

PENGURANGAN EMISI CO₂ PADA GAS BUANG BOILER DENGAN TEKNOLOGI ABSORPSI MELALUI MEMBRAN SERAT BERPORI

CO₂ EMISSION REDUCTION OF EXHAUST GAS BOILER BY ABSORPTION TECHNOLOGY THROUGH FIBER POROUS MEMBRANE

Nani Harihastuti, I Nyoman Widiasa, Silvy Djayanti, Didik Harsono, Ikha Rasti Julia Sari.
(Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri Semarang),
nanisoeharto@yahoo.com.

ABSTRAK

Dalam upaya mengurangi terbentuknya gas CO₂ yang bersumber dari emisi cerobong boiler di Industri, telah diteliti daya absorpsi gas CO₂ menggunakan kontaktor membrane serat berpori atau *hollow fiber membrane modules (HFMM)* dengan pembasah cair (NaOH). Metode baru penyerapan gas ini merupakan pengembangan inovasi untuk meningkatkan efisiensi penyerapan, dibanding cara konvensional (*Packed Tower, Spray Tower, Ventury Scrubber ataupun plate coloum*).

Penelitian diawali dengan merancang *prototype absorber* yang didisain dengan menggunakan kontaktor membrane. Membrane yang digunakan jenis polypropylene dengan porositas 0,85, diameter pori 0,1 µm, ketebalan 150 µm, panjang 100 cm dan ID fibre 0,5 mm. Kemudian dilakukan uji coba karakteristik dan proses pada rangkaian prototipe alat, pada proses absorpsi gas buang boiler berbahan bakar batu bara di Industri Tekstil. Variabel yang diteliti adalah laju alir gas (2-10 lt/men), konsentrasi larutan pembasah NaOH (2,5 – 10 %) dan waktu kontak (5-35 menit). Laju alir larutan NaOH diatur tetap dengan kecepatan 1lt/menit dan volume larutan NaOH dipertahankan tetap 10 liter.

Hasil penelitian diperoleh bahwa daya absorpsi optimum gas CO₂ yang dihitung berdasar perpindahan massa dan hidrodinamika cairan basa di dalam kontaktor membrane serat berpori adalah sebagai berikut : Daya serap gas CO₂ (flux) maksimum 0,23 mol CO₂ per m² luas membran perdetik yang diperoleh pada laju alir gas CO₂ 5 lt / menit, dengan konsentrasi larutan NaOH 2,5 % dan waktu kontak 15 menit.

Kata kunci : membrane serat berpori, pengurangan CO₂ boiler

ABSTRACT

In an effort to reduce the formation of CO₂ gas that comes from gas emissions stack boiler in industry, has been investigated using the CO₂ absorption capacity of the membrane contactor porous fibers or hollow fiber membrane modules HFMM) with a wetting liquid (NaOH). New methods of gas absorption is the development of innovations to improve the efficiency of absorption, compared to the conventional method (Packed Tower, Spray Tower, Scrubber Ventury or Plate Coloum).

The research begun by designing a prototype absorber designed using membrane contacters. Used types of polypropylene membrane with a porosity of 0.85, pores diameter 0.1 µm, thickness 150 µm, 100 cm length and 0.5 mm ID fiber. Then do the test on the circuit characteristics and the process of prototype devices, the absorption process the flue gas of coal-fired boilers in Textile Industry. The variables studied were gas flow rate (20-10 lt / download), the concentration of wetting solution of NaOH (2.5 - 10%) and contact time (5-35 minutes). NaOH flow rate remains governed by the speed and volume of NaOH solution 1lt/menit retained 10 liters.

Results showed that the optimum CO₂ absorption capacity which is calculated based on mass transfer and hydrodynamics of liquid bases in porous fiber membrane contactors are as follows: The power of CO₂ absorption (flux) 0.23 maximum. mole of CO₂ per m² of membrane area per second is obtained at a flow rate of CO₂ 5 lt / min, with 2.5% NaOH concentration and contact time 15 minutes.

Keywords: fiber porous membrane, the reduction of CO₂

PENDAHULUAN

Boiler adalah salah satu peralatan di industri yang pada operasionalnya selain menghasilkan *steam* juga di emisikan gas buang yang mengandung gas-gas SO₂, NO₂, CO, CO₂, hidrokarbon dan *fly ash*. Kandungan tertinggi

dari gas hasil pembakaran tersebut adalah gas Karbon Dioksida (CO₂). Gas ini sangat berpotensi dalam pembentukan gas rumah kaca (GHG) yang berkontribusi pada terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim. Peningkatan jumlah karbon dioksida ini terutama disebabkan oleh penggunaan bahan

bakar fosil yang memproduksi sekitar 24 milyar ton CO₂ per tahun, dan hanya setengahnya (50%) yang dapat diabsorb oleh proses alam. (*Protokol Kyoto, 1997*)

