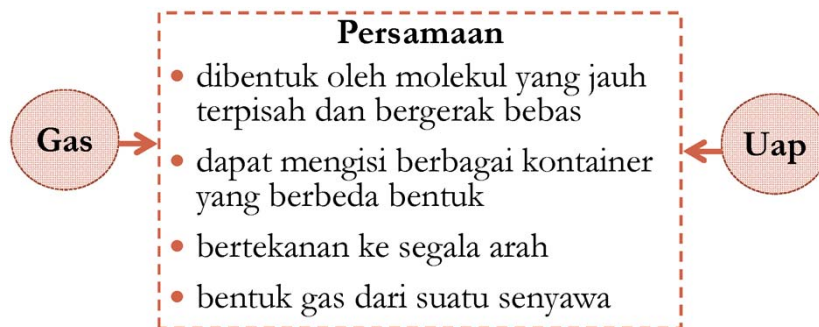


# Pengendalian Air dan Limbah Industri

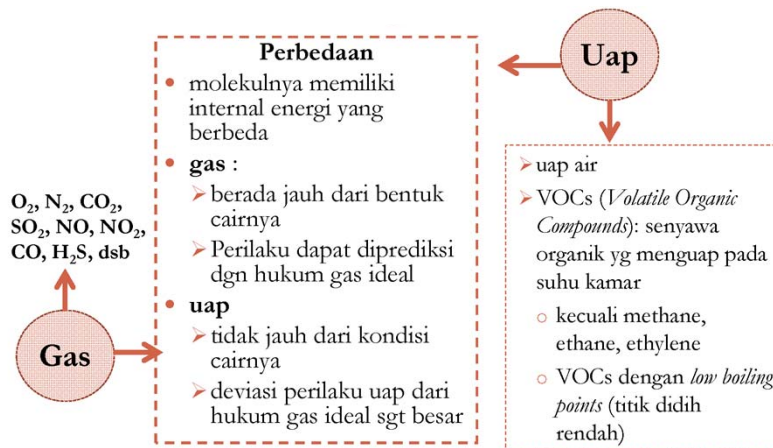
## (Pengendalian Emisi Gas)

DODY GUNTAMA, ST., M.Eng

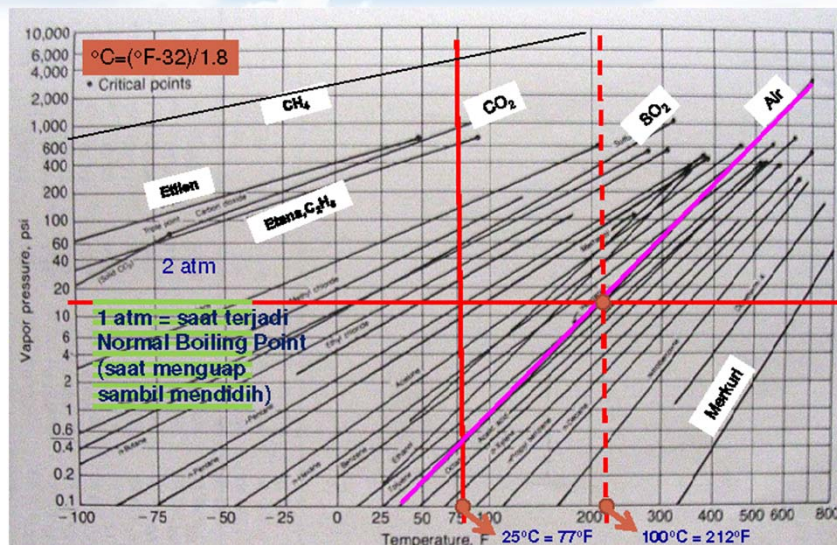
### Apa itu Gas?



## Apa itu Gas?



## Tekanan Uap Zat yang Umum Dikenal



## Alat Pengendali Gas

- **Adsorber**
- **Absorber**
- **Kondenser**
- **Unit pembakaran (oksidasi kimia)**
- ***Catalytic* Oksidator**

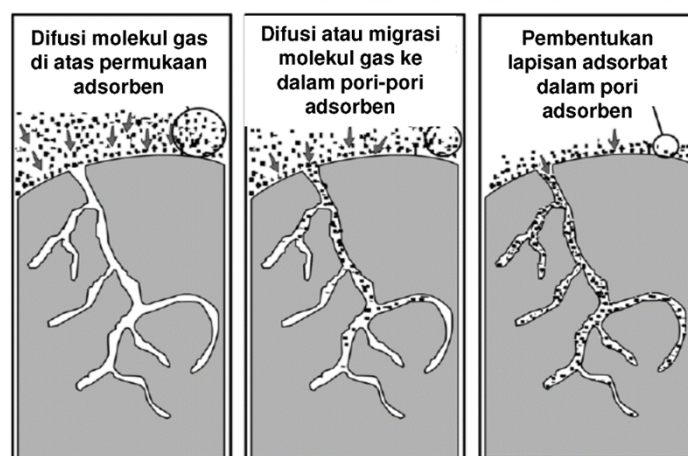
## Adsorber

- Adsorber: unit pengendali gas yang menggunakan prinsip adsorpsi
  - Adsorpsi: proses tertahannya pencemar gas pada permukaan padat
  - Adsorben: permukaan padat yang mampu menarik molekul gas pencemar (seperti karbon aktif, silica gel, *activated* alumina)
  - Adsorbat adalah molekul gas pencemar yang tertahan pada permukaan padat (seperti senyawa organik volatil, thinner cat, pelarut/solvents)
- Adsorber biasanya digunakan untuk mengendalikan bau (odor)
  - Pencemar berkonsentrasi rendah (<10 ppm) -> adsorben sekali pakai
  - Pencemar konsentrasi tinggi (10 – 10000 ppm) -> adsorben yang dapat diregenerasi

## Adsorber: Aplikasi

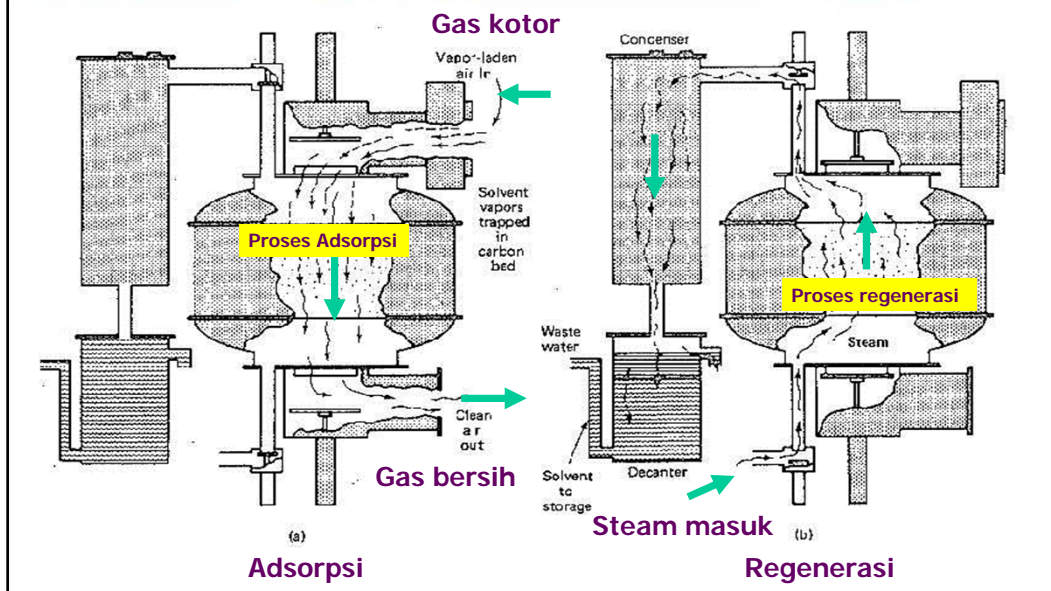
- Aplikasi:
  - Untuk menghilangkan bau
  - Untuk recovery pelarut organik
  - Untuk pemurnian gas
  - Flue Gas Desulphurization metoda kering
- Industri pengguna:
  - Industri pengolahan makanan
  - Industri fermentasi
  - Industri pestisida
  - Industri petrokimia

## Adsorber : Mekanisme Adsorpsi



(Sumber: APTI 415, 1999)

## Adsorber : proses adsorpsi dan regenerasi



## Adsorber: Kekurangan dan Kelebihan

- **Kelebihan :**
  - Produk dapat di-*recovery*
  - Sistemnya dapat dijalankan secara otomatis
  - Mampu menyisihkan zat pencemar konsentrasi rendah
- **Kekurangan :**
  - *Recovery* produk membutuhkan peralatan distilasi yang mahal
  - Kapasitas adsorpsi yang terbatas sehingga sering terjadi kerusakan adsorben
  - Regenerasi adsorben memerlukan steam atau vacuum
  - Biaya investasi yang cukup tinggi
  - Pemasangan filter diperlukan untuk menyisihkan partikulat sehingga tidak terjadi penyumbatan pada adsorben



