

บทที่ 3

การควบคุมสารมลพิษในอากาศ

3.1 การควบคุมสารมลพิษในอากาศที่เกิดจากแหล่งที่อยู่กับที่ (stationary source)

แหล่งที่ให้สารมลพิษในอากาศจากแหล่งที่อยู่กับที่ ซึ่งเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่มนุษย์กระทำขึ้น และชนิดรวมถึงปริมาณของสารมลพิษที่ปล่อยออกมาจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะกิจกรรม แหล่งที่ให้สารมลพิษมากที่สุดคือจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม รองลงมาคือการเผาไหม้เชื้อเพลิง ขยะ หรือของเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม ชนิดของสารมลพิษที่ปล่อยได้แก่ particulate matter, SO_x , NO_x , organic compounds หรือไอของแร่ต่าง ๆ

การควบคุมจากแหล่งที่ให้สารมลพิษ มีหลักการใหญ่ ๆ ดังนี้

1. Control by preventive techniques
2. Effluent dispersal
3. Effluent cleaning

1. **Control by preventive techniques** เป็นวิธีการกำจัดสารมลพิษจากแหล่งที่ปล่อยให้น้อยลงด้วยวิธีการป้องกัน โดยหาสิ่งทดแทนหรือเปลี่ยนตัวที่จะก่อให้เกิด Pollutants ในปริมาณมากให้เป็นชนิดที่จะให้ปริมาณน้อยลงเช่น โรงงานไฟฟ้าควรจะหาทางใช้พลังงานน้ำมาทดแทนการใช้น้ำมันเป็นต้น ในแง่ของโรงงานอุตสาหกรรมก็อาจจะต้องดัดแปลงวิธีการผลิต เพื่อจะให้กระบวนการนั้นปล่อยสารมลพิษในระดับที่ชุมชนยอมรับได้

2. **Effluent dispersal** เป็นการควบคุมโดยการเจือจางในอากาศ วิธีการที่ใช้ในการลดความเข้มข้นของสารมลพิษคือการใช้ปล่องไฟ สารมลพิษที่ถูกปล่อยออกจากปล่องไฟ จะถูกความปั่นป่วนของอากาศทำให้เกิดการกระจายออกไปและเจือจางลงจนความเข้มข้นเหลือน้อยในระดับที่ชุมชนยอมรับได้ วิธีการนี้ใช้ได้กับสารมลพิษปริมาณหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับ

ความสามารถในการรับสารมลพิษของบรรยากาศในการลดสารมลพิษ เว้นเสียแต่ว่าจะใช้ ร่วมกับการควบคุมสารมลพิษที่แหล่งเกิดวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีพร้อมกันไป

ความสูงประสิทธิของปล่องไฟจะต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของความสูงของอาคาร สูงสุดที่อยู่ใกล้ ซึ่งจะทำให้การกระจายออกไปของ plume ทางด้านลมประมาณ 5 ถึง 10 เท่า ของความสูงของอาคารนี้ ความสูงประสิทธินี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น การฟุ้ง อดุมหิมิของอากาศ และการเจือจาง

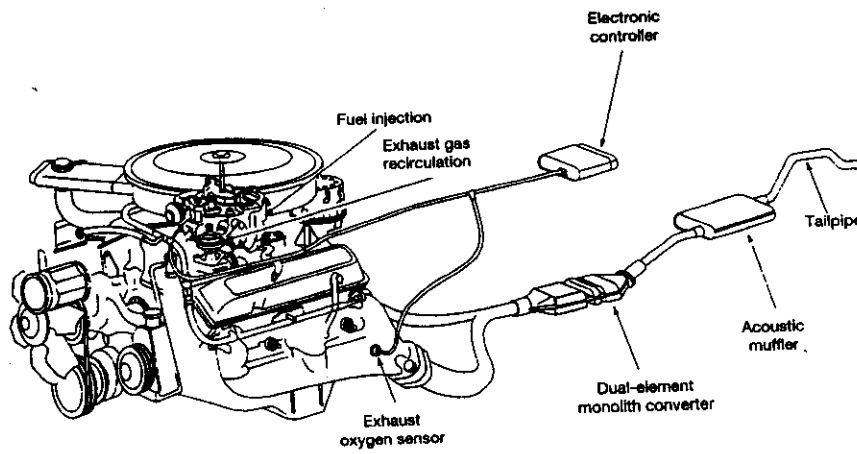
3. Effluent cleaning เป็นวิธีการทำความสะอาดอากาศเสียก่อนที่จะปล่อยออกสู่ บรรยากาศ การเลือกวิธีที่จะใช้ควบคุมความเหมาะสม สำหรับในแต่ละปัญหาจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารมลพิษ กระบวนการที่ทำให้เกิดสารมลพิษ และระดับการควบคุมที่ต้องการ

3.1.1 การควบคุมอนุภาคมลพิษ (Particulates)

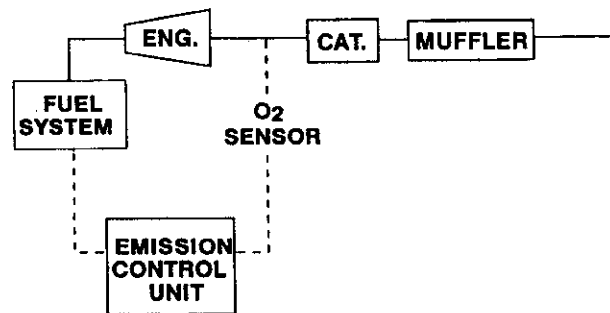
การควบคุมมีหลายวิธีขึ้นกับธรรมชาติ ขนาดและคุณสมบัติของ particulates ซึ่งจะ สรุปวิธีการที่ใช้ควบคุม particulate ตามสมบัติดังกล่าวแล้ว ดังในรูปที่ 3.1

คำถามท้ายบท

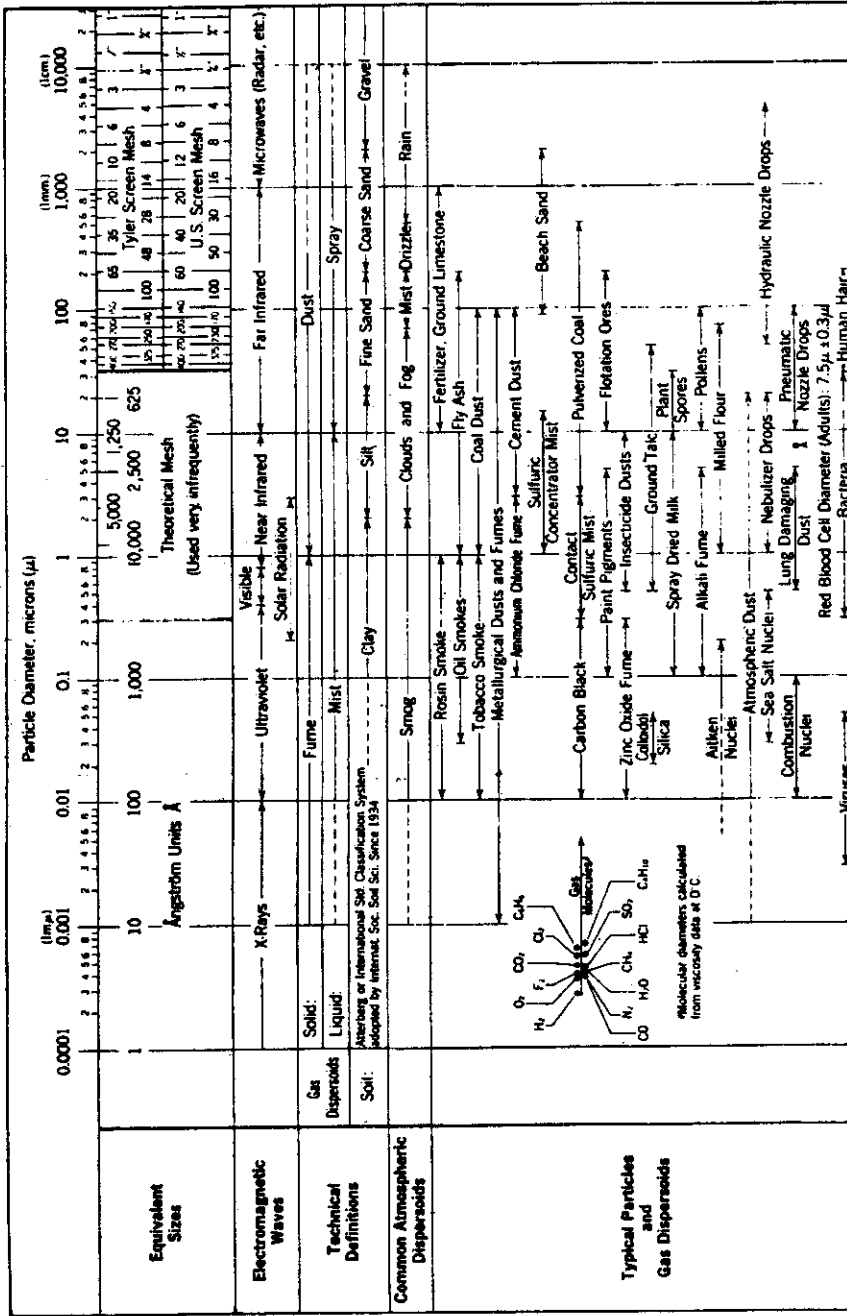
1. ห้องตกตะกอนใช้ประโยชน์ในการบำบัดอนุภาคมลสารประเภทใด
2. baghouse หมายถึงอะไร ใช้กำจัดมลพิษใดได้ดีและข้อดีข้อเสียของวิธีนี้
3. จงอธิบายหลักการทำงานของ Electrostatic precipitator ในการแยกอนุภาคมลสาร
4. วิธีการหลักในการควบคุมมลพิษเฉพาะที่เป็นแก๊ส
5. Lime scrubbing ใช้บำบัดแก๊สใดได้ผลดีที่สุดอธิบายพร้อมสมการประกอบ
6. Fluidised-bed combustion หมายถึงอะไร
7. SNCR กับ SCR ต่างหรือเหมือนกันอย่างไรอธิบายประกอบด้วยสมการเคมี
8. ชนิดและประเภทของสารมลพิษที่ถูกปล่อยจากรถยนต์ประเภทเบนซิน
9. Three way catalytic converter คืออะไร
10. Adsorption ใช้ประโยชน์ในการควบคุมสารมลพิษประเภทใดบ้าง