Secara konvensional, proses penghilangan CO₂ di industri berskala besar biasanya dilakukan dengan proses gas absorpsi. Campuran gas tersebut di-kontakkan dengan pelarut absorben didalam alat *absorber*. Absorpsi gas dilakukan menggunakan alat-alat seperti : *packed towers, disc contactors, venture towers, sieve-tray towers*, ataupun *scrubber bubble column, spray column* atau *venturi scrubbers*. Dalam kolom konvensional ini, kontak antara fasa gas dan fasa cair terjadi secara langsung, sehingga memungkinkan terbentuknya dispersi antar fasa. Kelemahan yang terjadi dalam penggunaan cara konvensional, adalah apabila terjadi laju alir cairan dan gas dalam kolom satu arah (*cocurrent*), perpindahan massa yang terjadi tidak pernah mencapai kondisi kesetimbangan. Sebaliknya untuk laju alir yang berlawanan arah (*countercurrent*) seperti yang terjadi pada *packed towers* dan pada *sieve-tray towers* dapat terjadi peluapan (*flooding*) jika laju alir gas terlalu besar. Sedangkan jika laju alir gas terlalu kecil akan terjadi proses penumpukan (*loading*), (*cooney Jackson, 1987*)

Suatu metode yang sekarang banyak diteliti sebagai penyerap gas adalah penggunaan kontaktor gas-cair melalui membrane serat berpori atau *gas liquid hollow fiber membrane modules (HFMM)*. Banyak studi yang telah dilakukan dengan menggunakan teknologi membrane serat berpori sebagai kontaktor gas-cair untuk proses penyerapan gas ke dalam berbagai pelarut. Mereka telah mempublikasikan bahwa modul membrane serat berpori dapat menghasilkan *gas-liquid interfacial area* per unit volume yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan *packed coloumn*. Ini terjadi karena fluida yang mengalir didalam membran serat berpori selalu memenuhi pori-pori yang tersedia di dalam membrane tersebut, sehingga tidak akan ada penurunan *interfacial area* jika fluida yang mengalir sedikit, dan juga tidak akan terjadi *flooding phenomena* jika ada peningkatan laju alir gas yang besar. (*Kartoharjono sutrasno, 2004*).

Pada penelitian-penelitian yang telah dilakukan, proses absorpsi gas karbon dioksida (CO₂) dengan menggunakan kontaktor membrane serat berpori, model gas yang diserap dalam keadaan murni dalam suhu kamar/dingin. (*Dortmund, 2006*). Hal ini akan menjadi kendala apabila di aplikasikan/diterapkan dilapangan. Banyak faktor-faktor yang belum diperhitungkan. Misalnya bagaimana kalau suhu gasnya tinggi, bagaimana kalau gasnya tidak murni satu jenis, tetapi merupakan gas campuran dan bagaimana kalau gasnya mengandung partikulat?

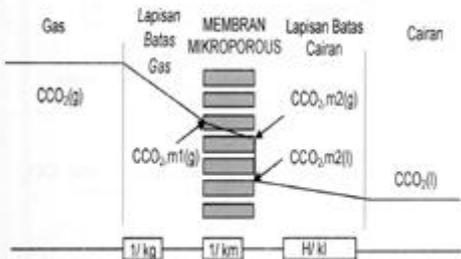
Dengan latar belakang tersebut diatas, maka dalam upaya mengendalikan terbuangnya gas CO₂ yang bersumber dari operasional boiler pada aktifitas industri, maka akan diteliti daya absorpsi gas CO₂ dengan menggunakan kontaktor membrane serat berpori dan pelarut pembasah NaOH, yang mana sumber CO₂ diambil langsung dari gas buang cerobong boiler. Penelitian ini belum pernah ada yang melakukan. Sejauh mana daya absorpsi yang akan dicapai sesuai dengan kondisi riil dilapangan.

Konsep Kontaktor Membran

Kontaktor membran adalah proses pemisahan menggunakan membran se-bagai alat kontak. Terdapat dua jenis kontaktor membran yaitu kontaktor membran gas-cair dan kontaktor membran cair-cair. Kontaktor membran yang digunakan untuk pengendalian emisi gas buang adalah kontaktor membran gas-cair. Kontaktor membran gas-cair dibagi menjadi 2 proses yaitu proses dimana gas atau uap berpindah dari fasa gas ke fasa cair, dan proses dimana gas atau uap berpindah dari fasa cair ke fasa gas (*Iversen, 1997*). Pada umumnya, membran yang digunakan dalam kontaktor membran gas cair adalah membran berpori (*microporous membrane*) dimana membran berfungsi sebagai pembatas antara dua fasa. Jika membran hidrofobik yang digunakan, maka cairan tidak akan membasahi pori sehingga pori akan diisi oleh gas (*non wetted membrane*). Sebaliknya jika digunakan membran hidrofilik maka cairan akan membasahi pori sehingga pori akan diisi oleh cairan (*wetted membrane*) (*Mulder, 1996*).