## Adsorber: Konsep Desain

- **Faktor-faktor yang berpengaruh:**
  - **Karakteristik adsorben**
    - Kapasitas adsorben
    - Massa jenis
    - Kapasitas panas
    - Volume pori
    - Afinitas adsorben terhadap gas pencemar
    - Luas permukaan dari adsorben
    - Temperatur regenerasi
  - **Kondisi operasi**
    - Temperatur
    - Tekanan operasional
    - *Breakthrough performance*

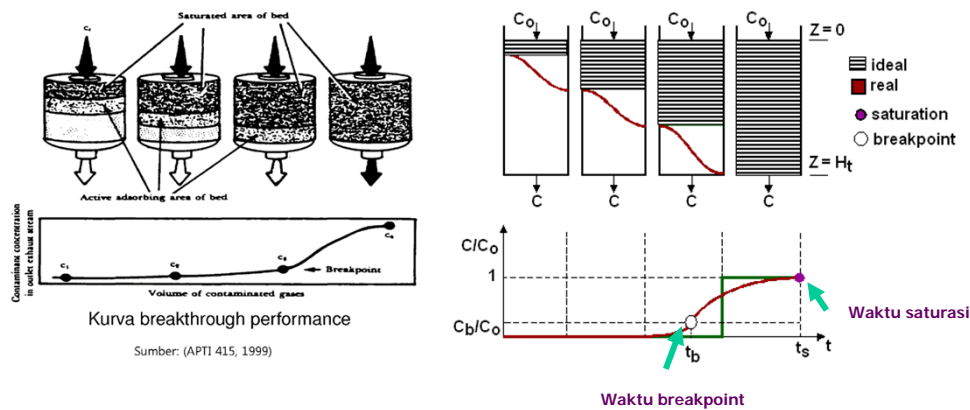
## Adsorber: Konsep Desain

**Karakteristik fisik adsorben**

Parameter	<i>Porositas internal</i>	<i>Luas permukaan</i>	<i>Volume pori</i>	Massa jenis kering	<i>Average pore diameter</i>	Regenerasi on temperatur	<i>Maximum allowable Temperatur</i>
	%	m <sup>2</sup> /g	cm <sup>3</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	Å	°C	°C
Karbon Aktif	55-75	600 – 1600	0.80-1.20	0.35-0.50	1500-2000	100 -140	150
Alumina Aktif	30-40	200-300	0.29-0.37	0.90-1.00	1800-2000	200 - 250	500
zeolit	40-55	600-700	0.27-0.38	0.800	300-900		
polimer sintetis		1080-1100	0.94-1.16	0.34-0.40			
Silica Gel		750	0.37			120 - 250	400

Sumber: (APTI 415, 1999)

## Adsorber: Breakthrough Performance



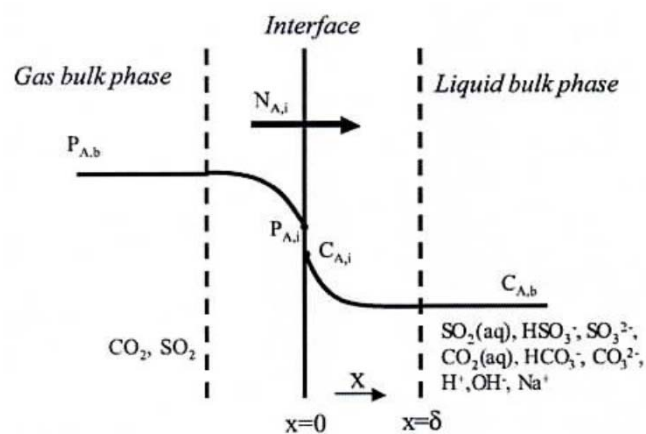
## Absorber

- Absorber atau *scrubber*, unit pengendali gas yang menggunakan prinsip absorpsi
  - Absorpsi adalah mekanisme dimana satu atau lebih zat pencemar dalam aliran gas dieliminasi atau dihilangkan dengan cara melarutkannya dalam cairan
  - Absorben adalah cairan yang digunakan untuk melarutkan pencemar
  - Absorbat adalah pencemar yang terlarut di dalam cairan
  - Gas pencemar akan bereaksi dengan absorben, terjadi reaksi kimia

## Absorber: Aplikasi

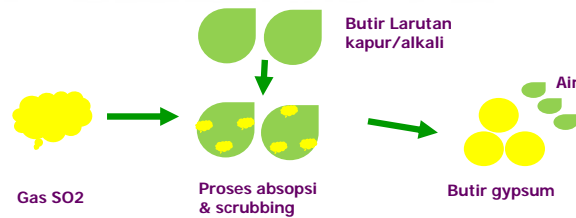
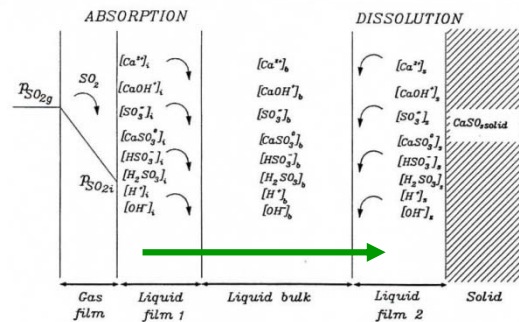
- Absorber/*scrubber* umumnya digunakan untuk :
  - *Flue Gas Desulphurization* (FGD), penyisihan  $\text{SO}_2$  dari PLTU Batubara
  - Penyisihan dan *recovery*  $\text{NH}_3$  di pabrik pupuk
  - Penyisihan Hidrogen Fluorida dari *glass furnace*
  - *Recovery* pelarut yg dapat larut di air seperti aseton dan metil alkohol
  - Pengendalian gas berbau

## Absorber: Mekanisme absorpsi





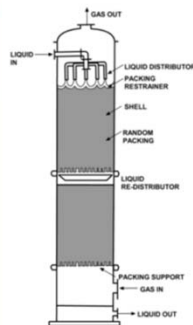
## Absorber: Mekanisme absorpsi



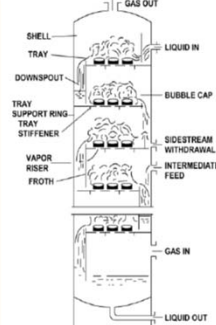
## Absorber: Deskripsi Alat



Counter current spray tower (Sumber: APTI, 1999)



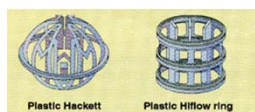
Counter Current Packed Tower (Sumber: APTI 415,1999)



Bubble Cap Tray Scrubber



Spray nozzle



Packed type



Bubble cap

## Absorber: Kelebihan dan Kekurangan

- **Kelebihan:**

- Efisiensi penyisihan yang tinggi
- Biaya pembangunan yang relatif rendah
- Luas area yang dibutuhkan tidak besar
- Kehilangan tekanan relatif kecil

- **Kekurangan:**

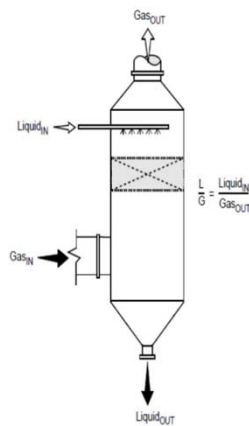
- Sulit untuk memperoleh gas murni (biasanya lebih dari satu jenis gas akan terserap pada waktu bersamaan)
- Menghasilkan limbah cair
- Membutuhkan proses regenerasi untuk memisahkan absorben dan absorbatnya
- Biaya pemeliharaan relatif tinggi

## Absorber: Konsep Desain

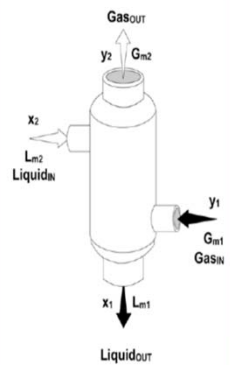
- Variabel dasar yang menentukan dalam desain scrubber:

- Pemilihan absorben yang sesuai
- Tekanan system
- Rasio aliran cairan absorben terhadap gas (L to G ratio)
- Kecepatan gas dalam kolom absorber
- Jumlah kontak antara gas dan liquid yang menghasilkan pemisahan
- *Flowrate* gas yang akan diolah
- Konsentrasi gas yang akan disisihkan
- Efisiensi penyisihan yang harus dicapai

## Absorber: Konsep Desain



Definisi L to G ratio  
(Sumber: APTI 415, 1999)



Kesetimbangan massa untuk  
countercurrent flow absorber  
(Sumber: APTI 415, 1999)