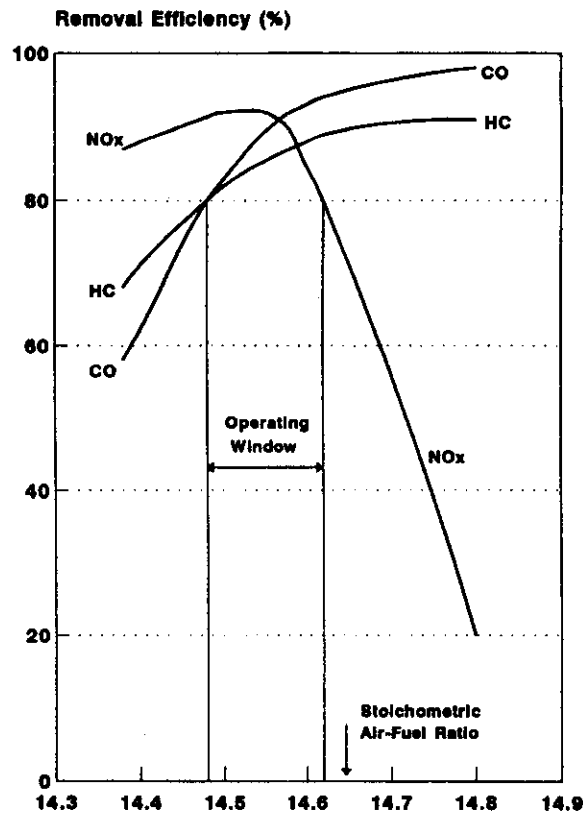
รูปที่ 3.18 Location of a catalyst in the underbody of an automobile.



รูปที่ 3.19 Major elements of the automotive feedback control system.



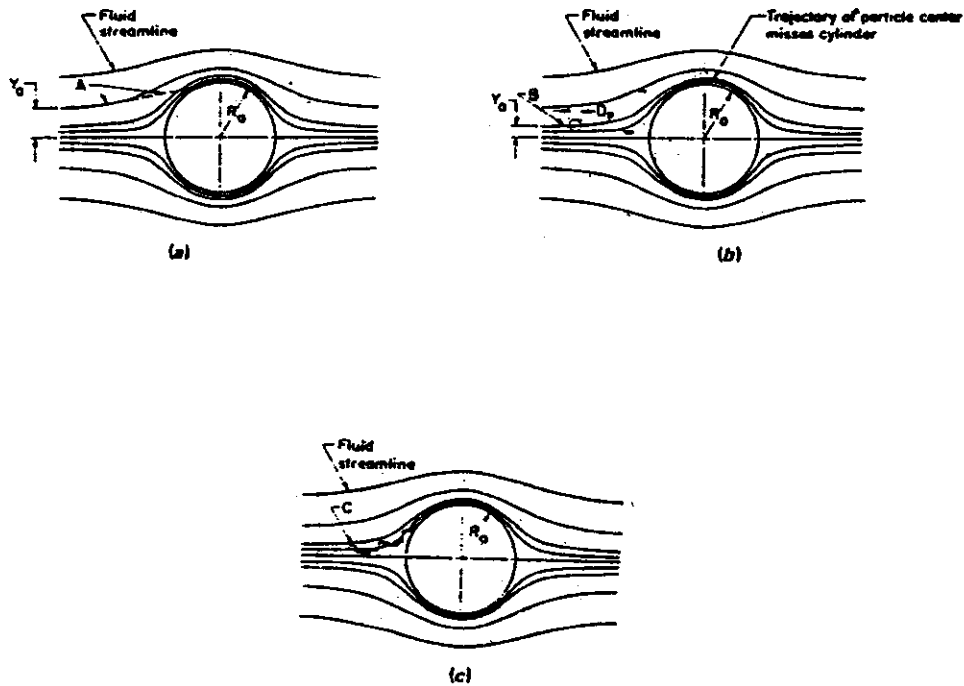
รูปที่ 3.1 (ต่อ)



รูปที่ 3.17 Simultaneous conversion of HC, CO, and NO_x for TWC as a function of air-to-fuel ratio.

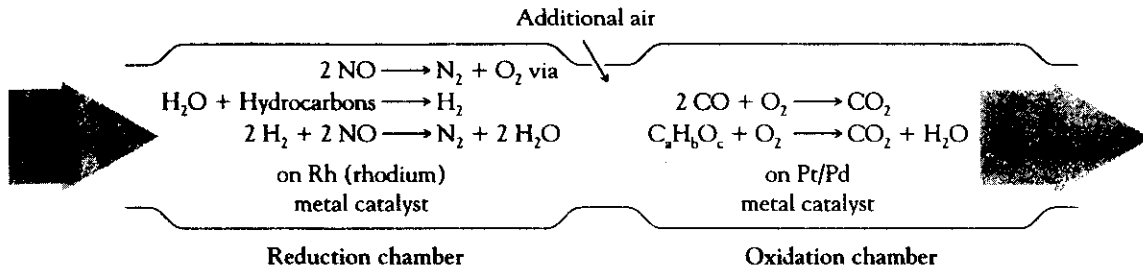
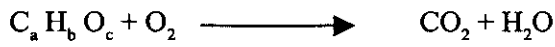
รูปแบบและแผนการทำงานของ oxygen sensor ที่ประกอบเข้ากับเครื่องแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19

พิจารณาการเคลื่อนที่ของ particle ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมวลของสารพบว่ามี การเคลื่อนที่ได้เป็น 3 วิธี ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Mechanisms of mechanical filtration (a) Inertial impaction : A is trajectory of particle center which just touches cylindrical fiber. (b) direct interception : B is trajectory of particle center and fluid streamline. Particle surface touches fiber at point of closer approach. (c) Diffusion : C is path of particle center due to fluid motion and random diffusion.

จะเห็นได้ว่าการใช้วิธีควบคุม particulates จะใช้วิธีการทำให้เกิดการกระแทกโดยอาศัย moment of inertia (impact) กรณีที่มีขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ หรือถ้ามีขนาดเล็กก็จะมีขนาดเล็กก็จะเป็นการ diffusion หรืออาศัยแรงอื่นเข้ามาช่วยและทำให้การเคลื่อนที่ช้าลงและ



รูปที่ 3.16 แสดงการทำงานของ dual bed three way catalytic converter

ปัจจุบัน three-way catalytic converter ได้พัฒนาเป็นระบบท่อตอนเดียวที่ต่อกับท่อไอเสีย โดยปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดพร้อม ๆ กับการปรับอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันให้อัตราส่วนเป็นช่วงของ stoichiometric คือใกล้เคียง 14.7 : 1 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนนี้จะปล่อย NO_x , CO และ hydrocarbon ในระดับที่น่าพอใจดังในรูปที่ 3.17 นั่นคือระบบนี้จะต้องใส่ oxygen sensor เพื่อควบคุมอัตราส่วนดังกล่าว ข้อดีของ Catalytic converter คือจะลดสารมลพิษทั้งสามได้ถึง 80-90% แต่ข้อเสียคือ Pt มีราคาแพงและมีอายุการใช้งานที่จำกัด ปัจจุบันมีผลการทดลองใหม่ ๆ ที่จะพยายามใช้โลหะที่ถูกกว่า เช่น ทองแดง โครเมียม แทน ระบบนี้ใช้กับเครื่องยนต์ได้ผลในลดสารมลพิษได้เพียง 50% เนื่องจากในน้ำมันดีเซลมีกำมะถันอยู่มากจะถูกออกซิไดส์โดยระบบนี้กลายเป็นอนุภาคมลสารซัลเฟตแทน ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง สำหรับ NO_x ในระบบดีเซลก็ไม่สามารถถูกกำจัดออกเหมือนกัน

ตกลงมาในที่สุดวิธีดังกล่าวทั้งสามนั้นนำมาประยุกต์ใช้แยก particulates แบ่งได้เป็น 11 วิธี
คือ

