

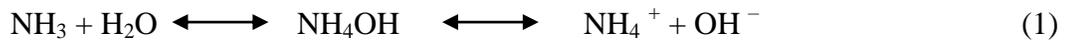
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ammonia

Ammonia merupakan gas tajam yang tidak berwarna dengan titik didih 33,50C. Cairannya mempunyai panas penguapan sebesar 1,37 kJ g⁻¹ pada titik didihnya. Secara fisik cairan NH₃ mirip dengan air dalam perilaku fisiknya dimana bergabung sangat kuat melalui ikatan hidrogen (Cotton, 1989).

Ammonia yang terukur di perairan berupa amoniak total (NH₃ dan NH₄⁺). Amoniak bebas tidak dapat terionisasi (ammonia) sedangkan amonium (NH₄⁺) dapat terionisasi. Persentase amoniak meningkat dengan meningkatnya nilai pH dan suhu perairan. Pada pH 7 atau kurang, sebagian besar ammonia akan mengalami ionisasi. Sebaliknya pada pH lebih besar dari 7 ammonia tak terionisasi yang bersifat toksik terdapat dalam jumlah yang lebih banyak. Ammonia bebas yang tak terionisasi bersifat toksik terhadap organisme akuatik. Toksisitas ammonia terhadap organisme akuatik akan meningkat jika terjadi penurunan kadar oksigen terlarut, pH, dan suhu (Effendi, 2003).

Gas ammonia larut dalam air, bereaksi dengan air membentuk amonium hidroksida. Oleh karena ionisasi ini dalam air membentuk NH₄⁺ + OH⁻, pada pH tinggi, gas amonia bebas ada dalam bentuk tak terionisasi. Pada pH dari pasokan air pada umumnya, amonia secara sempurna di ionisasi.



(Peningkatan dari OH⁻ mengarahkan reaksi ke kiri).

Ammonia (NH₃) merupakan senyawa yang bersifat mudah larut dalam air. Ion ammonium merupakan transisi dari ammonia, selain terdapat dalam bentuk gas ammonia juga dapat berbentuk kompleks dengan beberapa ion logam. Ammonia banyak digunakan dalam proses produksi urea, industri bahan kimia, serta industri bubuk dan kertas. Sifat-sifat penting pada ammonia dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat-sifat ammonia

Sifat-sifat Ammonia	Nilai
Massa jenis dan fase (g/L)	0
Kelarutan dalam air(gr/100 ml pada 0 ⁰ C)	89
Titik lebur (⁰ C)	-77
Titik didih (⁰ C)	-33
Keasaman (PKa)	9
Kebasaan (PKb)	4

Sumber : (Rahmawati, 2010)

Limbah yang dihasilkan dari industri ammonia sering kali dikeluarkan dalam bentuk gas. Apabila limbah gas ammonia langsung dibuang ke udara dan terhirup oleh makhluk hidup khususnya manusia maka akan mengakibatkan gangguan kesehatan seperti iritasi yang kuat terhadap sistem pernafasan bagian atas yakni bagian hidung hingga tenggorokan. Terpapar gas ammonia pada tingkatan tertentu dapat menyebabkan gangguan fungsi paru-paru serta sensitivitas indera penciuman. Gejala yang ditimbulkan pada manusia dapat dilihat pada tabel 2.2 (Hendrik S ,2018).

Tabel 2.2 Gejala yang di timbulkan pada manusia

Konsentrasi Ammonia (mg/L)	Gejala yang ditimbulkan pada manusia
50	Iritasi ringan pada mata, hidung dan tenggorokan, toleransi dapat terjadi dalam 2 jam.
100	Mengakibatkan iritasi tingkat menengah pada mata.
250	Berdampak pada kesehatan ketika terpajan lebih dari 60 menit
500	Merupakan kadar yang memeberikan dampak bahaya langsung pada kesehatan
700	Berdampak langsung pada mata dan tenggorokan
>1500	Mengakibatkan <i>laryngospasm</i>
2500-4500	Berakibat fatal setelah terpapar selama 30 menit
>5000	Berakibat fatal dan menyebabkan kematian mendadak.