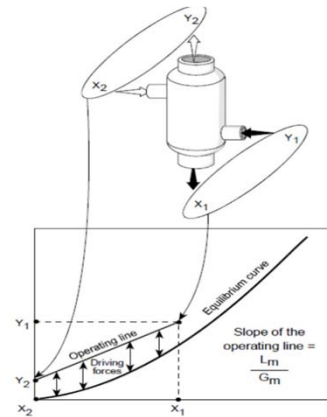
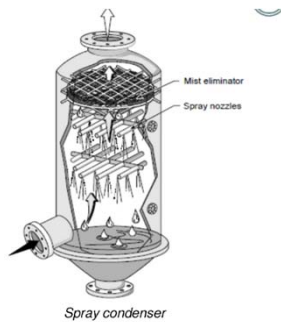


Diagram perubahan komposisi  
gas di dalam kolom absorber,  
Sumber(APTI 415, 1999)

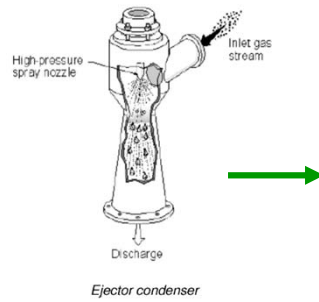
## Kondensor

- Kondenser: unit pengendali gas yang menggunakan prinsip kondensasi
  - proses penyisihan gas pencemar dengan cara merubah fasa dari fasa gas ke fasa cair
  - Umumnya digunakan sebelum adsorber, absorber, atau insinerator untuk mengurangi total massa gas buang yang akan diolah

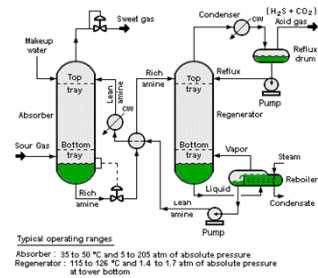
## Kondenser: Deskripsi Alat



Kondenser kontak langsung Sumber  
(APTI 415, 1999)

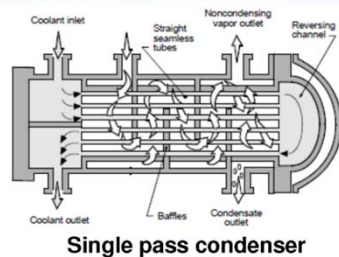


Ejector condenser

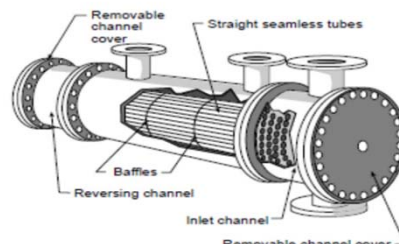


Contoh aplikasi DC condenser  
Pada absorber & regenerator  
Pemisahan  $\text{CO}_2$  &  $\text{H}_2\text{S}$  dari gas alam

## Kondenser: Deskripsi Alat



Single pass condenser



Pass shell and tube condenser



Contoh aplikasi surface condenser  
Pada Proses Claus untuk merecovery  
sulfur dari gas  $\text{H}_2\text{S}$

Kondenser permukaan  
(APTI 415, 1999)

## Kondenser: Kelebihan dan Kekurangan

- **Kelebihan:**
  - Dapat diperoleh produk *recovery* yang murni (kondenser permukaan)
  - Air yang digunakan sebagai pendingin tidak dikontakkan langsung dengan gas pencemar sehingga dapat digunakan kembali (kondenser permukaan)
- **Kekurangan:**
  - Efisiensi penyisihan gas pencemar relatif rendah
  - Pendingin selain air dapat berharga sangat mahal
  - Membutuhkan temperatur rendah, sehingga satu tahap pendinginan tidak mencukupi
  - Membutuhkan proses pencairan (*defrosting*)
  - Biaya operasional relatif tinggi

## Kondenser: Konsep Desain

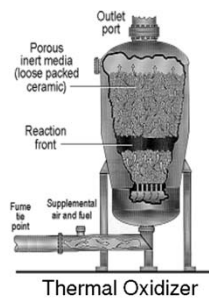
- **Desain Kondenser**
  - Menghitung jumlah pendingin yang dibutuhkan untuk mengkondensasikan uap
  - Metode merubah fasa dilakukan dengan cara menurunkan temperatur, menaikkan tekanan, atau kombinasi keduanya, yaitu:
    - Pada temperatur tertentu tekanan dinaikkan dengan cara volume gas ditekan sehingga tekanan parsial gas sama dengan tekanan uapnya
    - Pada tekanan tertentu, gas didinginkan sampai tekanan parsial gas sama dengan tekanan uapnya
    - Kombinasi dari kedua teknik diatas, gas ditekan dan didinginkan, sampai tekanan parsial gas sama dengan tekanan uapnya.

## Unit Pembakaran: Aplikasi

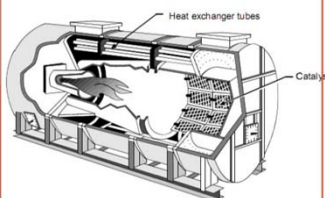
- Insinerator: membakar senyawa organik beracun
- Flare: membakar kelebihan bahan bakar pada kilang minyak

## Unit Pembakaran: Deskripsi Alat

- Bagian utama:
  - api pembakar (*Burner*)
  - ruang bakar (*combustion chamber*)
  - blower udara (*combustion air blower*)
  - saluran inlet bahan bakar gas

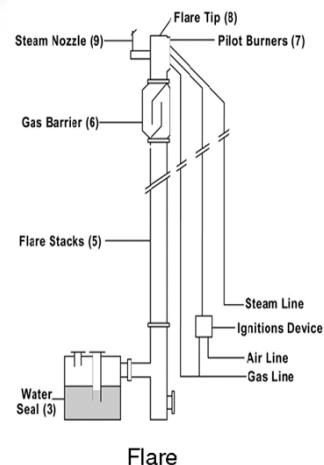


Thermal Oxidizer



Catalytic Oxidizer

Sumber (APTI 415, 1999)



Flare



## Unit Pembakaran: Kelebihan dan Kekurangan

- **Kelebihan:**
  - Pengoperasian yang sederhana
  - Dapat menjadi sumber panas
  - Dapat mendestruksi senyawa organik dengan efisiensi tinggi
- **Kekurangan:**
  - Biaya operasional relatif tinggi karena membutuhkan bahan bakar
  - Dapat terjadi pembakaran tidak sempurna sehingga menghasilkan pencemar lain yang berbahaya

## Unit Pembakaran: Konsep Desain

- Faktor yang paling menentukan dalam disain suatu unit pembakaran adalah 3T, yaitu temperatur, *time* (waktu), dan turbulensi.
  - Secara umum temperatur pembakaran berkisar antara 540 – 1200°C, dengan waktu tinggal dalam ruang bakar sekitar 0.2- 5 detik, kecepatan alir gas 6-12 m/detik
- Perolehan panas (*heat recovery*) dapat dilakukan pada sebuah insinerator dengan memasang heat exchanger
  - Heat exchanger yang digunakan untuk pemanasan awal (*preheat*) gas buang disebut recuperator
  - Pemanasan awal sangat berguna karena secara langsung dapat menghemat bahan bakar yang diperlukan
  - Panas dari afterburner dapat juga dimanfaatkan untuk memanaskan boiler dan menghasilkan uap (*steam*), atau dicampurkan dengan udara untuk menyediakan aliran udara panas yang kering

## *Catalytic Oxidator*

- Prinsip
  - sama seperti pembakaran, tetapi ditambah katalis
- Katalis
  - Biasanya berupa logam mulia spt platina (Pt), palladium (Pd)
  - Mempercepat laju reaksi
  - Menurunkan temperatur saat oksidasi berlangsung
  - Katalis tdk berubah dan dpt digunakan kembali
  - kecuali ada gangguan luar

## **PENGENDALIAN SO<sub>2</sub>**

## Teknik Pengendalian SO<sub>2</sub> Flue Gas Desulphurization (FGD)

- FGD menggunakan
  - Teknik absorpsi
  - Teknik adsorpsi
- Prinsip
  - SO<sub>2</sub> (bersifat asam) + alkali (basa)

## Teknik Pengendalian SO<sub>2</sub> Flue Gas Desulphurization (FGD)

SO<sub>x</sub> dapat dikendalikan dengan menggunakan teknik absorpsi yg disebut **Flue Gas Desulphurization (FGD)**

- **FGD dengan metode basah**
  - Penyerap (absorben) berupa larutan atau campuran padatan dan larutan (*slurry*) yang mengandung senyawa seperti Na, Ca, atau Mg yang direaksikan dengan SO<sub>2</sub>
    - Absorben batu kapur atau *limestone* (CaCO<sub>3</sub>) paling banyak digunakan karena harga batu kapur yang relatif murah, menghasilkan produk samping berupa padatan CaSO<sub>4</sub> (gypsum)
  - Biaya investasi serta operasi dan pemeliharaan relatif murah, kestabilan dan keamanan sistem operasi sangat baik
- **FGD metode kering**
  - Absorben padatan kering
  - Absorben padatan basah (dengan kondisi: air akan menguap saat diinjeksikan)
  - memiliki kapasitas adsorpsi yang terbatas, sehingga jika kapasitas adsorpsi sudah terlampaui maka adsorben akan mengalami kerusakan. Selain itu dapat terjadi penyumbatan pada permukaan adsorben jika gas yang diolah mengandung partikulat