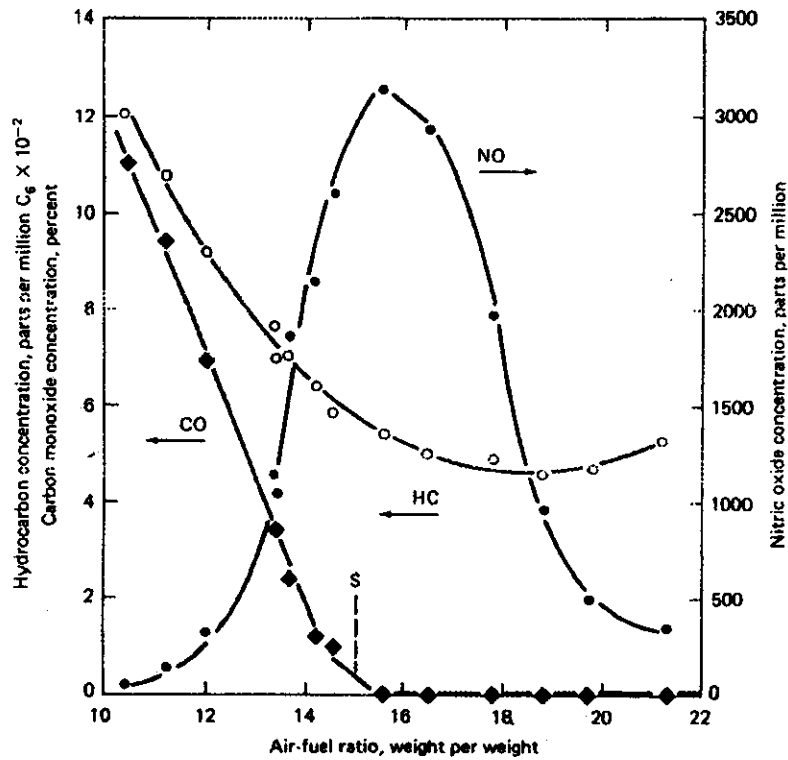
1. Gravity separation
2. Centrifugal impaction
3. Inertial impaction
4. Direct interception
5. Brownian diffusion
6. Turbulance diffusion
7. Thermal precipitation
8. Electrostatic precipitation
9. Magnetic precipitation
10. Brownian precipitation
11. Sonic precipitation

เครื่องมือที่นิยมใช้ในการแยก particulates คือ

1. ห้องตกตะกอนที่ใช้แรงถ่วงของโลก (Gravitational settling chambers)
2. เครื่องแยกที่ใช้แรงหนีศูนย์กลาง (Cyclone)
3. เครื่องสัมผัสแบบเปียก (wet scrubbers)
4. เครื่องกรอง (filters)
5. เครื่องตกตะกอนที่ใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitators)

การที่จะเลือกเครื่องมือใดในการควบคุมสารมลพิษ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้คือ

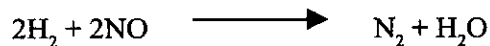
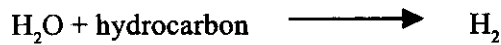
1. ประสิทธิภาพ (efficiency) ที่ต้องการ ซึ่งขึ้นกับอัตราที่ขอมให้ปล่อยสารมลพิษ
ออกสู่บรรยากาศ
2. คุณสมบัติของสารมลพิษ เช่น ลักษณะ ความเข้มข้น ขนาดและการกระจาย
3. คุณสมบัติของแก๊สที่สารมลพิษอยู่ เช่น ชนิด อัตราการไหล และอุณหภูมิ
4. การก่อสร้างและราคา



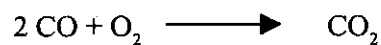
รูปที่ 3.15 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงและการระบายสารมลพิษ

2. Catalytic Converter โดยติดตัวลดมลพิษตรงทางออกของท่อไอเสีย ชนิดแรก เป็น two-way converters ที่ควบคุมเฉพาะแก๊สที่มีคาร์บอนและ CO โดยทำให้เกิดเผาไหม้สมบูรณ์ ต่อมามีการพัฒนาเทคนิคของ three-way catalytic converter โดยจะกำจัด CO, NO_x และไฮโดรคาร์บอนพร้อมกันโดยให้อากาศเสียผ่าน three-way catalytic converter 2 ขั้นตอน และแต่ละขั้นตอนจะมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Rh (Rhodium) ในตอนหน้า และ Pt/Pd อยู่ตอนหลัง ดังแสดงในรูป 3.16 ปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีดังนี้

ขั้นที่หนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยา Reduction ในตอนแรกดังนี้



ขั้นที่สอง จะเกิดปฏิกิริยา Oxidation ในตอนหลังดังนี้



ห้องตกตะกอน (Gravitational settling chamber)

วิธีการนี้จะปล่อยให้อากาศเสียไหลผ่านห้องตกตะกอนดังรูป 3.3 particulates จะตกสู่พื้นห้องโดยแรงโน้มถ่วงของโลก สิ่งสำคัญในการใช้วิธีนี้จะต้องให้อากาศเสียที่เข้าเคลื่อนที่เร็วมากนั้น ซึ่งจะมีผลให้ฝุ่นเกิดการฟุ้งกระจายขึ้นมาอีกและขนาด particulates ถ้าเล็กมากก็จะได้ผล จะแยก particulates ที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 μm ได้ดี ห้องตกตะกอนนี้จะเหมาะที่จะใช้ทำความสะอาดขั้นต้น ก่อนที่จะผ่านแก๊สอื่น ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องการเนื้อที่มาก

ค่าสัมประสิทธิ์ของการเก็บฝุ่นสัมพันธ์กับค่าอื่น ๆ คือ

$$\eta = \frac{100 U_{\alpha} A_h}{Q}$$

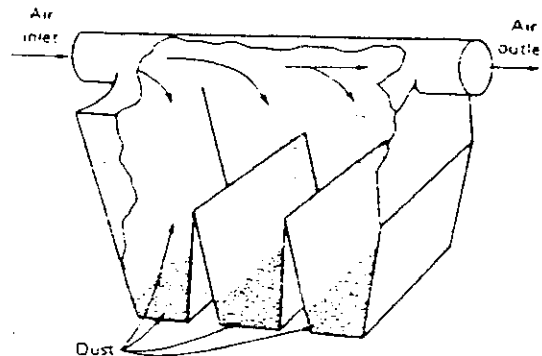
Where :

h = Collection efficiency, percent by weight

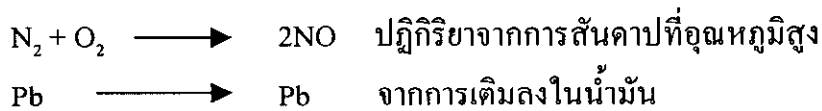
U_{α} = Terminal velocity of settling particles, ft/min

A_h = Horizontal area gravity chamber, ft^2

Q = Volumetric flow rate of gas stream, ft^3/min



รูปที่ 3.3 Typical setting chamber



โดยชนิดและแหล่งที่จะให้สารเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและเงื่อนไขของรถยนต์แต่ละชนิดด้วย กล่าวคือ

1. ระบบดีเซล เครื่องยนต์เป็นระบบที่เกิดที่อุณหภูมิและความดันสูงมาก กล่าวคือ จะมีความร้อนประมาณ $500-700^{\circ}\text{C}$. ความดัน 30-45 บรรยากาศ จึงพบว่าส่วนใหญ่เครื่องยนต์จะให้สารมลพิษตัวหลัก คือ NO_x และอนุภาคมลสาร (ควันดำ) ส่วน CO และ HC ก็ถูกปล่อยมาด้วยแต่น้อยกว่า 2 ตัวแรก โดยทั้งหมดนี้จะถูกปล่อยทางท่อไอเสียทางเดียว

2. ระบบเบนซิน การเผาไหม้เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า ฉะนั้นการสันดาปอาจเกิดได้ไม่สมบูรณ์เท่าดีเซล อีกทั้งน้ำมันเบนซินก็มีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมันดีเซล จึงพบว่าจะให้ไฮโดรคาร์บอนและ CO มาก ที่รองมา NO_x โดยจะถูกปล่อยจากการระเหยของถังน้ำมันและคาร์บูเรเตอร์ เสื้อสูบและท่อไอเสีย

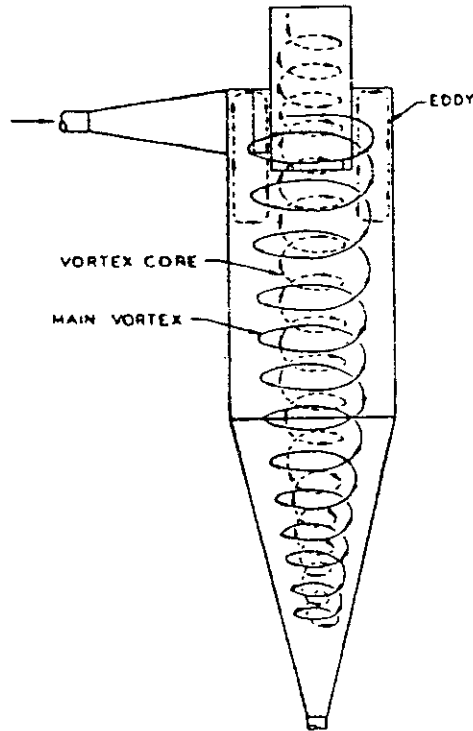
3.2.2 การควบคุมสารมลพิษจากรถยนต์

มีการพัฒนาวิธีการควบคุมมลพิษจากรถยนต์ต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันเพื่อลดปริมาณสารมลพิษดังกล่าวแล้ว มีวิธีการทั้งหมด 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่