Proses perpindahan suatu molekul atau partikel di dalam membran disebabkan adanya gaya yang bekerja pada molekul atau partikel

tersebut. Pada proses kontak, gaya dorong yang terjadi disebabkan oleh adanya beda konsentrasi. Dalam kontaktor membran, jika komponen i berpindah dari fasa gas ke fasa cair, ada tiga tahap perpindahan yang harus dilalui yaitu perpindahan dari fasa gas ke membran, difusi melewati membran, diikuti dengan perpindahan dari membran ke fasa cair (Mulder, 1996). Daerah perpindahan massa dan tahanan kontaktor membran dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Daerah Perpindahan Massa dan Tahanan pada Kontaktor Membran

Karena ada tiga tahap perpindahan, maka fluks CO_2 pada kontaktor membran juga dibagi dalam tiga daerah perpindahan massa yaitu lapisan film gas, membran mikroporous, dan lapisan film sorben.

Sasaran kegiatan ini adalah untuk membuktikan paradigma bahwa membrane serat berpori sebagai kontaktor gas-cair pada proses absorpsi dengan pelarut basa (NaOH) mempunyai daya serap (flux) tinggi terhadap gas CO_2 yang bersumber dari gas buang boiler bila dibanding cara konvensional. Ada dua hal yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu studi perpindahan massa dan hidrodinamika cairan di dalam kontaktor membrane serat berpori yang digunakan. Hasil yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

Memperoleh suatu inovasi pengembangan teknologi untuk meningkatkan daya serap gas emisi CO_2 yang bersumber dari gas buang boiler.

Diperoleh percontohan satu unit prototype alat kontaktor membrane serat berpori untuk absorpsi gas CO_2 dari gas buang boiler, yang siap di publikasikan.

METODE PENELITIAN

Ruang Lingkup Penelitian

Didalam ruang lingkup penelitian ini batasan dari langkah / tahapan pelaksanaan penelitian, akan dijelaskan penggunaan bahan yang terkait dalam penelitian ini, antara lain kebutuhan komponen bahan, baik komponen bahan konstruksi, bahan kimia, mekanik, elektrik maupun komponen instrumen yang diperlukan dalam pembuatan prototype alat percobaan penelitian, kemudian penjelasan dalam hal metode/ cara penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Bahan Penelitian

Pada kegiatan penelitian ini digunakan bahan-bahan sebagai berikut : bahan-bahan konstruksi untuk pembuatan unit prototype absorber, bahan kimia untuk analisis gas emisi, bahan deteksi gas tube detector, gas-gas CO_2 , N_2 dalam tabung untuk uji karakteristik, membrane berpori (jenis keramik dan polypropylene), pipa tubing teflon, bag air sampler, komponen bahan rancangan instrumen : flow meter gas, panel kontrol, flowmeter air, pressure kontrol, thermo kontrol, valve.

2. Peralatan Penunjang Penelitian

Pada kegiatan penelitian ini digunakan peralatan sebagai berikut : pompa air, kompresor, genset.

Rancangan / Disain Riset

Rencana pelaksanaan penelitian ini dilakukan melalui tahapan/langkah-langkah sebagai berikut :

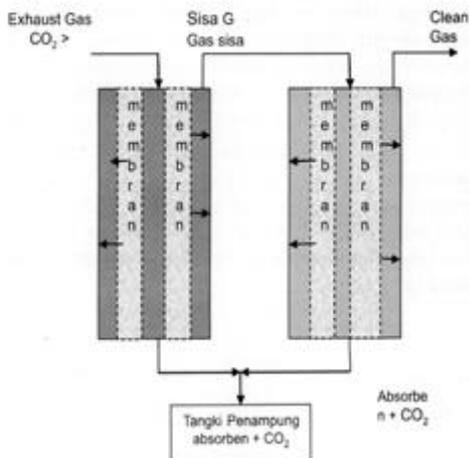
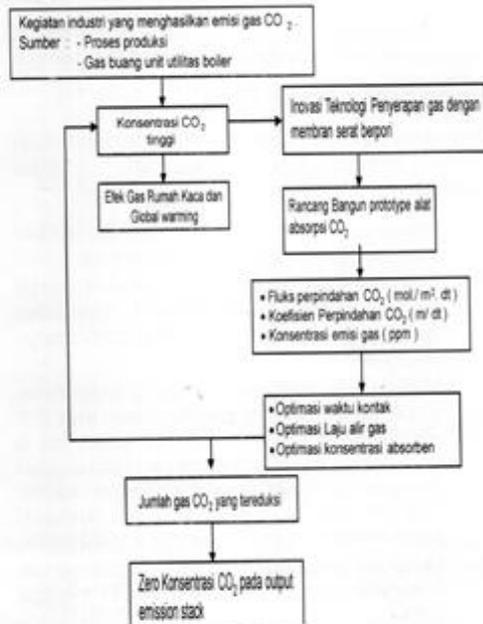
1. Merancang unit alat prototype absorber dan mengkonstruksi rancang-kaiannya
2. Menyiapkan membrane berpori untuk dipasang dalam konstruksi absorber (jenis membran keramik dan polypropylene)

Membrane serat berpori yang digunakan pada penelitian ini berdiameter luar 0,8 mm dengan ukuran pori 0,1 μm . Ada 3 buah kontaktor membrane yang digunakan dengan diameter selong-songnya sekitar 1,9 cm dan panjang 100 cm dengan jumlah serat dalam 1 modul ± 1000 helai.