## FGD Wet & Dry scrubber

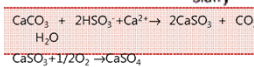
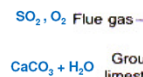
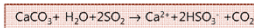
Metode FGD	Absorben	Reaksi	Produk sampingan
FGD Tipe Non Regenerasi			
Metode Basah	Limestone scrubbing $\text{CaCO}_3$ - slurry	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HSO}_3^- + \text{CO}_2$ $\text{CaCO}_3 + 2\text{HSO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow 2\text{CaSO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CaSO}_3 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$	$\text{CaSO}_4$
	Lime scrubbing $\text{CaO}$ - slurry	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ $\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_3$ , $\text{CaSO}_4$
	Dual alkaly Larutan $\text{NaOH}$ atau $\text{Na}_2\text{SO}_3$	$2\text{NaOH} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow 2\text{NaHSO}_3$	$\text{Na}_2\text{SO}_3$ , $\text{Na}_2\text{SO}_4$
	$\text{Mg(OH)}_2$ - slurry	$\text{Mg(OH)}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MgSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Mg(OH)}_2 + 2\text{SO}_2 \rightarrow \text{Mg(HSO}_3)_2$ Reaksi pada tangki oksidasi $\text{MgSO}_3 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{MgSO}_4$ $\text{Mg(HSO}_3)_2 + \text{Mg(OH)}_2 \rightarrow 2\text{MgSO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgSO}_3$ , $\text{MgSO}_4$
	$\text{NH}_3$ dan air	$2\text{NH}_4\text{OH} + \text{SO}_2 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4\text{HSO}_3 + \text{H}_2$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Metode Kering	Lime Spray Drying Bubuk $\text{CaO}$ dan $\text{CaCO}_3$		$\text{CaSO}_3$ , $\text{CaSO}_4$
	$\text{NaOH}$ Scrubbing		$\text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{Na}_2\text{CO}_3$

## FGD Wet & Dry scrubber

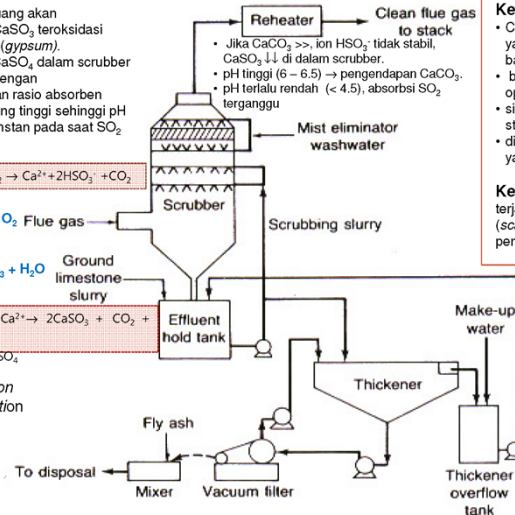
Metode FGD	Absorben	Reaksi	Produk sampingan
FGD Tipe Regenerasi			
Metode Basah	Wellman-Lord (W-L) Process	$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3$ $\text{Na}_2\text{SO}_3 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$ $2\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{NaHSO}_3$ $2\text{NaHSO}_3 + \text{panas} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{CO}_2$	
	$\text{Mg(OH)}_2$ slurry		$\text{MgSO}_3$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$
Metode Kering	Karbon Aktif	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4$
	$\text{CuO}$		

## Wet scrubber (limestone)

- O<sub>2</sub> pada gas buang akan menyebabkan CaSO<sub>3</sub> teroksidasi menjadi CaSO<sub>4</sub> (*gypsum*).
- Pengendapan CaSO<sub>4</sub> dalam scrubber dapat dicegah dengan mempertahankan rasio absorben terhadap gas yang tinggi sehingga pH larutan tetap konstan pada saat SO<sub>2</sub> diserap



- forced oxidation
- inhibited oxidation



FGD Non Regenerasi, Metode Basah, Limestone Scrubber, CaCO<sub>3</sub> - slurry (Sumber: Hogetsu, 2005)

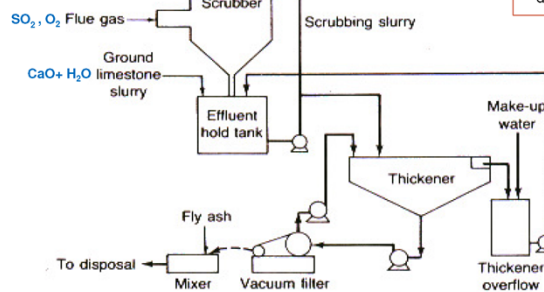
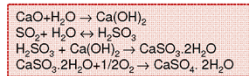
### Kelebihan

- CaCO<sub>3</sub> (absorben) yang murah dan banyak tersedia.
- biaya investasi dan operasi relatif murah,
- sistem yang cukup stabil
- dihasilkan gypsum yang bernilai ekonomis.

### Kekurangan

- terjadinya pengendapan (*scaling*) pada tower, penyumbatan, dan korosi

## Wet scrubber (Lime)



FGD Non Regenerasi, Metode Basah, Lime Scrubber, CaO slurry (Sumber: Hogetsu, 2005)

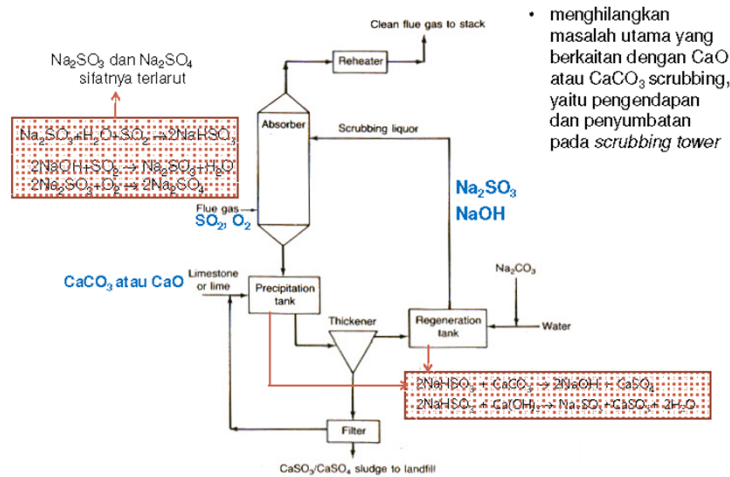
### Kelebihan

- CaO yang lebih reaktif bereaksi dengan SO<sub>2</sub> serta fleksibilitas dari operasi

### Kekurangan

- harga CaO yang lebih mahal daripada CaCO<sub>3</sub>.

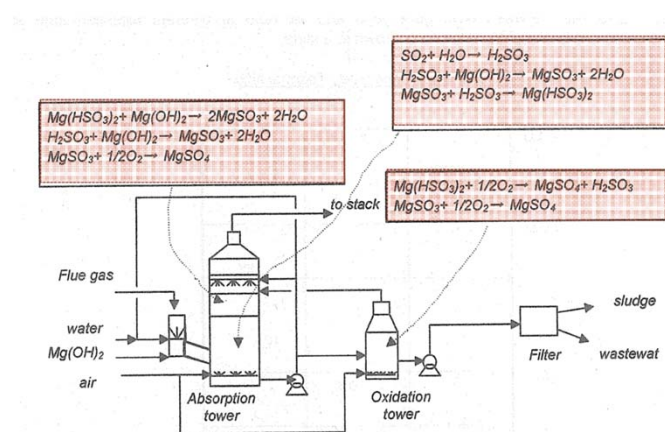
## Wet scrubber (Dual Alkali, CaO & Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)



- menghilangkan masalah utama yang berkaitan dengan CaO atau CaCO<sub>3</sub> scrubbing, yaitu pengendapan dan penyumbatan pada scrubbing tower

FGD Non Regenerasi, Metode Basah, Dual Alkali (Sumber: Hogetsu, 2005)

## Wet Scrubber (Mg(OH)<sub>2</sub>)



FGD Non Regenerasi, Metode Basah, Mg(OH)<sub>2</sub> Scrubber (Sumber: Hogetsu, 2005)



## Semi dry scrubber (Lime/Limestone)

CaO atau  $\text{CaCO}_3$  diinjeksikan dlm kondisi basah atau kering -> terbentuk  $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$ .