• 1. Lean-burn technology นั่นคือปรับเครื่องยนต์เบนซินให้อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงมากขึ้น เป็น 16 : 1 (โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในรูป 3.15 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่พบว่า CO เกือบจะไม่ถูกปล่อยออกมาเลย และไฮโดรคาร์บอนก็ค่อนข้างต่ำ แต่ออกไซด์ของไนโตรเจนยังมีปริมาณสูงมาก ระบบรถยนต์เบนซินแบบเก่าใช้ระบบนี้จึงยังไม่เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม

เครื่องแยกที่ใช้แรงหนีศูนย์กลาง (Cyclone หรือ Centrifugal separator)

โดยใช้ cyclone ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงทำให้ particulate เกิดแรงเฉื่อยแล้วจึงวิ่งเข้าที่ผนังเครื่องแยกแล้วตกลงสู่ที่รองรับฝุ่น ลักษณะของ cyclone ทั่วไปตัวหมุนมีลักษณะเป็นเกลียว เป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 A typical cyclone

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่จะเก็บโดยวิธี cyclone คือ

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e V_i (P_p - P_g)}}$$

Where :

D_{pc} = Diameter of particle collected at 50% efficiency

3.2 การควบคุมสารมลพิษจากแหล่งที่เคลื่อนที่

แหล่งที่เคลื่อนที่ (mobile source) หมายถึงยานพาหนะต่าง ๆ หรือสิ่งของเคลื่อนที่ได้ โดยอาศัยเครื่องยนต์เป็นส่วนใหญ่ อันเป็นแหล่งของสารมลพิษในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น ประเภทที่เกิดจากรถยนต์นั้นจะมาจากกระบวนการสันดาปของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนแล้วให้สาร CO_2 และไอน้ำ กรณีที่เกิดแบบสมบูรณ์ แต่ก็หากการสันดาปเกิดไม่สมบูรณ์ก็จะให้มลพิษชนิดหลักคือ อนุภาคมลสาร (โดยเฉพาะควันทำ) NO_x , SO_x และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือในกระบวนการสันดาป ชนิดและปริมาณสารที่ถูกปล่อยจากแหล่งนี้จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายอย่างแต่ที่สำคัญคือลักษณะเครื่องยนต์ซึ่งทั่วไปแล้วมี 2 ระบบ คือ ระบบดีเซล และระบบเบนซิน ซึ่งมีข้อแตกต่างดังนี้

1. ระบบเบนซิน จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1.1 ระบบสี่จังหวะ ทำงานโดยการจุดระเบิดเชื้อเพลิงกับอากาศทำให้ได้ความร้อนมากพอที่จะไปขับเคลื่อนลูกสูบรถยนต์ จังหวะการทำงานประกอบด้วย

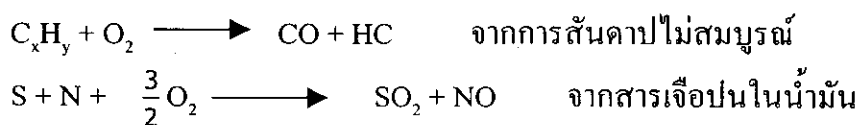
- ก. ดูดอากาศให้ผสมกับเชื้อเพลิง
- ข. อัดส่วนผสมให้มีความดันมากขึ้น
- ค. จุดระเบิดทำให้เกิดขยายตัวไปดันลูกสูบให้เคลื่อนที่
- ง. ปล่อยไอเสียออก

1.2 ระบบสองจังหวะ ทำงานเหมือนระบบ 4 จังหวะ แต่จะใช้ลูกสูบทำหน้าที่แทนลิ้นไอดีและไอเสีย

2. ระบบดีเซล การทำงานคล้ายระบบเบนซิน แต่ต่างที่ภายในเครื่องยนต์จะทำการสันดาปเชื้อเพลิงเองโดยไม่ต้องใช้หัวเทียนในการจุดระเบิด เนื่องจากในจังหวะอัดอากาศจะให้ความร้อนและความดันที่สูงมากกว่าระบบเบนซิน

3.2.1 แหล่งและที่มาของมลพิษทางอากาศรถยนต์

ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยสารมลพิษจากรถยนต์ ได้แก่



- μ = Gas viscosity, lb/ft-sec
- b = Cyclone inlet diameter, ft
- N_c = Number of turns within cyclone, 5 assumed
- V_I = Inlet gas velocity, ft/sec
- P_p = Particle density, lb/ft³
- P_g = Gas density, lb/ft³

cyclone ใช้เป็นเครื่องทำความสะอาดชั้นแรกพวกขี้เถ้าและ particulates ที่มีขนาดใหญ่โดยเฉพาะขนาด 5.25 μm ได้ดี และประสิทธิภาพของเครื่องซึ่งจะกำจัดได้ 50-90%

ข้อดีของวิธีนี้

1. ง่ายต่อการออกแบบและรักษา
2. ใช้เนื้อที่ติดตั้งน้อย
3. การแยกเกิดได้ตลอดเวลา
4. รับปริมาณ particulate ได้มาก

ข้อเสีย

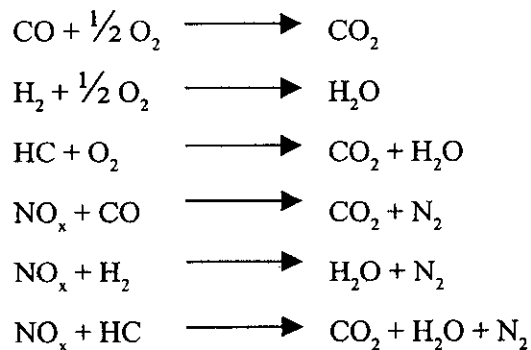
1. ต้องใช้เนื้อที่ส่วนที่จะให้อากาศเข้ามา
2. กรณีที่มีขนาดเล็กมากจะไม่ค่อยได้ผล
3. การใช้งานขึ้นกับอัตราความเร็วของการผ่านอากาศเสียเข้าไป

เครื่องสัมผัสหรือเก็บแบบเปียก (Wet scrubber)

การใช้น้ำเป็นตัวจับอนุภาคหรือฝุ่นและเพิ่มขนาดละอองไอน้ำ ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าว จะช่วยทำให้ particulates ใหญ่ขึ้นและแยกออกจากแก๊สได้ง่ายขึ้น

เครื่องมือชนิดนี้จะดีกว่าแบบแรก (Cyclone) เนื่องจาก particulates เล็ก ๆ จะรวมตัวกันได้ใหญ่ขึ้นโดยการสัมผัสกับน้ำ โดยอาจจะสัมผัสกับอากาศได้เป็น 3 แบบ คือ ทวน กระแส ตามกระแส และตัดกระแส นอกจากนั้นแล้วพบว่า การฟุ้งกลับของ particulates มีน้อย

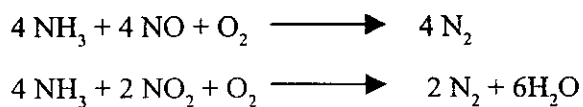
อัตราส่วนอากาศกับน้ำมันให้อยู่ในช่วงที่ใกล้ Stoichiometric (14.7 : 1) ภายใต้การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ระบบนี้พบว่านอกจาก NO_x จะถูกบำบัด CO และ hydrocarbon ก็จะถูกบำบัดพร้อมไปด้วย ปฏิกิริยาหลักที่เกิดคือ



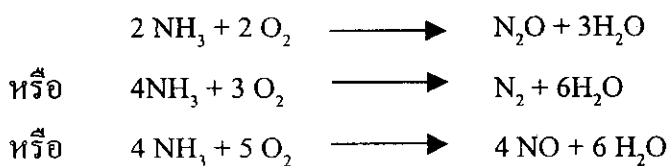
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็น 0.1-0.5% ของ Pt/Rh ที่อยู่บนผิวของ γ -Al₂O₃ (เป็นตัว supporter)

2. Selective Catalytic Reduction (SCR) วิธีนี้จะใช้ NH₃ ทำปฏิกิริยากับ NO_x เพียงชนิดเดียวโดยจะต้องใช้ Pt เป็นตัวเร่งภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนมาก

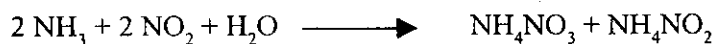
ปฏิกิริยาหลักที่เกิดคือ NO_x จะถูกเปลี่ยนเป็น N₂ ดังสมการ