3. Untuk uji perpindahan massa, pertama kali reservoir diisi air distilasi (pHH^7) hingga penuh.

4. Dialirkan gas CO₂ yang bersumber dari gas buang cerobong boiler terlebih dahulu selama ± 30 detik agar serat terisi campuran gas.
5. Setelah itu, larutan pembasah /absorben NaOH dialirkan ke dalam modul dengan kecepatan yang diinginkan (1 liter/menit).
6. Kecepatan aliran gas divariasikan dari 2-10 liter/menit
7. Sementara itu, untuk uji hidrodinamika, aliran masuk dan keluar modul dihubungkan dengan manometer digital untuk mengukur penurunan tekanan cairan yang terjadi selama melewati kontakor membrane serat berongga/berpori.
8. Koefisien perpindahan massa, K_L , K_G , $K_{m'}$, K_{OY} yang terjadi di dalam kontakor dihitung melalui persamaan perpindahan massa.
9. Fluks perpindahan massa CO₂ dihitung persatuan luas membrane persatuan waktu.
10. Menentukan/mengevaluasi daya absorpsi gas CO₂ dari hasil percobaan (kondisi otimum).

Diagram Alir Alur Pikir Penelitian



Gambar 3. Sketsa Rancangan pengurangan CO₂ dalam campuran Gas Buang Melalui Membran Serat Berpori

Uji Coba Prototype Alat

Dalam uji coba penelitian ini sebagai variabel tetap adalah jenis membran kontakor: hidrofobik polypropilen, mebrane kondisioning: membran keramik, larutan pembasah: NaOH, volume absorben: 10 liter, dan laju alir absorben: 1 liter/menit.

Sedangkan sebagai variabel berubah adalah waktu kontak: 5 - 35 menit, laju alir gas: 2-10 liter/menit dan konsentrasi NaOH: 2,5 - 10%

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Survey Lokasi Industri dan Hasil Analisa Gas Buang Emisi

Dalam pelaksanaan penelitian ini dibutuhkan lokasi di industri untuk ujicoba. Hasil penelitian yang diharapkan dapat menjawab kebutuhan industri akan pentingnya pengendalian pencemaran udara yang ditimbulkan dari emisi gas buang industri. Dalam hal ini utamanya adalah gas CO₂ yang menjadi isue terbesar penyebab gas rumah kaca yang berdampak pada terjadinya pemanasan global. Pencemaran udara sebagian besar bersumber dari unit utilitas operasional boiler dan genset, akibat proses pembakaran bahan bakar fosil, sehingga menghasilkan emisi gas yang mengandung partikulat serta suhu tinggi.

Pada penelitian ini dilakukan suatu pengembangan teknologi dengan memodifikasikan penyerapan emisi gas CO₂ dengan kontakor membran serat berpori menggunakan media pembasah basa NaOH.

Survey dilakukan untuk mencari lokasi uji coba penelitian. Survey dilakukan di Kota Solo, antara lain PT. Delta Merlin, PT. Safarie Junie, PT. Tyfountex, dan PT. Dan Liris. Dengan berbagai pertimbangan teknis, terpilih sebagai lokasi ujicoba adalah PT. Dan Liris dan PT. Tyfountex.

Pada awalnya, telah dilakukan analisa Gas buang emisi dari utilitas boiler di Industri. Rata-rata hasilnya masih mengandung partikel, dan polutan gas, terutama gas CO₂ yang cukup tinggi (12,5-18 %) yang disertai suhu tinggi sekitar 200 - 250°C. Selain hal tersebut gas buang juga bersifat korosif (mengandung gas-gas asam). Kondisi tersebut diatas menjadi dasar pertimbangan atau mendasari dalam pemilihan jenis bahan membran yang akan digunakan pada rancangan prototipe absorber. Membran yang digunakan ada 2 (dua) jenis, pertama membran keramik yang berfungsi sebagai membran kondisioning karena suhu gas tinggi dan mengandung partikel dan kedua digunakan membrane polipropilen yang berfungsi sebagai media kontakor antara gas dan absorben yang menimbulkan reaksi kimia pada proses absorpsinya. Bahan pembungkus (*housing*) membran menggunakan stainless

steel karena bahan logam ini bersifat tahan panas dan tahan korosi.

Uraian dan Evaluasi Hasil Analisis Gas Buang Emisi.