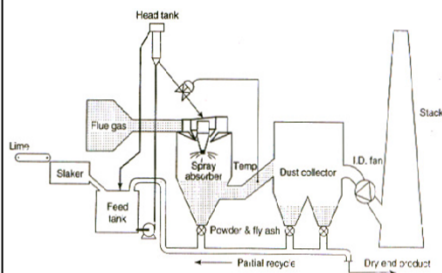
- **injeksi basah (slurry)**, rasio *slurry/gas* → air akan menguap sebelum mencapai dasar kolom.
  - Padatan kering dikumpulkan di dalam baghouse
- **Injeksi langsung bubuk CaO dan  $\text{CaCO}_3$  kering**
  - penyerapan secara kering
  - partikel padat dikumpulkan dalam baghouse.
  - Penyerapan  $\text{SO}_2$  terjadi pada saat aliran gas melewati lapisan padatan yang tertahan pada bag house.
  - Kekurangan: dibutuhkan reagen dalam jumlah banyak, karena hanya permukaan padatan yang bereaksi dengan  $\text{SO}_2$ .
  - Kekurangan ini dapat diatasi dengan memperkecil ukuran dari partikel absorber.

### • Kelebihan

- pemeliharaan yang lebih mudah,
- pemakaian energi yang rendah,
- biaya investasi dan operasi yang rendah.

### • kekurangan

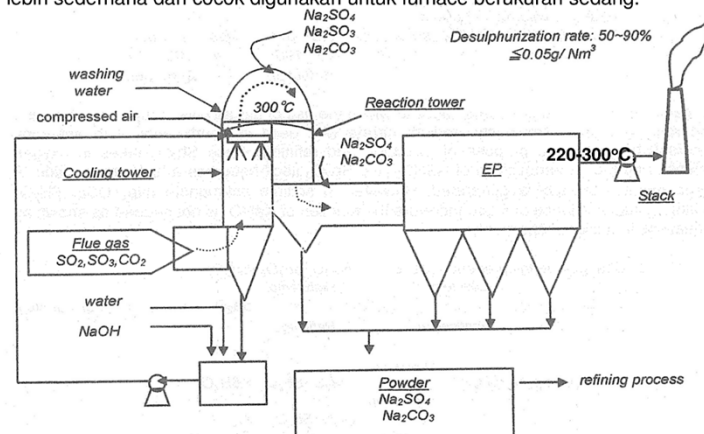
- potensi kerusakan pada baghouse jika temperatur mencapai *dew point*.



FGD Non Regenerasi, Metode kering, Lime/Limestone scrubbing, (Sumber: Hogetsu, 2005)

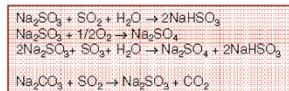
## Dry scrubber (NaOH)

- $\eta$  penyerapan  $\text{SO}_2$  dgn metode kering < metode basah, tetapi metode kering lebih sederhana dan cocok digunakan untuk furnace berukuran sedang.



FGD Non Regenerasi, Metode kering, NaOH Scrubbing (Sumber: Hogetsu, 2005)

## Wet scrubber (regenerasi dg $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

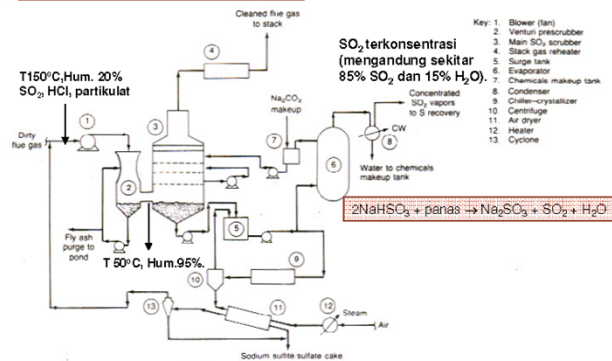


### • Kelebihan

- dihasilkan elemen sulfur atau asam sulfat yang bernilai ekonomis,

### • kekurangan

- biaya investasi dan operasi yang jauh lebih tinggi daripada sistem non regeneratif seperti menggunakan *limestone scrubbing*.



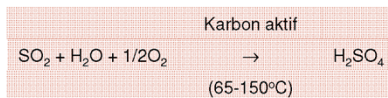
FGD Regenerasi, Metode Basah, Wellman-Lord (W-L) Process (Sumber: Hogetsu, 2005)

## FGD Regenerasi, Metode Basah, MgO scrubbing

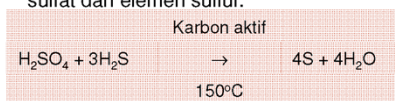
- MgO sebagai absorben dan menghasilkan padatan  $\text{MgSO}_3/\text{MgSO}_4$
- Padatan yang terbentuk dapat dikalsinasi (dibakar bersama kokas atau reduktor lainnya), menghasilkan  $\text{SO}_2$  dan meregenerasi MgO
- Keuntungan: sedikit dihasilkan limbah padat
- Kekurangannya:
  - dibutuhkannya proses kalsinasi pada suhu tinggi
  - $\text{SO}_2$  yang dihasilkan adalah sekitar 15% yang hanya dapat digunakan untuk membuat asam sulfat

## FGD Regenerasi, Metode Kering Karbon Aktif dan CuO Adsorben

- karbon aktif sebagai adsorben



- $\text{SO}_2$  yang terserap dapat diregenerasi dengan air sehingga dihasilkan asam sulfat dan elemen sulfur.

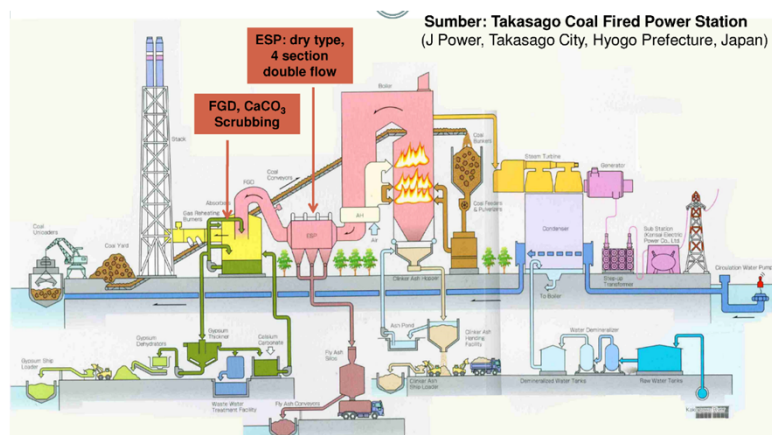


- Pada *bed* selanjutnya, temperatur dinaikkan untuk menguapkan dan mendapat kembali sekitar 1/4 sulfur, sedangkan sisanya direaksikan dengan hidrogen untuk menghasilkan  $\text{H}_2\text{S}$  yang dibutuhkan dalam reaksi. Karbon yang sudah diregenerasi kemudian dikembalikan ke awal proses.

- CuO sebagai adsorben

- $\text{NO}_x$  juga dapat sekaligus disisihkan bersamaan dengan cara menginjeksikan ammonia ( $\text{NH}_3$ ) ke dalam aliran gas buang.
- Adsorpsi berlangsung pada suhu tinggi sekitar 400°C untuk membentuk  $\text{CuSO}_4$ .
- Adsorben dapat diregenerasi menggunakan gas reduktor seperti  $\text{H}_2$  atau  $\text{H}_2 + \text{CO}$  untuk menghasilkan  $\text{SO}_2$  terkonsentrasi.
- Pada saat regenerasi berlangsung, adsorben direduksi menjadi Cu, kemudian dioksidasi menjadi CuO.

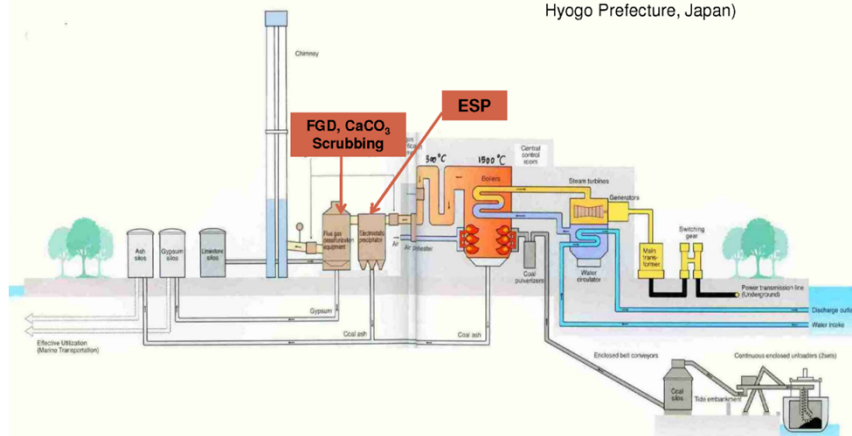
## Studi Kasus Pengendalian $\text{SO}_x$ PLTU Batubara