แต่พบว่ายังมีบางปฏิกิริยาที่จะเกิดไปด้วย ได้แก่



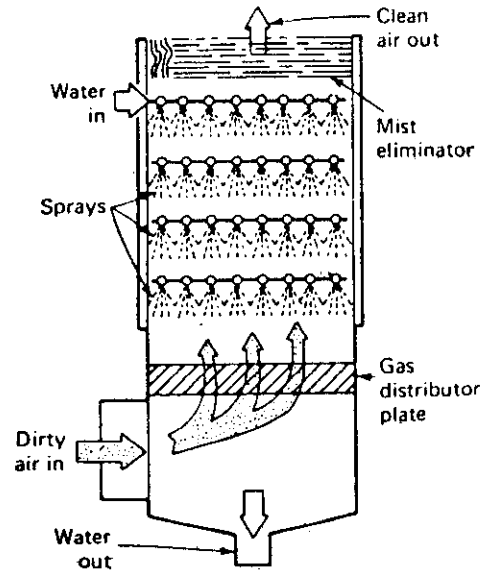
และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100-200° ซ จะให้ปฏิกิริยาดังนี้



วิธีป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการทำได้โดยคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 100-200° ซ และปรับแก๊ส NH₃ ให้ได้ปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณที่จำเป็นต้องใช้จริง

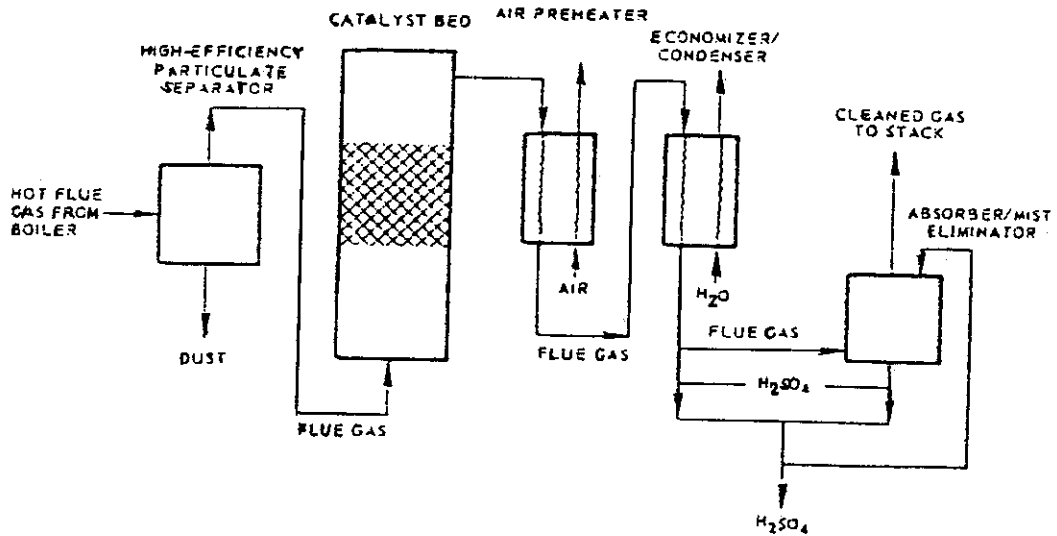
เนื่องจากได้ถูกทำให้เปียกและเก็บไว้ในชั้นของเหลวแล้ว เครื่องสัมผัสแบบเปียกมีหลายแบบ ได้แก่

1. **spray tower** เป็นแบบที่ง่ายที่สุดดังรูป 3.5 โดยน้ำจะถูกฉีดเป็นฝอยแล้วเข้าสัมผัสกับ particulates ในทิศทางทวนกระแสวิธีนี้เหมาะกับ particulates ที่มีขนาด $> 10 \mu\text{m}$ และประสิทธิภาพจะน้อยกว่า 80%



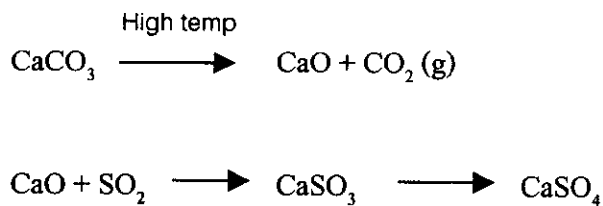
รูปที่ 3.5 spray tower

2. **cyclone spray tower** ลักษณะการทำงานเหมือน spray tower ต่างที่ว่าจะมี cyclone หมุนและแกนกลางจะเจาะรูให้น้ำไหลออก ดังรูป 3.6 วิธีนี้เหมาะกับ particulates ขนาด $2.5 \mu\text{m}$ และประสิทธิภาพ $< 80\%$ โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.14 กระบวนการกำจัด SO₂ โดยวิธี Catalytic Oxidation

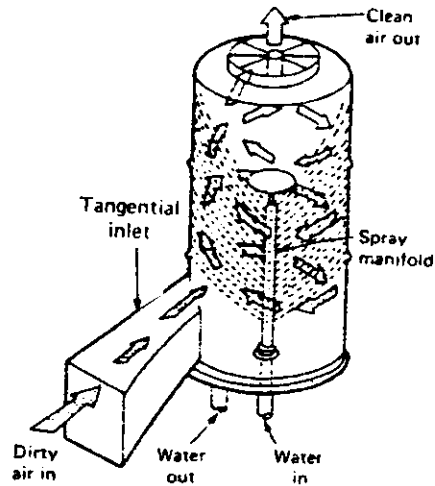
4. Fluidised-bed combustion ทำโดยขบด CaCO₃ และถ่านหินให้เป็นผงผสมพร้อมกันในเตาเผา ที่อุณหภูมิ CaCO₃ จะเกิดการสลายตัวและทำปฏิกิริยากับ SO₂ ที่เกิดจากถ่านหินในเตาเผาพร้อมกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



CaSO₄ และ CaSO₃ ที่ได้จะถูกขจัดออกในสภาพที่เปียกซึ่งสามารถนำไปทำปุ๋ยและถมที่คืนได้

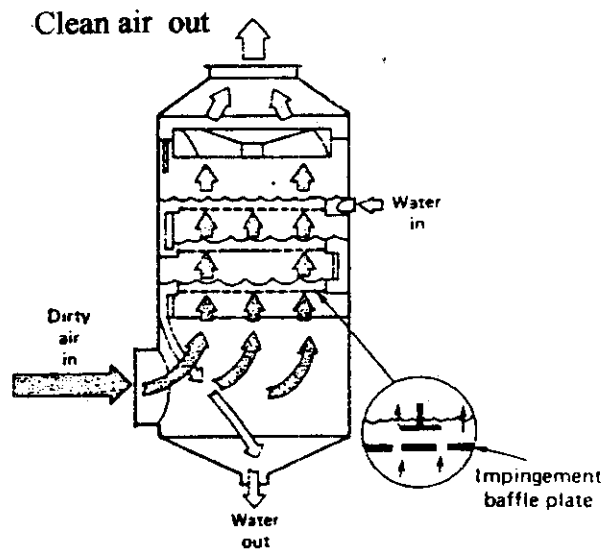
3.1.2.2 การควบคุม NO_x ในกรณีที่เกิดเป็น NO_x จากโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้วิธีควบคุม NO_x โดยการต่อเข้ากับท่ออากาศเสียก่อนจะปล่อยจากโรงงาน ซึ่งมีระบบดังนี้

1. Nonselective Catalytic Reduction of NO_x (NSCR) หรือ Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) เป็นวิธีการควบคุมเหมือนในระบบรถยนต์ กล่าวคือปรับ

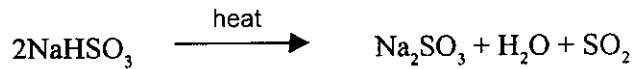
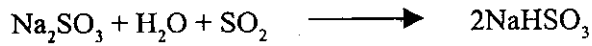


รูปที่ 3.6 cyclone spray tower

4. **impingement** จะให้เกิดการรวมหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ particulate โดยมีน้ำมาเกี่ยวข้องด้วย แทนการไหลของน้ำ ดังรูป 3.7 วิธีนี้เหมาะกับ particulates ขนาด $> 2.5 \mu\text{m}$ ประสิทธิภาพ $< 80\%$ โดยน้ำหนัก

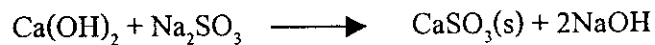
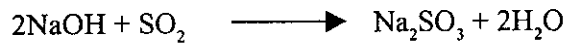


รูปที่ 3.7 impingement



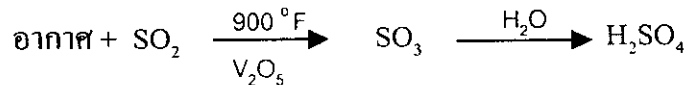
วิธีนี้ทำได้ง่ายแต่ใช้เงินค่อนข้างมาก และเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ของกรดซัลฟูริก แต่ไม่ค่อยนิยมสำหรับวิธีนี้

3.3 Double alkali ใช้ alkali สองชนิดคือ NaOH และ Ca(OH)₂ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น

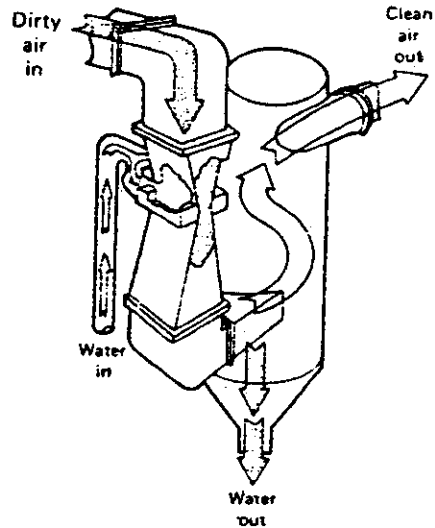


วิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถนำ NaOH ซึ่งมีราคาแพงที่ได้กลับมาใช้ใหม่ได้อีกในกระบวนการ