Dari hasil analisa gas emisi dari unit utilitas boiler di industri yang menggunakan bahan bakar minyak tersebut diatas, maka terlihat bahwa kandungan gas-gas lain (SO₂, NO₂, CO, HC) selain gas karbon dioksida (CO₂) juga ada, walaupun konsentrasinya rendah. Gas-gas ini merupakan gas asam, sehingga bersifat korosif. Hal ini yang mendasari pemilihan bahan membrane harus yang tahan korosi. Selain itu kandungan partikulat dalam gas emisi terlihat juga ada, walau konsentrasinya rendah, sehingga hal ini yang mendasari bahwa pada disain rangkaian sistem pada prototipe harus dilengkapi dengan penyaring atau dipasang filter. Demikian pula terlihat pada hasil analisa diatas bahwa suhu gas buang masih cukup tinggi, hal ini pula yang mendasari pemilihan bahan membran yang tahan terhadap suhu tinggi dan pada aliran sistem dilengkapi dengan unit alat pendingin untuk menurunkan suhu.

Kandungan gas karbon dioksida (CO₂) cukup tinggi, ini merupakan hasil pembakaran sempurna dari komponen hidrokarbon pada bahan bakar minyak. Gas ini yang akan direduksi melalui membran serat berpori sebelum diemisikan ke udara bebas.

Tabel 1: Hasil Analisa Gas Emisi Cerobong

NO	PARAMETER	SATUAN	HASIL PEMERIKSAAN GAS BUANG EMISI DI CEROBONG BOILER BAHAN BAKAR MINYAK DI INDUSTRI			BAKU MUTU EMISI SUMBER TIDAK BERGERAK BAGI KUTEL. UAP YANG MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR MINYAK (PERMEN. NEGLI NO. 07 TAHUN 2007)
			UJI 1	UJI 2	UJI 3	
1	Sulphur Dioksida (SO ₂)	mgr/Nm ³	175,58	391,35	263,57	700
2	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	mgr/Nm ³	18,86	10,71	53,69	700
3	Karbon Monoksida (CO)	mgr/Nm ³	21,36	22,90	27,48	—
4	Karbon Dioksida (CO ₂)	%	12,50	16,20	18,00	—
5	Total Partikel debu	mgr/Nm ³	30,79	34,21	84,26	200
6	Opasitas	%	1,0	1,5	9,0	15
7	Hidrokarbon	mgr/Nm ³	3,19	1,03	0,59	-
KONDISI FISIK						
1	Subu Gas Buang	°C	263	232	244	—
2	Tekanan Udara Luar	mm Hg	750	750	750	—
3	Suhu Udara Luar	°C	31	31	31	—

Sumber: data primer analisis BBTPTI, 2009

Spesifikasi pemilihan jenis membrane

a). Membran keramik, berfungsi untuk kondensising, menangkap partikel halus dan menurunkan suhu gas.

- Type : Turbuler, multi chanel
- Jumlah chanel : 19 chanel
- Pore size : 0,1 µm
- Material : AL₂O₃
- Dimensi modul : dia. 30mm x L.100 cm
- Diameter chanel : 4 mm
- Thickness : 1,5 - mm
- Specific area : 0,24 m²/ m

b). Housing Membrane Keramik, berfungsi untuk menurunkan suhu dan menyaring partikel yang lembut.

- Material : Stainless steel
- Dimensi : Dia 1,5"x L.110 cm
- Connection : Threaded 0,5"
- Max. Working press : 10 bar
- Finishing : Poles, clear

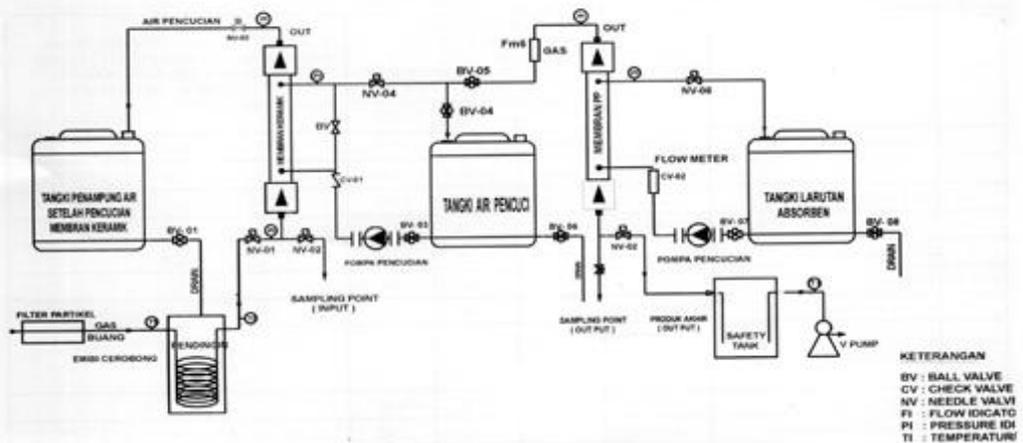
- Including : Seal o-ring silicon
- Test : Leakage test, pressure test

c). Membrane Poplypropylene (PP), berfungsi sebagai media kontaktor antara gas dan adsorben yang menimbulkan reaksi kimia pada proses absorpsinya