## Studi Kasus

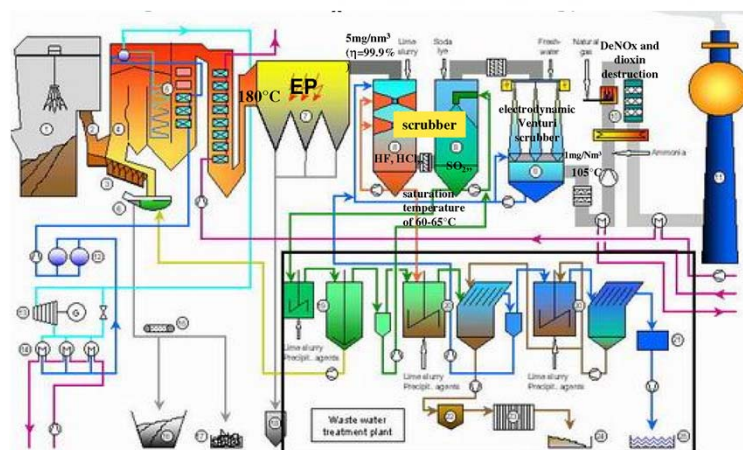
### Pengendalian SO<sub>x</sub> PLTU Batubara

**Sumber: Shinko Kobe Power Station** (Kobe, Hyogo Prefecture, Japan)



## Studi Kasus

### Pengendalian SOx Waste to Energy Plant

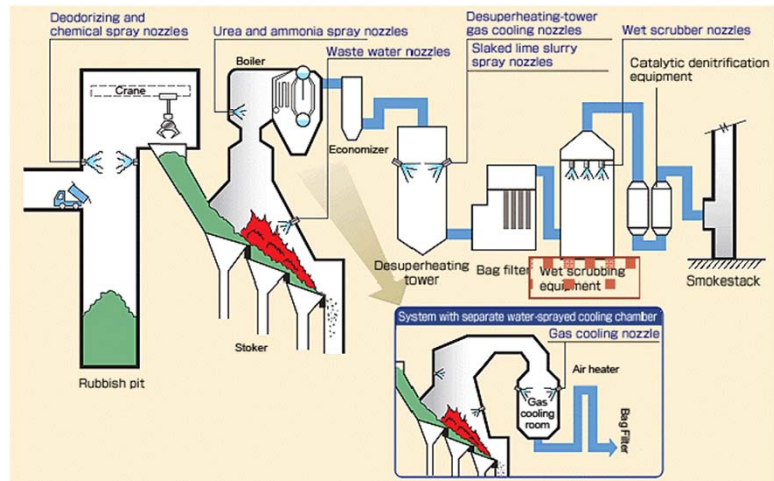


**Spittelau Plant, Vienna, Austria**

Sumber: <http://www.gym-hartberg.ac.at/gym/gwk/Fba/spittelau/spittelau.htm>

## Studi Kasus

### Pengendalian SO<sub>x</sub> Insinerator Rumah Sakit



## PENGENDALIAN NO<sub>x</sub>

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx)

### ■ NOx

#### – Fuel NOx:

- NOx yang terbentuk dari hasil reaksi antara nitrogen (N) yang terdapat dalam bahan bakar dengan oksigen pada temperatur Tinggi

#### – Thermal NOx:

- NOx yang terbentuk dari hasil reaksi antara  $N_2$  dan  $O_2$  pada suhu tinggi dalam ruang bakar

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) Modifikasi Pembakaran

### ■ Modifikasi pembakaran untuk mengurangi atau mencegah terbentuknya NOx

- *Flue gas recirculation* dilakukan dengan mereduksi *peak flame* temperatur dan jumlah oksigen untuk mengurangi NOx yang terbentuk
- Low NOx burner didisain untuk membakar bahan bakar dengan menggunakan excess air yang rendah
- *Staged combustion* digunakan untuk mereduksi temperatur puncak



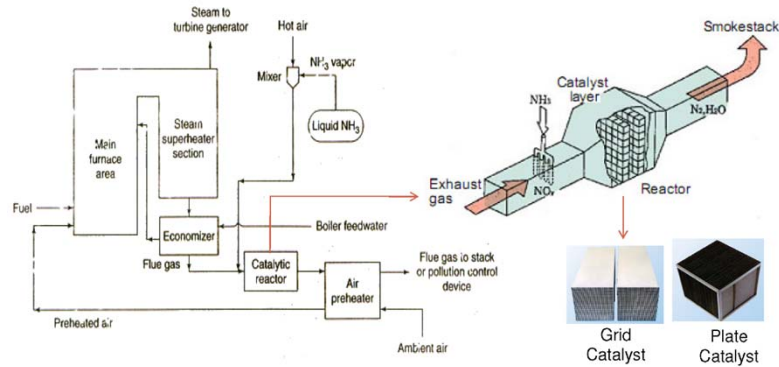
## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) Konversi NOx -> N<sub>2</sub>

- Mengendalikan NOx yang telah terbentuk dengan cara mengkonversikannya menjadi N<sub>2</sub>
  - *Selective Catalytic Reduction (SCR)*
  - *Selective non Catalytic Reduction (SNCR)*
  - *Non Selective Catalytic Reduction (NSCR)*
  - *Catalytic cracking*

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) *Selective Catalytic Reduction (SCR)*

- Merubah NOx menjadi N<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O menggunakan NH<sub>3</sub> dan Katalis
  - Katalis : TiO<sub>2</sub> dgn penambahan Vanadium (V) dan Tungsten (W)
  - Reaksi :  $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- Temperatur operasi:
  - T optimum: 350 °C
  - T < 350 °C : SO<sub>3</sub> bereaksi dgn NH<sub>3</sub> membentuk NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> , menutupi permukaan katalis, menurunkan kemampuan katalis untuk menyisihkan NOx
  - T 350-400 °C, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> dapat terurai, penyisihan NOx dapat meningkat
  - T > 400 °C, NH<sub>3</sub> dapat teroksidasi sehingga penyisihan NOx berkurang
- Gangguan:
  - Partikulat diatasi dgn memakai katalis bentuk pelat atau grid
  - Kebocoran NH<sub>3</sub> -> SO<sub>3</sub> akan bereaksi dengan NH<sub>3</sub> membentuk NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> dan menyumbat aliran pipa (maka NH<sub>3</sub> yg keluar dr unit dipertahankan R 5 ppm)
- Aplikasi
  - Cocok digunakan untuk mengolah volume udara yang besar
  - Pada PLTU batubara reduksi NOx mencapai 80-90%.

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) *Selective Catalytic Reduction (SCR)*

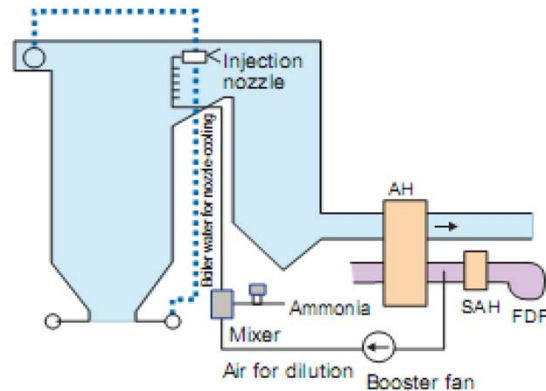


Sumber: <http://www.brain-c-jcoal.info>

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) *Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)*

- Merubah NOx menjadi  $\text{N}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  tanpa katalis
  - Reaksi:  $\text{NH}_3$  diinjeksikan ke dalam bagian boiler dimana temperatur mencapai  $850\text{-}900^\circ\text{C}$  untuk mengubah NOx menjadi  $\text{N}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  tanpa menggunakan katalis.
  - Kelebihan:
    - Tidak diperlukannya katalis
    - biaya investasi rendah
  - Kekurangan:
    - efisiensi penyisihan NOx sekitar 40%
    - Selain itu, lebih banyak  $\text{NH}_3$  yang dapat lolos terbawa aliran gas daripada metode SCR
  - Aplikasi
    - digunakan pada boiler kecil dan insinerator

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) *Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)*



Sumber: <http://www.brain-c-jcoal.info>

## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) *Non Selective Catalytic Reduction (NSCR)*

- merubah NOx, CO dan HC (dikenal three way catalyst) menjadi N<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O
  - Katalis: logam mulia seperti platina (Pt), dan HC, CO atau H<sub>2</sub> sebagai *reducing agent*

Step 1 Reactions:

$$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$$

$$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$$

$$\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

Step 2 Reactions:

$$\text{NO}_x + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{N}_2$$

$$\text{NO}_x + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$$

$$\text{NO}_x + \text{HC} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$$
- Aplikasi:
  - Proses ini sulit diaplikasikan untuk volume udara yang besar dengan konsentrasi NOx yang rendah. Excess O<sub>2</sub> max 0,5% (hanya cocok utk nat gas), Eff ~90%.
  - Temp operasi gas buang 375-650 °C.
- *Catalytic cracking process* menggunakan logam mulia pada suhu sekitar 450°C.
  - Regenerasi catalyst dari coke yg nempel adalah melalui oksidasi sehingga emisi Nox cenderung tinggi. Low excess air <0,5% dan Low Nox catalyst digunakan pada catalyst regenerator agar proses pemurnian catalyst mengemisikan Nox lebih rendah