3.4 Catalytic เป็นวิธีแยก SO₂ ออกจากแก๊สที่ปล่อยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา oxidation ของ SO₂ ให้เป็น SO₃ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ V₂O₅ วิธีนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูง ฉะนั้นควรใช้กำจัด SO₂ ที่ปล่อยออกจากที่มีอุณหภูมิสูง และวิธีนี้พบว่าจะได้ H₂SO₄ กลับคืนมาด้วย ดังแสดงในรูป 3.14 และสมการที่เกิดขึ้น



4. venturi scrubber จะให้อากาศเสียไหลเข้า chamber พร้อม ๆ กัน ชนิด particulates ที่รวมกับน้ำและมีขนาดใหญ่ก็จะตกลงที่รองรับด้านล่าง ดังรูป 3.8 เหมาะกับ ขนาด $> 0.5 \mu\text{m}$ ประสิทธิภาพ $< 99\%$



รูปที่ 3.8 venturi scrubber

สรุปข้อดี ของ wet scrubber

1. แก๊สจะถูกดูดซึมด้วยในขณะที่ทำการขจัด particulate
2. สามารถเก็บ particulates ได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำ
3. ลดการแตกกระจายของฝุ่นเนื่องจากการเก็บแบบเปียก

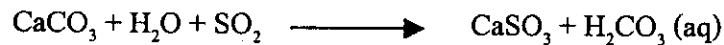
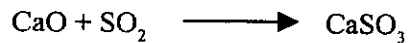
ข้อเสีย ของ wet scrubber

1. เนื่องจากมีการใช้น้ำทำให้เกิดปัญหาการสึกและกัดกร่อนได้
2. อนุภาคขนาดเล็กมากจะใช้ประสิทธิภาพในการขจัดต่ำ
3. เพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ได้

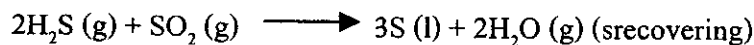
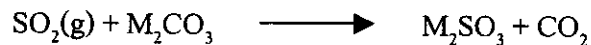
3. การแยก SO₂ ออกจากแก๊สที่ปล่อยออกมาหลังสันดาป วิธีนี้อาจกระทำได้หลายแบบ ได้แก่

3.1 Lime / Limestone Scrubbing (Wet Lime / Limestone Scrubbing) เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยกำจัด SO₂ ถึง 90% ซึ่งอาจทำได้ 2 วิธีคือ

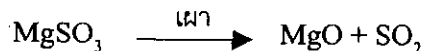
วิธีที่หนึ่ง คือผ่านแก๊สเสียที่ได้จากการเผาไปยังผง CaO หรือ CaCO₃ เปียก SO₂ ทำปฏิกิริยากับ CaO และ CaCO₃ ได้ CaSO₃



ถ้าต้องการนำ S ใน CaSO₃ และ CaSO₄ กลับมาใช้ประโยชน์ได้โดยใช้ของผสมคาร์บอนเนตของ Li, Na และ K ในสถานะหลอมเหลวซึ่งเขียนแทนด้วย M₂CO₃ (M = Li, Na หรือ K) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้



วิธีการขจัด SO₂ ที่คล้ายกันนี้คือ การใช้ MgO ในรูปของ Mg(OH)₂ แทน Ca(OH)₂ เมื่อนำ MgSO₃ ไปเผาจะได้ SO₂ กลับคืนมาซึ่งสามารถนำไปทำกรดซัลฟูริกได้



และ MgO สามารถนำกลับไปใช้ในปฏิกิริยาได้อีก

3.2 Sodium base scrubbing ใช้ absorbent เป็นสารละลาย Na₂SO₃ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

Fabric filter หรือ baghouse (BH)

จะใช้ bag house ซึ่งมีลักษณะเป็นถุงกรองแขวนอยู่ แล้วให้อากาศเสียผ่านถุงกรอง จะกรองฝุ่นหรือ particulates ไว้ดังรูป 3.9 วัสดุที่ใช้ทำถุงอาจเป็นผ้า เช่น ผ้าฝ้าย ผ้าป่าน ขนสัตว์ หรือออร์ลอน ผ้าที่ฉาบด้วย Silicon polyester หรือใช้กระดาษธรรมดาก็ได้ การเลือกใช้วัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านเข้าไป วัสดุจะถูกคัดโดยถุงคังกล่าวได้ดีคือ ทราย กรวด หิน จึงเหมาะกับโรงงานปูนซีเมนต์ โรงงาน carbon black ปกติแล้วถ้าฝุ่นเต็มในถุงก็สามารถจะถอดออกมาทำความสะอาดและนำกลับไปใช้ใหม่ได้อีก มิฉะนั้นจะเกิดการเกาะติดแน่นของอนุภาคมลพิษบนผ้ากรองที่เรียกว่า cake ซึ่งจะทำให้ความดันในการกรองลดลง โดยค่าความดันที่ลดลงที่เกิดจาก cake สัมพันธ์กับค่าเวลาและความเร็วของแก๊ส ดังนี้

$$\Delta P_{\text{cake}}(t) = KCtV^2$$

where :

K = Contant

C = Dust concentration in air stream

t = Time

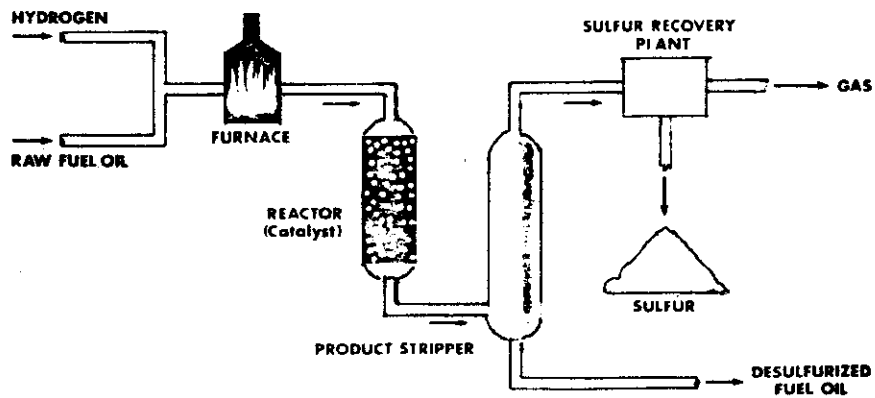
V = Superficial velocity

And :