- Type : S-240
- Material housing : Stainless Steel
- Type membran : Hollow fiber
- Pore Size Dia : 0,1 µm
- ID Fibre : 0,5 m
- Porositas membran : 0,85
- Panjang membran : 100 cm
- Tickness membran : 150 µm
- Luas membrane : 2 m²
- Jumlah fiber dalam 1 modul : 000 helai
- Finishing Housing : Poles, clear
- Test : Leakage test, pressure test



Gambar 3. Disain Housing Membrane



Gambar 4. Diagram AlirProses dan Instrumen "Reduksi Emisi CO₂ dengan menggunakan teknologi absorpsi melalui mimbran serat berpori"



Gambar 5 : Instrumen peralatan reduksi emisi CO_2 menggunakan teknologi absorpsi melalui membrane serat berpori.

HASIL UJI COBA OPERASIONAL PROTO-TYPE ALAT

Dari hasil penelitian dilakukan fabrikasi rancangan setting alat membran pada sistem. Fabrikasi tersebut meliputi Setting pompa, membran ceramic, membran PP, setting piping, valve, tangki dan panel kontrol. Setelah itu pengujian kebocoran membrane dengan cara dialiri dengan cairan penyerap. Jika terjadi kebocoran maka dilakukan pembongkaran dan di rangkai ulang sistem aliran.

Setelah prototipe selesai dilakukan ujicoba karakteristik membran, kemudian dilakukan ujicoba operasional sistem di industri. Industri yang dipilih adalah industri tekstil. Alasan pemilihan industri tekstil karena kapasitas boiler pada industri tekstil biasanya cukup besar, sehingga gas CO_2 yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil konsentrasinya tinggi, demikian juga konsentrasi gas emisi lainnya. Tingginya konsentrasi gas tersebut karena pemakaian bahan bakar batubara dan pada boiler tidak dilengkapi dengan alat pengendali pencemaran yang baik. Gas emisi inilah yang dipakai sebagai sumber bahan baku ujicoba operasional alat. Hasil ujicoba penelitian di industri akan dievaluasi dan dihitung sehingga akan diketahui kondisi optimal daya serap gas CO_2 , dengan konsentrasi pembasah tertentu yang digunakan serta waktu kontak / waktu alir yang dibutuhkan.

Sebagai variabel tetap pada ujicoba prototype alat ini adalah laju alir larutan penyerap (larutan NaOH): 1 liter/menit, volume larutan penyerap NaOH: 10 liter dan spesifikasi membrane: jenis polypropylene dengan porositas 0,85, diameter pori 0,1 μm , ketebalan 150 μm , panjang 100 cm dan ID fibre 0,5 mm. Sedangkan variabel berubah yang diteliti adalah laju alir gas: 2-10 liter/menit, waktu kontak: 5-35 menit dan konsentrasi larutan penyerap (larutan basa): 2,5-10%.

Berikut adalah gambar konstruksi prototype alat yang telah dibuat dan hasil ujicoba operasional proses dengan berbagai variabel di industri :



Gambar 5. Pelaksanaan uji coba operasional prototype alat di industri

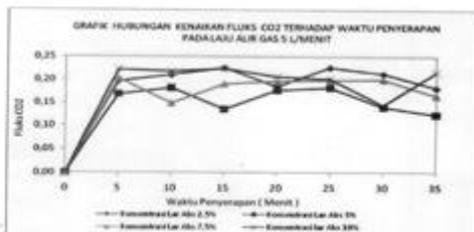
Tabel 2. Konsentrasi CO₂ tereduksi pada variasi konsentrasi NaOH

No	WAKTU (menit)	KONSENTRASI CO ₂ TEREDUKSI			
		NaOH 2,5%	NaOH 5%	NaOH 7,5%	NaOH 10%
1	0	0	0	0	0
2	5	6,44	5,52	6,64	7,28
3	10	6,87	5,95	4,88	7,15
4	15	7,38	4,45	6,25	7,33
5	20	6,04	5,79	6,44	6,74
6	25	7,42	5,99	6,52	6,58
7	30	6,98	4,60	6,57	4,71
8	35	5,96	4,06	5,42	7,07



Tabel 3. Peningkatan Fluks CO₂ pada variasi konsentrasi NaOH.

No	WAKTU (menit)	Fluks perpindahan massa CO ₂ mol/m ² .detik			
		NaOH 2,5%	NaOH 5%	NaOH 7,5%	NaOH 10%
1	0	0	0	0	0
2	5	0,20	0,17	0,20	0,22
3	10	0,21	0,18	0,15	0,22
4	15	0,23	0,14	0,19	0,22
5	20	0,18	0,18	0,20	0,21
6	25	0,23	0,18	0,20	0,20
7	30	0,21	0,14	0,20	0,14
8	35	0,18	0,12	0,17	0,22



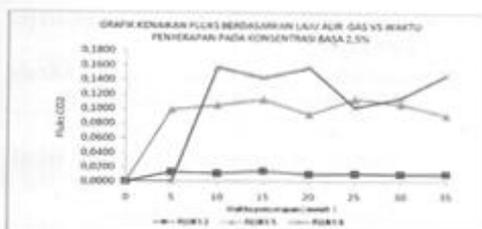
Tabel 4. Konsentrasi CO₂ terserap pada variasi laju air gas buang emisi.