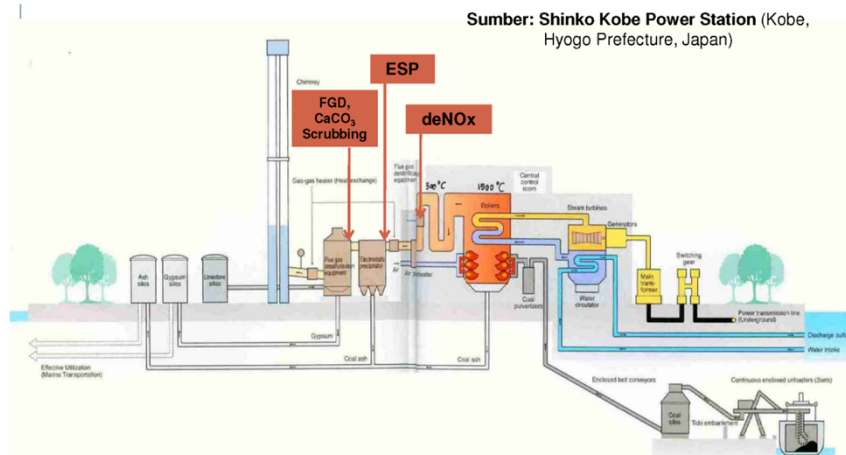
## Teknik Pengendalian NOx (DeNOx) Metode Absorpsi

- Absorben
  - NaOH dan  $\text{KMnO}_4$
- Reaksi :
  - $\text{KMnO}_4$  mengkonversikan NO dengan cepat menjadi  $\text{NO}_2$ , sehingga memungkinkan untuk diabsorb oleh NaOH
- Kekurangan:
  - Proses ini memerlukan regenerasi  $\text{KMnO}_4$  secara elektrokimia yang sangat mahal
- Aplikasi:
  - Pada industri kecil (misal industri kecil pembuat asam nitrat)
  - sangat tidak cocok untuk mengolah NOx dalam jumlah yang besar

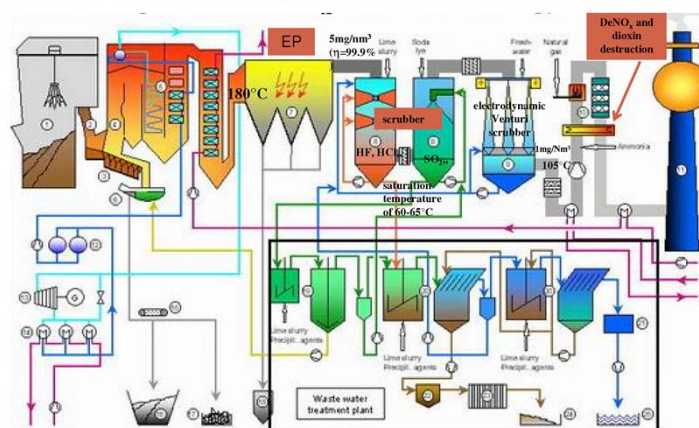
## Resume NOx control

Metode	Jenis NO <sub>x</sub> yang dikendalikan	Tingkat Penyisihan NO <sub>x</sub> (%)
Selective catalytic reduction (SCR) <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diinjeksikan <math>\text{NH}_3</math>,</li> <li>▪ Katalis: logam,</li> <li>▪ Bahan penyangga katalis: keramik (<math>\text{TiO}</math> dgn penambahan Vanadium (V), Tungsten (W) dll)</li> <li>▪ Bentuk: granul, honeycomb, pelat</li> <li>▪ Temperatur optimum 300-400°C</li> <li>▪ Reaksi:  <math>4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}</math>  <math>2\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}</math> </li> <li>▪ Proses sederhana, mudah dioperasikan, tidak dihasilkan limbah, tidak terdapat produk samping</li> </ul>	Fuel NO <sub>x</sub> , Thermal NO <sub>x</sub>	80-90
Selective non catalytic reduction (NSCR)	$\text{NH}_3$ , temperature antara 800-1000°C	Fuel NO <sub>x</sub> , Thermal NO <sub>x</sub>
Non selective catalytic reduction (NSNCR)	Katalis: Pt + $\text{CH}_4$ , atau CO, atau $\text{H}_2$	Fuel NO <sub>x</sub> , Thermal NO <sub>x</sub>
Catalytic cracking	Katalis: Pt	Fuel NO <sub>x</sub> , Thermal NO <sub>x</sub>

## Pengendalian NOx PLTU Batubara



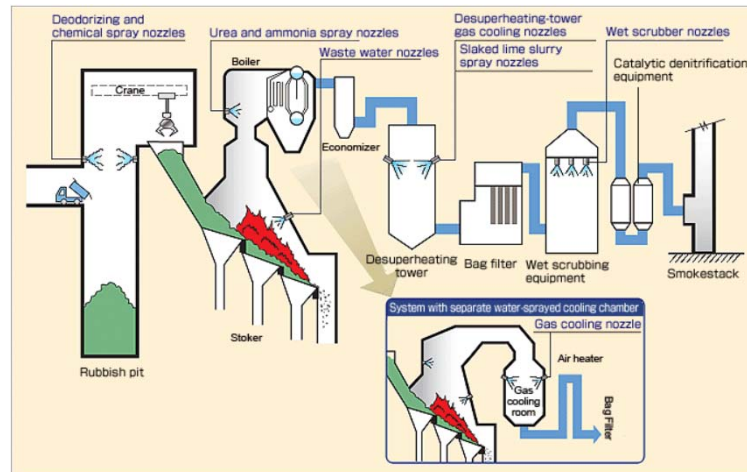
## Pengendalian NOx Waste to Energy Plant



Spittelau Plant, Vienna, Austria

Sumber: <http://www.gym-hartberg.ac.at/gym/gwk/Fba/spittelau/spittelau.htm>

## Pengendalian NOx Insinerator Rumah Sakit



## PENGENDALIAN GAS-GAS LAINNYA



## Senyawa Berbau (Odor)

- Odor merupakan suatu senyawa yang bersifat *volatile* atau mudah menguap, sehingga sebagian molekulnya secara terus menerus menguap ke udara dan dengan mudah terdeteksi oleh indera pencium
- Bau/Odor diemisikan dalam bentuk gas anorganik seperti  $\text{H}_2\text{S}$  dan  $\text{NH}_3$ , serta dapat diemisikan dalam bentuk organik seperti metil merkaptan
- Senyawa-senyawa sulfur tereduksi seperti merkaptans, organik sulfida, adalah yang paling berbau

## Teknik Pengendalian Odor

- Metode kondensasi
- Metode kombusi menggunakan insinerator dan afterburner, metode ini efektif pada suhu tertentu dan waktu tinggal tertentu yang dapat membakar VOC secara sempurna
- Metode absorpsi menggunakan senyawa kimia seperti natrium hipoklorit dan klorin oksida lebih efektif mengabsorb bau daripada  $\text{NaOH}$  dan  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- Metode adsorpsi menggunakan adsorber karbon aktif

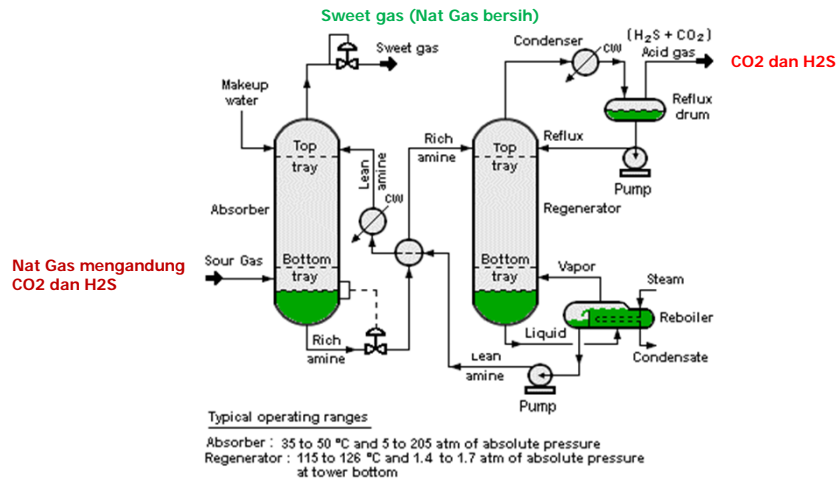
## Teknik Pengendalian H<sub>2</sub>S Metode Absorpsi, *Scrubber*