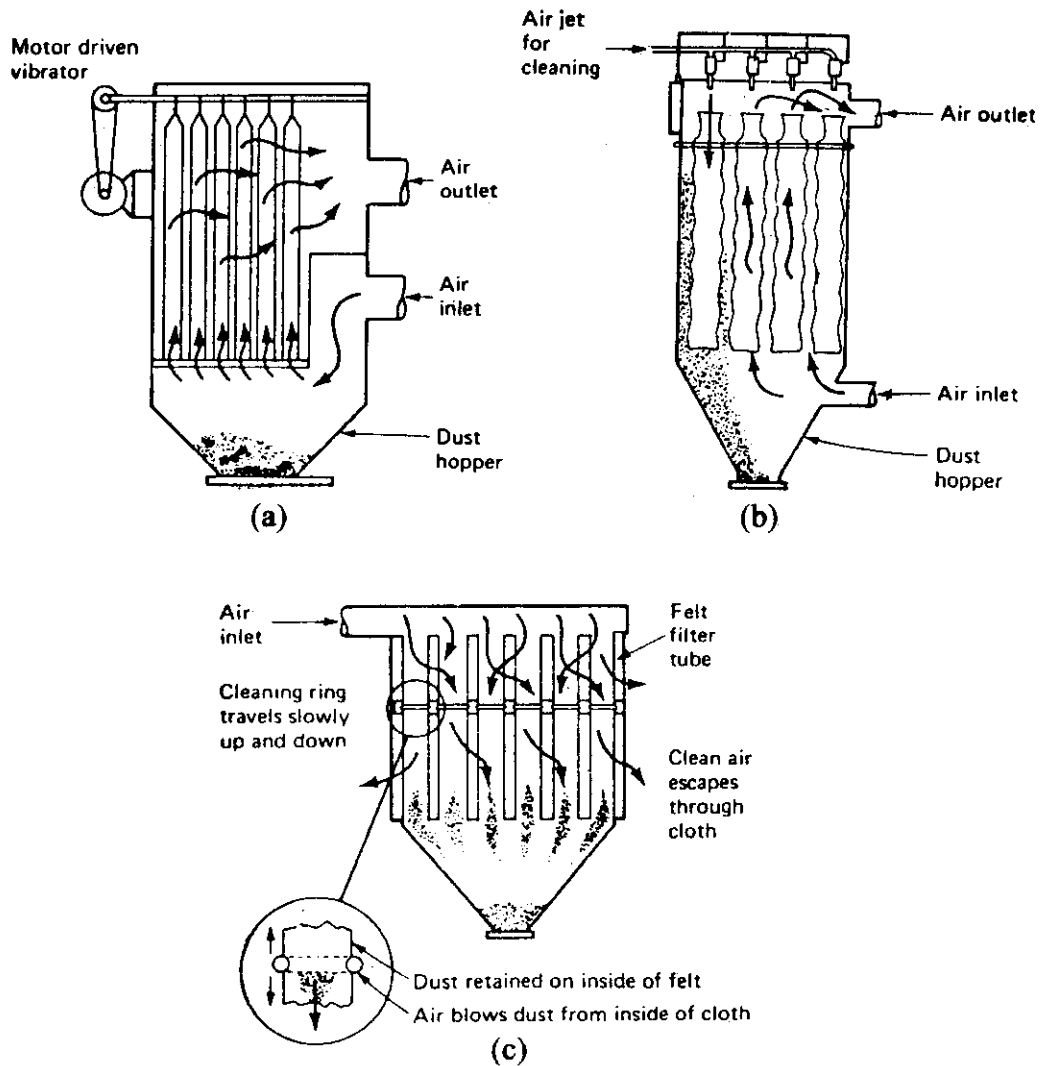
$$V = Q / A$$

Q = Volumetric flow rate

A = Filter face area



รูปที่ 3.13 (รูปบนซ้าย) ส่วนหนึ่งของโรงงานกำจัดกำมะถันที่ Amuay
 (รูปบนขวา) แสดงกำมะถันที่ได้ออกมาจากโรงงานนี้
 (รูปล่าง) แผนผังของการกำจัดกำมะถันจากน้ำมันจนได้ออกมาเป็นกำมะถัน



รูปที่ 3.9 These design for a baghouse (a) motor-drive vibrator (b) air jet and (c) cleaning ring for removing particles from fabric filters

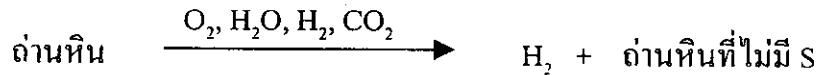
ข้อดีของวิธีนี้

1. เป็นการเก็บ particulates ในลักษณะแห้ง
2. สามารถเก็บ particulates ที่มีขนาดเล็กๆ ได้แม้ขนาดจะ $< 1 \mu\text{m}$
3. วิธีนี้ให้ประสิทธิภาพสูง $> 99\%$ โดยน้ำหนัก

2. แยก S ออกจากเชื้อเพลิงก่อนที่จะนำไปใช้ เป็นวิธีที่ทำได้แบ่งเป็น

ก. กรณีที่เป็นถ่าน จะมี S ประมาณ 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่า S ที่ปนอยู่ในถ่านหินจะมี 3 รูป คือ pyrite (FeS_2) เป็นส่วนใหญ่ ขนาดพวกนี้ $> 50 \mu\text{m}$ รูปสารประกอบอินทรีย์และซัลเฟต (เป็นรูปที่น้อยที่สุด) วิธีแยก S ได้แก่

- การบดถ่านหินให้มีขนาด $< 100 \mu\text{m}$ โดยเฉลี่ย แล้วนำมาล้างด้วยน้ำ เนื่องจากไพไรต์ (pyrite) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 5 และถ่านหินสะอาดความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 ทำให้ pyrite แยกออกมาได้ เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า วิธีนี้พบว่าให้ผลในการกำจัด S ไม่ดีนัก
- ทำถ่านหินให้เป็นแก๊ส (gasification)



ข. กรณีที่เป็นน้ำมัน ซึ่งมี S ประมาณ 0.5-5% การแยก S ออกจากน้ำมันโดย desulfurization plant เช่น บริษัท Exxon Cooperation เมือง Amuay ประเทศ Venezuela การขจัดน้ำมันดิบออกมาในรูปของ H_2S โดยใช้ H_2 ดังในรูปที่ 3.13 ชั้นแรก S ในรูปของสารประกอบในน้ำมันถูกรีดิวซ์เป็น H_2S โดย H_2 (H_2 เป็นผลผลิตพลอยได้จากการ cracking ของน้ำมัน) และออกซิไดส์ H_2S นี้เป็น S โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพิเศษ ดังสมการ



เชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณ S เหลือเพียงประมาณ 0.3% เท่านั้น กระบวนการนี้สามารถกำจัด S (ในรูป FeS_2) บางส่วนจากถ่านหิน และเปลี่ยนถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊สที่มีปริมาณ S ต่ำ กำมะถันที่ได้นำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีอื่น เช่น กรดกำมะถัน

ข้อเสีย

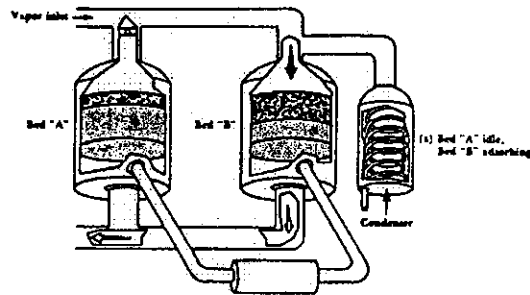
1. ขึ้นกับความเร็วยของ particulate ถ้าเคลื่อนเร็วมากอาจผ่านแผ่นกรองไปได้
2. อุณหภูมิสูงจะทำลาย filter ได้
3. ถ้ามีความชื้นเกี่ยวข้องจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง
4. เส้นใยสามารถถูกกัดกร่อนได้ด้วย

Electrostatic precipitator

ลักษณะเครื่องดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ขึ้นแรกในการแยก particulates จากแก๊สแบ่งได้ 3 ชั้น คือ

1. การเติมประจุให้อนุภาค
2. การเก็บอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบนผิวที่มีศักย์เท่ากับพื้นดิน
3. การแยกอนุภาคที่ทับถมบนผิวเก็บ (collecting electrode)

การทำงานอากาศเสียจะไหลทางแนวนอนผ่านห้องแยกที่มีแผ่นโลหะหลายๆ แผ่น เรียกว่า collecting electrode ตรงกลางระหว่าง collecting electrode จะมีเส้นลวดที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งหุ้มฉนวนไว้ เมื่อความแตกต่างศักย์ระหว่าง electrode และ collecting electrode มีค่ามาก จะทำให้ particulates หรือของเหลวที่มีขนาดเล็ก ๆ ($< 1 \mu\text{m}$) แยกตัวเป็นไอออนลบแล้วเคลื่อนที่ไปยัง collecting electrode ซึ่งมีศักย์เท่ากับพื้นดิน ส่วนมาก electrode จะมีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 ถึง 100 kv ต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าพื้นดินที่มีความต่างศักย์นี้อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกจากเส้นลวดแล้วกระทบติดกับโมเลกุลแก๊สที่อยู่ใกล้ ๆ ไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนและจับกันเป็นชั้นบน collecting electrode และถ่ายประจุลบให้โดยเฉพาะชั้นที่ติดกับ collecting electrode มากที่สุด เนื่องจากความเป็นฉนวนของชั้นอนุภาคนี้อัให้อนุภาคใหม่ไม่อาจถ่ายประจุได้ทันที จึงช่วยยึดอนุภาคทั้งหมดกับแผ่นเก็บ ชั้นสุดท้ายอนุภาคจะถูกเคาะให้หลุดหล่นใส่ในถังเก็บ



รูปที่ 3.12 ระบบ activated carbon แบบ 2 ถัง

การดูดซึม (Absorption) คือวิธีการให้ gas pollutants ทำปฏิกิริยากับสารเคมี เพื่อให้ gas pollutants แปรสภาพหรือเกิดเป็นสารที่เสถียร ที่อุณหภูมิห้องตัวดูดซึมนั้นปกติจะชนิดที่เป็นของเหลว เช่น Alkali Solution ซึ่งสามารถจะดูดแก๊สที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น CO_2 , SO_2

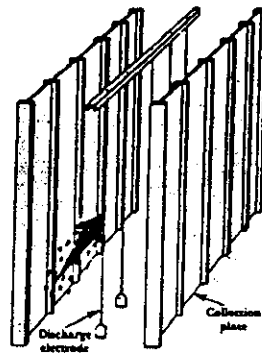
วิธีการเลือกใช้ตัวดูดซึมนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของ gas pollutants ซึ่งสามารถเลือกตัวดูดซึมได้มาก และประสิทธิภาพไม่จำกัดเหมือนวิธีแรก จึงนิยมใช้ในการขจัด gas pollutants โดยเฉพาะจาก stationary source เป็นส่วนใหญ่ (อาจใช้วิธีติดไว้ที่ปล่องควัน) เช่น SO_2 , NO_x หรือถ้าเป็น H_2S ก็จะออกซิไดส์ให้เป็น SO_2 ก่อนแล้วจึงกำจัด SO_2 ต่อ

เนื่องจากมลพิษทางอากาศประเภทแก๊สมีแหล่งที่มา 2 แหล่ง คือ แหล่งที่อยู่กับที่ และแหล่งเคลื่อนที่ การควบคุมแก๊สที่จะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปนี้จะแบ่งตามชนิดของแหล่ง