Sumber : (Hendrik S ,2018)

Ammonia banyak terkandung dalam limbah cair, baik limbah domestik, limbah pertanian, maupun limbah dari pabrik, terutama pabrik pupuk nitrogen (Bonnin, 2008). Limbah cair dari pabrik ammonia mengandung ammonia sampai 1000 mg/L limbah, pabrik ammonium nitrat mengeluarkan limbah cair dengan kandungan ammonia sebesar 2500 mg/L, sedangkan limbah peternakan dan rumah tangga mengandung ammonia dengan konsentrasi antara 100-250 mg/L. Konsentrasi ammonia diatas 0,11 mg/L akan menimbulkan resiko gangguan pertumbuhan pada semua spesies ikan. Oleh karena itu keberadaan ammonia di dalam air limbah sangat dibatasi. Negara-negara Eropa membatasi kandungan ammonia di dalam air limbah maksimum 0,5 mg/L, sedangkan negara-negara Amerika 0,77 mg/L (Jorgensen, 2002).

2.2 Air

Air merupakan suatu pelarut yang baik. Air mampu melarutkan berbagai macam senyawa kimia. Seperti air hujan yang mengandung bahan kimia dalam jumlah yang sangat sedikit. Sifat ini memungkinkan unsur hara yang larut diangkut keseluruhan jaringan tubuh manusia dan memungkinkan bahan-bahan *toxic* yang masuk kedalam tubuh manusia dilarutkan untuk dikeluarkan kembali. Sifat ini memungkinkan untuk air digunakan sebagai pencuci yang baik dan pengencer bahan pencemar (polutan) yang larut kedalam air (Suparno, 2016).

Air memiliki sifat sebagai pelarut universal yang di dalamnya selalu terlarut unsur dan senyawa kimia lainnya selain hidrogen dan oksigen sebagai unsur utamanya. Oleh karena itu, tidak ada air dan perairan alami yang murni di bumi ini. Dengan terlarutnya unsur dan senyawa kimia di dalamnya, maka air merupakan komponen ekologis yang berperan penting bagi hidup dan kehidupan organisme. Air terdapat 2 parameter pengukuran yaitu Parameter fisika yang biasa digunakan untuk menentukan kualitas air antara lain suhu, kecerahan dan kekeruhan, warna, dan cahaya dan parameter kimia yang digunakan untuk menentukan kualitas air yaitu pH, oksigen terlarut, kesadahan dan alkalinitas. Sifat-sifat pada air dapat dilihat pada Tabel 2.3. (Tjutju Susana, 2003)

Tabel 2.3. Sifat-sifat Air

Komponen	Keterangan
Rumus Molekul	H ₂ O
Massa Molar	18.0153 g/mol
Volume Molar	55,5 mol/L
Kerapatan pada Fasa	1000 kg/m ³ , liquid 917 kg/m ³ , solid
Titik Leleh	0 ⁰ C (273.15 K) (32 ⁰ F)
Titik Didih	100 ⁰ C (373.15 K) (212 ⁰ F)
Titik Beku	0 ⁰ C pada 1 atm
Viskositas	1,002 centipoise pada 20 ⁰ C
Konduktivitas Panas	0,60 W m ⁻¹ K ⁻¹ (T=293 K)

Sumber : (Tjutju Susana, 2003)

2.3 Absorpsi

Absorpsi merupakan salah satu operasi pemisahan dalam industri kimia dimana suatu campuran gas dikontakkan dengan suatu cairan penyerap yang sesuai, sehingga satu atau lebih komponen dalam campuran gas terlarut dalam cairan penyerap. Absorpsi dapat berlangsung dalam dua macam proses, yaitu absorpsi fisik dan absorpsi kimia (Treybal, 1981)

1) Absorpsi Fisik

Absorpsi fisik merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam cairan penyerap tidak disertai dengan reaksi kimia. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik, difusi gas ke dalam air, atau pelarutan gas ke fase cair. Contoh absorpsi ini adalah absorpsi gas H₂S dengan air, metanol, propilen, dan karbonat. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik, difusi gas ke dalam air, atau pelarutan gas ke fase cair.