NO	WAKTU (menit)	KONSENTRASI CO ₂ TERSERAP		
		Laju alir Gas 2 L/m	Laju alir Gas 5 L/m	Laju alir Gas 8 L/m
1	0	0	0	0
2	5	2,15	6,44	6,44
3	10	1,82	6,87	5,84
4	15	2,41	7,38	6,42
5	20	1,68	6,04	4,19
6	25	1,73	7,42	4,70
7	30	1,61	6,98	6,01
8	35	1,69	5,96	6,97



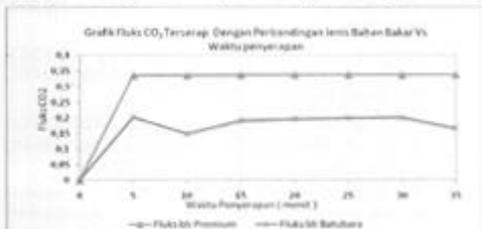
Tabel 5. Peningkatan Fluks CO₂ pada variasi konsentrasi NaOH.

No	WAKTU (menit)	Fluks perpindahan massa CO ₂ mol/m ² .dt		
		Laju alir Gas 2 lt/m	Laju alir Gas 5 lt/m	Laju alir Gas 8 lt/m
1	0	0	0	0
2	5	0,0131	0,0984	0,0000
3	10	0,0111	0,1050	0,1575
4	15	0,0147	0,1128	0,1428
5	20	0,0103	0,0923	0,1570
6	25	0,0106	0,1134	0,1025
7	30	0,0098	0,1067	0,1150
8	35	0,0103	0,0911	0,1470



Tabel 6. Konsentrasi CO₂ terserap dan kenaikan fluks dengan perbandingan jenis bahan bakar tiap satuan waktu

N O	WAKTU (Menit)	PREMIUM		BATUBARA	
		% CO ₂ Terserap	FLUK S CO ₂	% CO ₂ Terserap	FLUK S CO ₂
1	0	0	0	0	0
2	5	10,94	0,3345	6,64	0,2030
3	10	10,97	0,3354	4,88	0,1492
4	15	11	0,3363	6,25	0,1911
5	20	11,01	0,3366	6,44	0,1969
6	25	11,02	0,3369	6,52	0,1993
7	30	11	0,3363	6,57	0,2009
8	35	11,02	0,3369	5,42	0,1657



Uraian dan Evaluasi Hasil.

Dari hasil analisa gas emisi dan penyerapan dari unit utilitas boiler di PT. Dan Liris dan PT. Tyfountex, Solo, dilakukan pada berbagai

macam variabel berubah yaitu laju alir gas emisi, Konsentrasi larutan penyerap, dan waktu. Dari variabel tersebut divariasi laju alir vs waktu dan konsentrasi larutan penyerap vs waktu, selanjutnya dari data tersebut di hitung fluks penyerapan antara gas-cair melalui media membran. Perhitungan ini menunjukkan optimalisasi kinerja membran dan menunjukkan apakah ada hambatan pada saat proses penyerapan berlangsung. Selain itu, pada saat pengambilan contoh juga dilakukan variasi jenis bahan bakar yaitu batubara dan premium. Batubara diambil pada boiler di industri, dan premium diambil pada pembangkit generator set. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah ada perbedaan penyerapan antara gas CO₂ yang dihasilkan boiler dan CO₂ yang dihasilkan oleh generator set.

Pada hasil tabel 3 dan grafik tersebut diatas, untuk konsentrasi penyerap diperoleh optimasi konsentrasi larutan penyerap NaOH pada 2,5% dengan fluks optimum 0,23 mol CO₂/m².dt, pada waktu kontak selama 15 menit. Fluks menunjukkan berapa jumlah gas karbon dioksida yang dapat terserap persatuan luasan membran per detik. Makin diperoleh angka fluks besar semakin baik. Hal ini akan menghemat biaya, karena dengan konsentrasi larutan penyerap NaOH rendah, waktu kontak pendek dengan hasil fluks besar, akan menghemat biaya operasional, dan akan mudah diaplikasikan di industri. Dari konsentrasi penyerap NaOH 2.5 % sudah cukup untuk mereduksi gas emisi CO₂ yang keluar dari unit boiler (8-12%). Efisiensi penyerapan dapat mencapai optimum sekitar 80-85%. Hal ini lebih baik dari pada menggunakan absorber & scrubber yang sudah lazim digunakan secara konvensional di Industri, yang hanya dapat mencapai efisiensi penyerapan sekitar 50-60%.