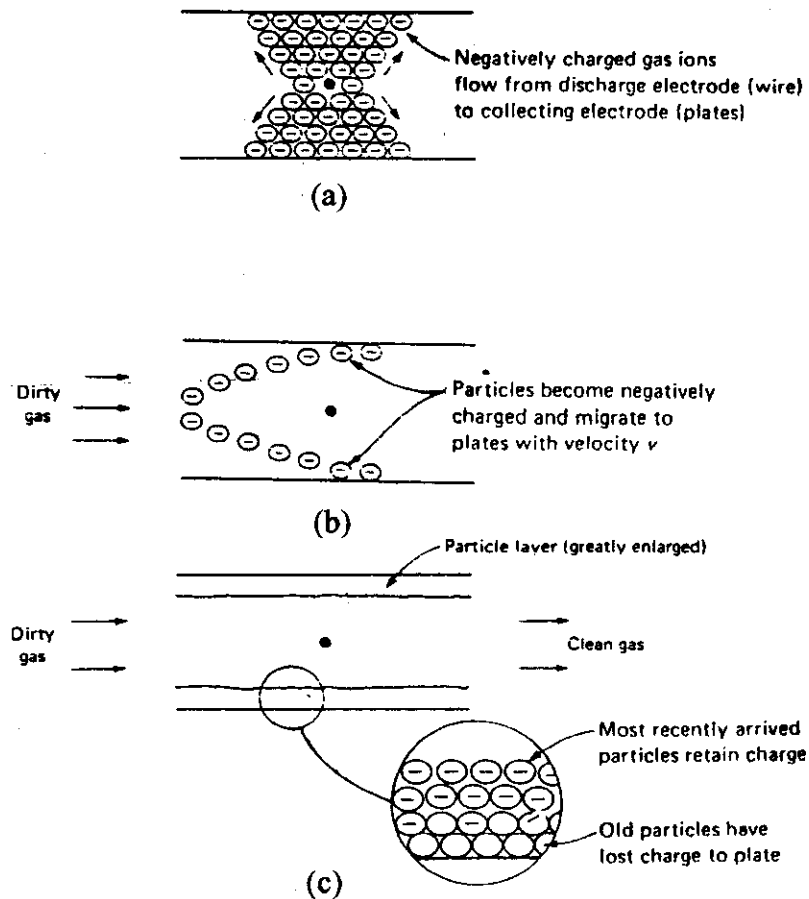
3.1.2.1 การควบคุม SO_2

วิธีการควบคุม SO_2 ที่ปล่อยสู่บรรยากาศแบ่งได้อย่างกว้าง ๆ 3 วิธี

1. ใช้เชื้อเพลิงที่มี S ต่ำ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ซึ่งเป็นสารที่หากยากและมีราคาแพง ในทางปฏิบัติจึงเกือบจะเป็นไปไม่ได้



รูปที่ 3.10 electrostatic precipitator



รูปที่ 3.11 Process in continuous electrostatic precipitation (a) Gas ions are formed. (b) particles are charged and migrate to collection plates. (c) Layer of particulate matter builds up on plates.

3.1.2 การควบคุมสารมลพิษชนิดที่เป็นแก๊ส

การควบคุมสารมลพิษที่เป็นแก๊สจะมีวิธีเฉพาะและยุ่งยากกว่า particulates เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างกัน ฉะนั้นต้องใช้วิธีเฉพาะในการควบคุมหรือจัดสารมลพิษนั้น ๆ แบ่งได้เป็น 3 วิธี

1. การดูดซับ (Adsorption) สารมลพิษบน solid surface
2. การดูดซึม (Absorption) สารมลพิษในของเหลว
3. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารมลพิษ เช่นการสันดาป (combustion) หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic treatment)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีกำจัดสารมลพิษที่เป็นแก๊ส โดยใช้สารที่สามารถดูดซับสารมลพิษที่เป็นแก๊สไว้บนผิว ตัวอย่างเช่น activated charcoal ซึ่งสามารถจะ adsorb สารอินทรีย์หรือ SO_2 ได้ดี การดูดซับจะเกิดได้ดีขึ้นอยู่กับอัตราส่วนต่อปริมาตรสูง ๆ หรือมีรูปพรุนมาก ๆ ซึ่งในการใช้งานจริง ๆ พบว่าจะสิ้นเปลือง Adsorbent มากและกินที่มาก จึงเกิดการสิ้นเปลืองมาก ฉะนั้นในอุตสาหกรรมใหญ่ ๆ จึงไม่นิยม เนื่องจากประสิทธิภาพโดยรวมแล้วจะน้อยกว่า Absorption

ตัวดูดซับแบ่งได้ 3 พวก

1. nonpolar solid เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ใช้ดูดพวก hydrocarbon กลิ่น สิ่งเจือปน ที่มีปริมาณน้อยๆ
2. polar solid เช่น oxide of Si หรือ Al ใช้ดูด H_2O , NH_3 , H_2S , SO_2
3. chemical adsorbing surface เช่น ionexchange resin

ชนิดตัวดูดซึมที่นิยมในโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ activated carbon, silica gel, alumina oxide และ zeolite ตัวอย่างเช่น การใช้ activated carbon ระบบ 2 ถังดังแสดงในรูปที่

3.12

เครื่องมือชนิดนี้ใช้ขจัด particulates หรือของเหลวที่มีขนาด $> 1 \mu\text{m}$ ได้ดีประสิทธิภาพสูงมากคือ 95-99% นิยมใช้ในระบบของโรงงานปูนซีเมนต์ควบคู่กับ fabric filter

ข้อดี

1. สามารถเก็บ particulates ได้ทั้งที่เป็นของแข็งหรือของเหลว
2. ทำงานได้โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
3. ไม่มีปัญหาการกักคร่อน
4. ประสิทธิภาพสูง
5. ให้ผลดีแม้กับ particle ที่ขนาดเล็กมาก ๆ

ข้อเสีย

1. ราคาเครื่องจะแพง
2. มีการใช้ไฟฟ้าสูง
3. เมื่อมี particle เกาะแล้ว การเกาะของ particulates ชนิดใหม่จะลดน้อยลง

ค่าสัมประสิทธิ์ของการเก็บอนุภาคมลสารมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E = 100 - 100 [\exp(-AE_o E_p a)/(V2\pi\mu)]$$

Where :

E = Percent efficiency

A = Surface area of collector electrodes, ft^2

V = Volumetric flow rate, ft^3/min

E_o = Charging field, volts/ft

E_p = Collecting field, volts/ft

a = Particle radius, ft

μ = Gas viscosity

ตารางที่ 3.1 สรุปเครื่องมือและวิธีการในการควบคุม particulate

ชนิดอุปกรณ์	ขนาดอนุภาค* (ไมครอน)	ประสิทธิภาพ %(ตาม น้ำหนัก)	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravitational	>50	<50	การสูญเสียความดันน้อย ง่ายต่อการออกแบบและการดูแลรักษา	ใช้เนื้อที่มาก ประสิทธิภาพในการเก็บต่ำ
Cyclone	5-25	50-90	ง่ายต่อการออกแบบและดูแลรักษา ใช้เนื้อที่ที่พื้นน้อย เก็บฝุ่นขณะแห้งได้อย่างต่อเนื่อง การสูญเสียความดันมีค่าปานกลางถึงน้อยมาก เก็บอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดี การเก็บได้มากน้อยจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ	ใช้เนื้อที่ตามความสูงมาก ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็กต่ำ ความไวของการเก็บฝุ่นขึ้นกับอัตราการเคลื่อนที่
Wet collectors				
Spray tower	>10	<80	กำจัดได้ทั้งสภาพที่เป็นแก๊สและอนุภาค สามารถกำจัดแก๊สที่ร้อนและทำให้เย็นลง	มีปัญหาการผุกร่อน ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำที่ได้ออกมา
Cyclone	>2.5	<80	แก๊สหรือไอที่มีสมบัติในการกัดกร่อน	ปัญหาของการแข็งตัวในอุณหภูมิต่ำ
Impingement	>2.5	<80	ลดปัญหาการทิ้งกระจายของฝุ่น	ไอน้ำจะหายไปเป็นพรมที่มองเห็นได้
Venturi	>0.5	<99	ประสิทธิภาพในคงที่	ทำให้แหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนได้
Electrostatic	>1	95-99	ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง กำจัดได้เมื่ออนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก กำจัดอนุภาคได้ทั้งแบบเปียกและแห้ง ปัญหาของ ความดันที่ลดลงและความต้องการพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่สูง การดูแลรักษาไม่มีนอกจากการสึกกร่อน หรือมีวัสดุติดอยู่ มีบางส่วนที่เคลื่อนที่ สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงได้ (300-450 ⁰ °C)	ราคาค่อนข้างแพง ความว่องไวในการตกตะกอนจะขึ้นกับ ปริมาณและอัตราการไหล ต้องระวังเนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าแรงสูง ประสิทธิภาพการบำบัดอาจถูกทำให้ลดลงได้
Fabric	<1	>99	เก็บได้ขณะแห้ง การทำงานจะลดลงให้เห็นอย่างชัดเจน สามารถที่จะเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ ให้ประสิทธิภาพสูง	ความว่องไวของการบำบัดจะขึ้นกับความเร็ว ที่ผ่านการกรอง ความชื้นจะมีผลต่อการเก็บได้ (ความชื้น) สารเคมีมีผลต่อเส้นใยได้

*คัตที่การเก็บที่ให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 90