- Scrubber atau absorber
  - T operasi: 30-50°C
  - P operasi: 5-200 atm
  - Regenerator beroperasi pada T lebih tinggi sekitar 118-130°C dengan tekanan sekitar 1,4-1,7 atm
  - Aplikasi : Pemurnian gas alam dari CO<sub>2</sub> (problem CV rendah) dan H<sub>2</sub>S (problem korosi)
- Absorben: senyawa amin
  - Diethanolamine (DEA)
  - Monotethanolamine (MEA)
  - Methyldiethanolamine (MDEA)
- Reaksi
  - amin bersifat basa, H<sub>2</sub>S asam lemah, terjadi reaksi asam basa membentuk garam :  $2R_2NH + H_2S + H_2S \rightleftharpoons (R_2NH_2)_2S + \text{panas}$

## Teknik Pengendalian H<sub>2</sub>S Metode Absorpsi, *Scrubber*

- Gangguan:
  - Selain H<sub>2</sub>S, biasanya dalam aliran gas terdapat gas yang bersifat asam lainnya yaitu CO<sub>2</sub> yang juga dapat bereaksi dengan amin seperti halnya H<sub>2</sub>S
- Regenerasi
  - CO<sub>2</sub> dapat diregenerasi di stripper tower (regenerator) dimana terjadi pemanasan sehingga gas yang bersifat asam (H<sub>2</sub>S atau CO<sub>2</sub>) dapat terlepas ikatannya
  - Senyawa amin yang telah diregenerasi didinginkan dan kembali digunakan di *scrubber tower*

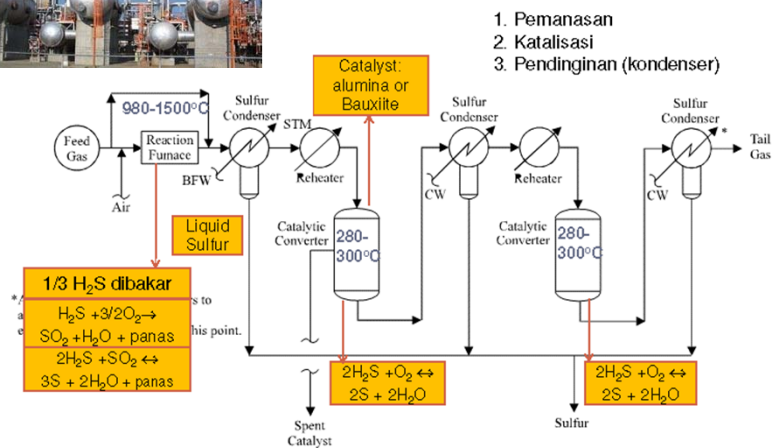
## Teknik Pengendalian H<sub>2</sub>S Metode Absorpsi, *Scrubber*



## Teknik Pengendalian H<sub>2</sub>S Metode Absorpsi, Sulfur Recovery

- Sulfur recovery unit (SRU)
  - Reaksi Claus dengan produk akhir : unsur Sulfur (S) berbentuk padatan.
  - Recovery rate sulfur 95-97%
- Process
  - 1/3 H<sub>2</sub>S dibakar pada reaction furnace dengan udara (O<sub>2</sub>) untuk membentuk SO<sub>2</sub> pada suhu yang tinggi yaitu 980-1500°C, dengan reaksi sebagai berikut :
    - $\text{H}_2\text{S} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{panas}$
  - Gas SO<sub>2</sub> yang dihasilkan bereaksi dengan sisa H<sub>2</sub>S untuk membentuk elemen sulfur (S) yang berlangsung pada condenser sulfur dengan bantuan katalis alumina, reaksi berlangsung pada suhu 200-300°C sebagai berikut:
    - $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \leftrightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{panas}$

## Teknik Pengendalian H<sub>2</sub>S Metode Absorpsi, Sulfur Recovery



## Teknik Pengendalian VOC

- VOC terdiri dari hidrokarbon murni, hidrokarbon teroksidasi (asam organik, aldehid, keton), dan senyawa organik yang mengandung klorin, sulfur, nitrogen, atau atom lainnya
- VOC diemisikan dari proses pembakaran berbagai proses industri
- VOC dapat dikendalikan dengan menggunakan insinerator, disebut juga *thermal oxidizer* atau *afterburner*

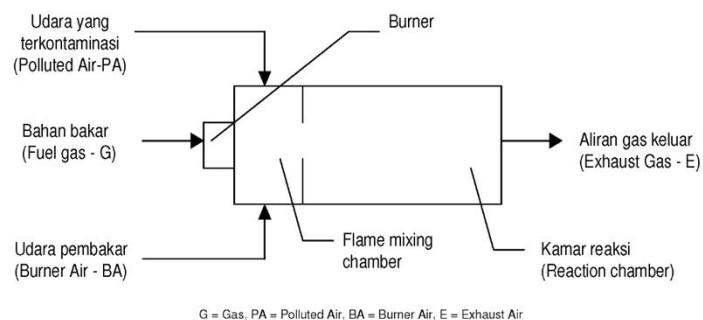
## Teknik Pengendalian VOC

### Unit Pembakaran: Thermal Oxidizer/Afterburner

- Disain thermal oxidizer atau afterburner
  - menentukan temperatur operasi, waktu tinggal, kecepatan alir gas, dan penentuan ukuran kamar pembakaran
  - Pemilihan peralatan bergantung kepada operasi apakah kontinu atau intermittent, kandungan oksigen, dan konsentrasi VOC
  - Diusahakan untuk mempertahankan aliran udara serendah mungkin
  - Maksimum konsentrasi VOC dalam aliran gas adalah 25% dari nilai LELnya. Di industri biasanya aliran VOC sekitar 5% atau kurang dari LEL
  - Dalam mendisain thermal oxidizer perhitungan kesetimbangan massa dilakukan untuk menghitung laju alir bahan bakar yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur udara pada laju alir gas tertentu

## Teknik Pengendalian VOC

### Unit Pembakaran: Thermal Oxidizer / Afterburner



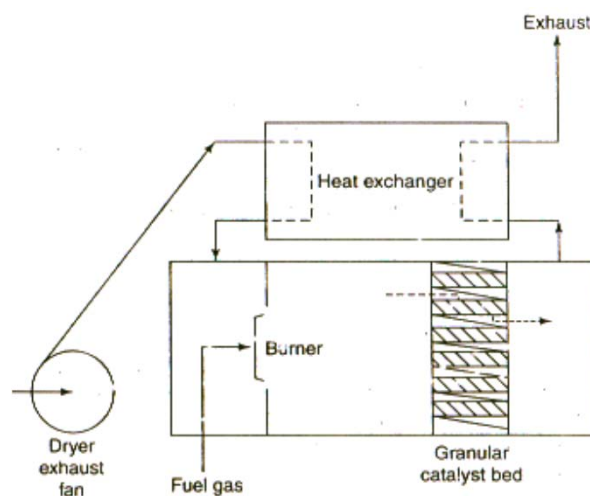
## Teknik Pengendalian VOC

### Unit Pembakaran: Catalytic Oxidizer

- Catalytic oxidizer dapat mereduksi temperatur yang dibutuhkan sampai beberapa ratus derajat dan dapat menghemat ukuran burner dibandingkan dengan thermal oxidizer
- Seperti dalam thermal oxidizer, gas dipanaskan dalam kamar reaksi pada temperatur yang jauh lebih rendah, kemudian dilewatkan ke permukaan katalis
- Katalis biasanya berupa logam mulia seperti platina, juga dapat digunakan logam lain seperti Cr, Mn, Cu, Co, dan Ni. Logam tersebut diletakkan pada penyangga yang terbuat dari aluminium
- Laju oksidasi gas oleh katalis tergantung pada laju transfer massa (difusi VOC pada permukaan katalis) dan laju reaksi oksidasi oleh katalis. Pada temperatur yang rendah (dibawah  $260^{\circ}\text{C}$ ), laju reaksi kimia menentukan laju proses, sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi transfer massa menjadi faktor penentu

## Teknik Pengendalian VOC

### Unit Pembakaran: Catalytic Oxidizer





## Teknik Pengendalian VOC Unit Pembakaran: Flare

- Flare:
  - Umumnya digunakan sebagai *safely venting system* selama terjadi emergency yang disebut *emergeney relief system*
  - Banyak valve yang menuju pada satu sistem pengumpul
  - Didisain dengan pipa-pipa yang besar sehingga dapat menanangi volume yang besar pada tekanan yang rendah
  - Bagian paling atas dari sebuah flare dinamakan flare tip, desain Flare hampir 90% terfokus pada flaret tip
- *Flare tip* diantaranya terdiri dari:
  - *Ignition System*: proses penyalaan awal Flare Tip
  - *Pilot Gas*: pensuplai gas awal
  - *Air Lock Seal*: antisipasi adanya oksigen masuk ke Flare Tip (mencegah kebakaran)
  - *Flame arrestor*: ghindari terjadinya ledakan di dalam *Flare Stack*