2) Absorpsi Kimia

Absorpsi kimia merupakan absorpsi dimana gas terlarut didalam larutan penyerap disertai dengan adanya reaksi kimia. Contoh absorpsi kimia ini adalah absorpsi dengan adanya larutan MEA, NaOH, K₂CO₃, dan sebagainya. Aplikasi dari absorpsi kimia dapat dijumpai pada ion *exchangers*, juga proses penyerapan gas CO₂ pada pabrik ammonia. Penggunaan absorpsi kimia pada

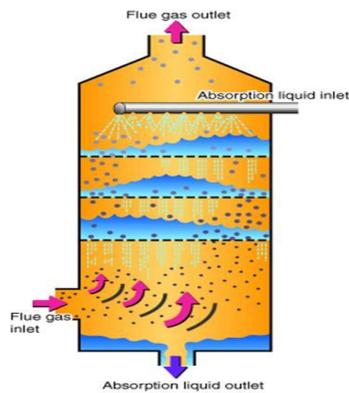
fase kering sering digunakan untuk mengeluarkan zat terlarut secara lebih sempurna dari campuran gasnya. Keuntungan absorpsi kimia adalah meningkatnya koefisien perpindahan massa gas, sebagian dari perubahan ini disebabkan makin besarnya luas efektif permukaan. Absorpsi kimia dapat juga berlangsung di daerah yang hampir stagnan disamping penangkapan dinamik.

2.3.1 Absorber

Absorber adalah Alat yang digunakan untuk proses Absorpsi, yaitu proses penyerapan fluida gas oleh seluruh bagian zat cair sebagai absorben. Proses Absorpsi digunakan untuk memisahkan suatu komponen gas dari campuran gas dengan menggunakan zat cair sebagai penyerap/absorben. Absorben yang digunakan ditentukan dari daya larut gas pada zat cair tertentu. Tujuan dari operasi ini umumnya bertujuan memisahkan gas tertentu dari campurannya. Biasanya campuran gas tersebut terdiri dari gas *inert* dan gas yang terlarut dalam cairan. Cairan yang digunakan juga umumnya tidak mudah menguap dan larut dalam gas. Sebagai contoh yang umum dipakai adalah absorpsi ammonia dari campuran udara-ammonia oleh air. Setelah absorpsi terjadi, campuran gas akan di *recovery* dengan cara distilasi (Redjeki,S 2013).

Kolom Absorpsi adalah suatu kolom atau tabung tempat terjadinya proses pengabsorpsi (penyerapan/penggumpalan) dari zat yang dilewatkan di kolom/tabung tersebut. Struktur yang terdapat pada kolom absorber dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

- Bagian atas: *Spray* untuk megubah gas input menjadi fase cair
- Bagian tengah: *Packed tower* untuk memperluas permukaan sentuh sehingga mudah untuk diabsorpsi
- Bagian bawah: *Input* gas sebagai tempat masuknya gas ke dalam reaktor.



Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.1. Absorber dan Kolom Absorpsi

Seperti gambar 2.1 merupakan alat absorber, absorber adalah alat pemisahan suatu komponen gas oleh zat cair sebagai pelarut. Prinsip kerjanya adalah suatu campuran gas diumpangkan dari bawah (*bottom*) tower absorber, untuk dikontakkan dengan zat cair dari atas (*top*) absorber. Komponen gas yang mempunyai kelarutan terbesar pada cairan tersebut akan larut bersama adsorben (zat cair) dan menjadi *bottom* produk, sedangkan komponen gas lainnya yang tidak terlarut dalam adsorben akan ke atas sebagai *top* produk. Karena prinsip kerja Absorber berdasarkan kelarutan gas dalam cairan, maka kondisi operasi Absorber adalah pada temperatur rendah, dan tekanan tinggi. Dimana pada kondisi ini, daya larut gas dalam fase cair akan maksimal (Redjeki,S 2013).

Cara kerja kolom absorpsi :

1. Di dalam kolom absorpsi terdapat zat yang berbeda fase mengalir berlawanan arah yang dapat menyebabkan komponen kimia ditransfer dari satu fase cairan ke fase lainnya, terjadi hampir pada setiap reaktor kimia. Proses ini dapat berupa absorpsi gas, destilasi, pelarutan yang terjadi pada semua reaksi kimia.
2. Campuran gas yang merupakan keluaran dari reaktor diumpangkan kebawah menara absorber. Didalam absorber terjadi kontak antar dua fasa yaitu fasa gas dan fasa cair mengakibatkan perpindahan massa *difusional* dalam umpan gas dari bawah menara ke dalam pelarut air *sprayer* yang diumpangkan dari

bagian atas menara. Peristiwa absorpsi ini terjadi pada sebuah kolom yang berisi *packing* atau *plate* dengan tingkat sesuai kebutuhan.

