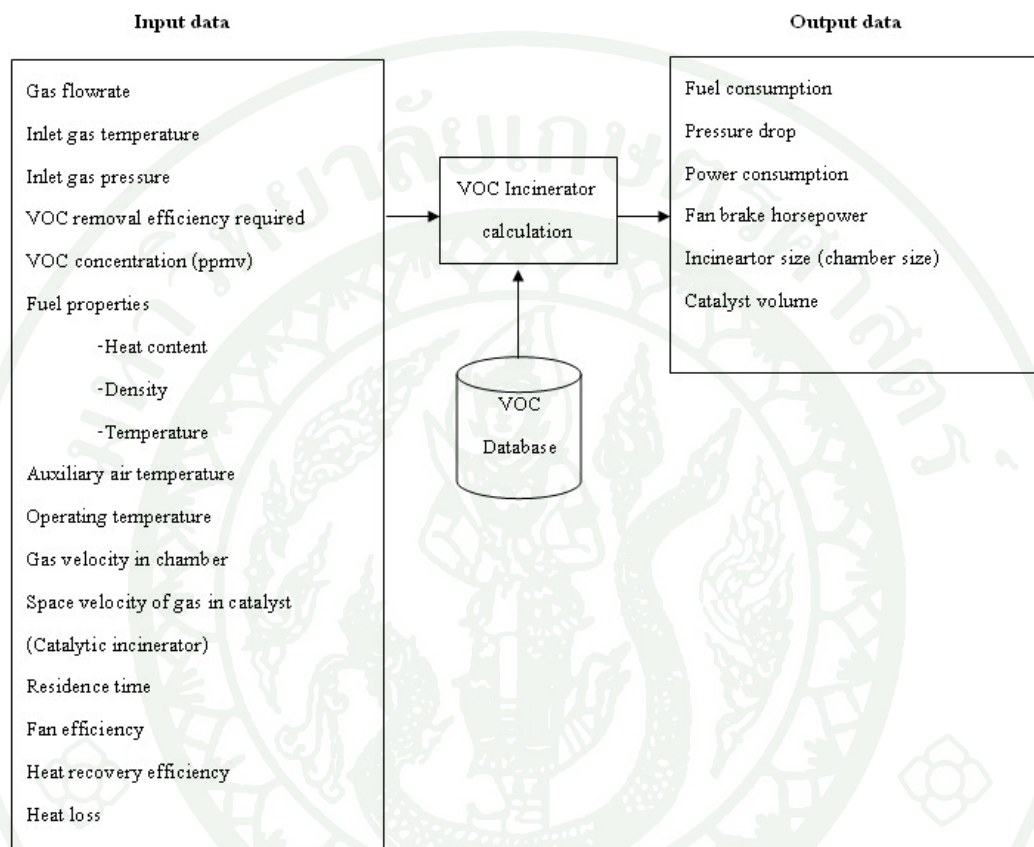
ภาพผนวกที่ ๑1 สรุปข้อมูลที่ใส่เข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม

สรุปข้อมูลที่ใส่เข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม



ภาพผนวกที่ ข1 (ต่อ)

สรุปข้อมูลที่ต้องนำเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม



ภาพผนวกที่ ข1 (ต่อ)



ตารางผนวกที่ ข1 ดัชนีปรับเปลี่ยนราคา

ปี (ค.ศ)	ดัชนีปรับเปลี่ยนราคา
2003	402.0
2004	444.2
2005	468.2
2006	499.6
2007	525.4
2008	575.4
2009	521.9
2010	550.8
2011 (June)	588.9

ที่มา: Chemical engineering (2011)