Pada laju alir 5 lt/mnt merupakan laju alir pada kondisi operasi optimum. Gas emisi akan tereduksi sempurna jika aliran gas dijaga tidak terlalu cepat dan tidak terlalu lambat. Hal ini akan mempengaruhi kinerja pompa dan umur pompa karena pompa yang digunakan pada membran tidak boleh terlalu besar. Pompa yang terlalu besar akan mempengaruhi hasil penyerapan gas tidak terserap dengan sempurna sehingga fluks akan mengalami penurunan, akibatnya membran tidak bisa menjalankan fungsinya pada proses difusi absorpsi (membran dapat rusak).

Pada tabel 5 hasil percobaan terlihat bahwa pada laju alir gas yang semakin kecil penyerapan gas CO₂ akan semakin sempurna. Karena pada laju alir yang rendah akan menambah waktu tinggal didalam reaktor membran sehingga kontak antar fase gas-cair menjadi lebih baik. Gas-gas lain yang terikut didalam sisa hasil pembakaran seperti O₂ dan CO karena mempengaruhi konsentrasi dari CO₂ juga akan terlarut.

Pada uji karakteristik perbedaan bahan bakar yang digunakan akan mempengaruhi jumlah gas karbon dioksida yang terbentuk, dan kualitas gas emisinya secara keseluruhan. Bahan bakar premium akan lebih baik kualitas gas buang emisi yang dihasilkan dari pada bahan bakar batubara tabel 6. Namun demikian kondisi saat ini di industri yang banyak digunakan adalah bahan bakar batubara. Sehingga pada percobaan penelitian ini dipilih dan ditentukan untuk didetailkan adalah pada penggunaan bahan bakar pada boiler batubara. Hasilnya seperti yang disajikan pada tabel dan grafik tersebut diatas adalah boiler dengan bahan bakar batubara.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil ujicoba operasional prototype alat untuk " Reduksi Emisi CO₂ dengan menggunakan Teknologi Absorpsi Melalui Membrane Serat Berpori" dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kondisi optimum diperoleh pada :
 - Penggunaan absorben (larutan pembersih NaOH) pada konsentrasi 2,5 %
 - Laju alir gas masuk sistem 5 liter/menit
 - laju alir absorben 1liter/menit
 - waktu alir (waktu kontak) gas masuk sistem 15 menit
 - Efisiensi penyerapan gas emisi karbon dioksida (CO₂) mencapai 80-85%. Dibanding dengan menara absorber konvensional hanya mencapai sekitar 50-60%
 - Fluks perpindahan massa CO₂ 0,23 mol/m².dt, pada variasi konsentrasi CO₂ keluar cerobong sekitar 8-12 %.
2. Fluks perpindahan massa CO₂ dari hasil pembakaran bahan bakar premium lebih besar dari bahan bakar batubara 0,3369 mol/m².dt untuk waktu kontak yang sama.

3. Penggunaan alat ini mempunyai beberapa keuntungan:

- absorben lebih efisien karena hanya dibutuhkan untuk pembersihan.
- Waktu penyerapan lebih cepat
- Lokasi penempatan alat tidak membutuhkan lahan terlalu luas
- Mudah dalam pengoperasian.
- Membantu penerapan Clean Development Mechanism (CDM)
- Alat ini dapat diterapkan di industri dengan pengembangan scale up yang lebih besar.

Saran

- Alat ini dapat dikembangkan pada skala industri yang lebih besar dengan pengembangan scale up.
- Perlu dilakukan sosialisasi hasil penelitian dan pengembangan ini ke masyarakat industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed Siemmens, "Energy Loss Characteristics of Pararell Flow Bubbleless Hollow Fiber Membrane Aerators", 2002
- Bird, R. R., W. E Steward and E. N. Lightfoot (1960), "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, New York.
- Broadkey, R. S. and H. C. Herhsey, (1988), "Transport Phenomena : A Unified Approach", Mc. Graw Hill Book Company.
- D.O. Cooney, and C.C. Jackson, "Gas Absorption in a hollow fibre device", Chemical Engineering Communication, 61 (1987), pp. 159-167.
- Dortmundt, David dan Doshi Kishore, "Recent developments in CO₂ removal membran technology", <http://www.uop.com>, 2006
- Ho, W. S. and K. K. sirkar, (1992), "Membran Handbook", Van NostrandReinhold, New York.
- Iversen, S. B., V. K. Bhatia, K. Dam-Johansen and G. Jonsson (1997), "Characterisation of Microporous Membrane for Use in Membrane Contactor", J. Membrane Sci., 130, p.205-217
- Kartohardjono Sutrasno, "Makara Teknologi", 2004.
- Mulder, M., "Basic Principles of Membrane Technology", 2nd ed., KLUWER Academic Publishers, Netherland ,1996, pp 52, 134,160, 224.
- Rautenbach, R. and R. Albrecht (1989), "Membrane Process", John Wiley and Sons Ltd., England.
- Zhang Qi and E.L. Cussler, "Microporous hollow fiber for gas absorption: " Mass transfer in the liquid", Journal of Membrane Science, 23 (1985), pp. 321-332.