2.3.2 Absorben

Absorben adalah cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi pada permukaannya, baik secara fisik atau dengan reaksi kimia. Absorben (juga disebut cairan pencuci) harus memenuhi persyaratan yang sangat beragam. Misalnya bahan itu harus :

- Memiliki daya melarutkan bahan yang akan diabsorpsi yang sebesar mungkin (kebutuhan akan cairan lebih sedikit, volume alat lebih kecil)
- Sedapat mungkin sangat reaktif
- Memiliki tekanan uap yang tinggi
- Mempunyai viskositas yang rendah
- Stabil secara termis dan murah
- Tidak korosif, stabil secara termis dan murah (Bernasconi, 1995)

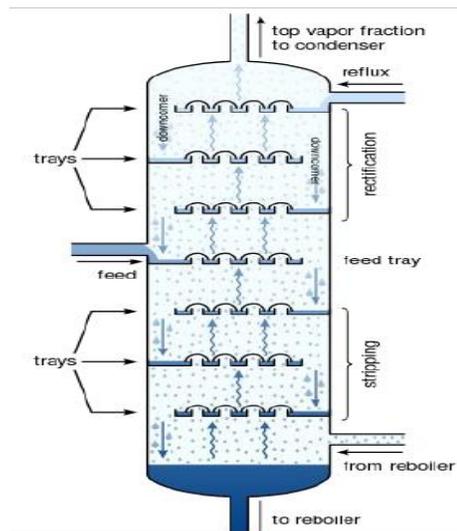
Absorben yang sering digunakan adalah air (untuk gas-gas yang dapat larut, atau untuk pemisahan partikel debu dan tetesan cairan), natrium hidroksida (untuk gas-gas yang dapat bereaksi seperti asam) dan asam sulfat (untuk gas-gas yang dapat bereaksi seperti basa).

2.3.3 Tipe Kolom Absorpsi

a. Tray Tower

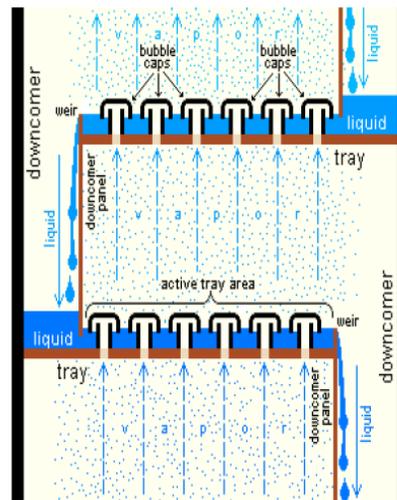
Tray Tower Scrubber atau *Plate Tower Scrubber* merupakan *scrubber* vertikal, dimana bagian dalam dari kolom berisi sejumlah *tray* atau *plate* yang disusun pada jarak tertentu (*tray/plate spacing*) di sepanjang kolom. Jumlah *tray/plate* ideal yang dibutuhkan untuk memperoleh hasil pemisahan bergantung pada tingginya kesulitan pemisahan zat yang akan dilakukan dan juga ditentukan berdasarkan perhitungan neraca massa dan kesetimbangan. Gas yang mengalir dari bagian bawah *Scrubber* akan melintas dari lubang-lubang yang ada pada setiap pelat yang digenangi oleh aliran air yang mengalir dari bagian atas *scrubber*. Tipe ini tidak efektif untuk ukuran partikel sub mikron tetapi tipe ini memiliki efisiensi tinggi untuk ukuran partikel >

5 μ m dimana dengan ukuran tersebut efisiensi yang didapat mencapai 97%. Desain ini baik digunakan untuk aliran gas 1.000 – 75.000 cfm dengan L/G ratio lebih kecil dibandingkan dengan *Spray Tower* dan *Ventury Scrubber*. *Tray* harus dirancang sedemikian rupa agar posisi cairan di setiap *tray* berada pada ketinggian yang cukup. Dengan demikian, untuk melewati cairan tersebut, gelembung-gelembung gas akan membutuhkan waktu relatif lama hingga memungkinkan dicapainya keseimbangan. Berikut merupakan gambar tray tower pada gambar 2.2 dan 2.3 (Redjeki,S 2013).



Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.2 a *Tray Tower*



Gambar 2.2 b Aliran Uap *Tray Tower*

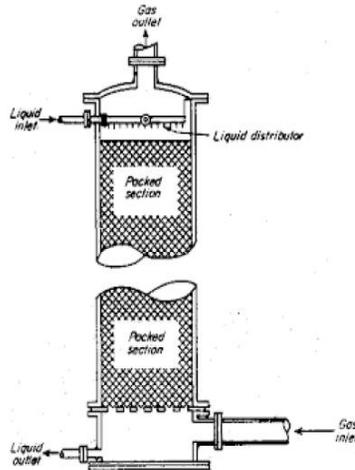
b. *Packed Tower*

Packed Tower adalah kolom pemisah berupa silinder tegak yang didalamnya berisi sejumlah isian (*packing*) yang digunakan sebagai alat kontak fase gas-cair atau cair-cair *Packed tower* banyak digunakan sebagai alat pemisah suatu campuran yang mendasarkan pada operasi difusi, yang melibatkan kontak antara: (Samsudin, 2015)

1. Fasa gas dengan fasa cair (Distilasi, Absorpsi, dan Desorpsi)
2. Fasa cair dengan fasa cair (Ekstraksi)

Packing terdiri dari keping-keping yang jumlahnya banyak untuk meningkatkan kapasitas absorpsinya dan untuk memperluas bidang kontak antara kedua fase. Aliran gasnya sekitar 500 ft³/min (14.2 m³/min) digunakan di in (2.5 cm) *packing*, untuk

aliran gasnya atau $2000 \text{ ft}^3/\text{min}$ ($56.6 \text{ m}^3/\text{min}$) or more, use 2 in (5 cm) packing. *Packed tower* terdapat suatu kontak arus berlawanan yang kontinue antara dua fase yang imisibel. Menara – menara ini merupakan kolom-kolom vertikal yang telah diisi dengan *packing*. Pada gambar 2.3 merupakan gambar *packed tower* arus berlawanan.



Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.3. *Packed Tower* Arus Berlawanan

Jenis ini adalah yang paling banyak diterapkan pada menara absorpsi. *Packed Column* lebih banyak digunakan mengingat luas kontakannya dengan gas. *Packed Bed* berfungsi mirip dengan media filter, dimana gas dan cairan akan tertahan dan berkontak lebih lama dalam kolom sehingga operasi absorpsi akan lebih optimal. Beragam jenis *packing* telah dikembangkan untuk memperluas daerah dan efisiensi kontak gas-cairan. Ukuran *packing* yang umum digunakan adalah 3 - 75 mm. Bahan yang digunakan dipilih berdasarkan sifat *inert* terhadap komponen gas maupun cairan solven dan pertimbangan ekonomis, antara lain tanah liat, porselin, grafit dan plastik. *Packing* yang baik biasanya memenuhi 60-90% dari volume kolom.

Material packing

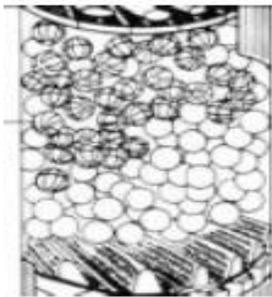
Material untuk *packing* ini sangat bervariasi, mulai dari *packing* keramik dan plastik yang di desain secara khusus, sampai batu yang dihancurkan. Adapun syarat - syarat bahan isian yang dapat digunakan adalah sebagai berikut (Mc. Cabe, 1993):

- Kuat tetapi tidak berat
- Tidak bereaksi dengan fluida dalam absorber
- Tahan korosi
- Memberikan luas kontak yang besar
- Murah

Cara Penyusunan *Packing* :

1. Random *Packing*

- Hanya dituang dan dibiarkan jatuh ke dalam kolom (acak).
- Jenis *packing* yang digunakan adalah *raschig ring*, *leasing ring*.
- Luas permukaan besar, *pressure drop* gas besar, ukuran *packing* kecil, ongkos kecil. Contoh penyusunan *random packing* dapat dilihat pada gambar 2.4 :

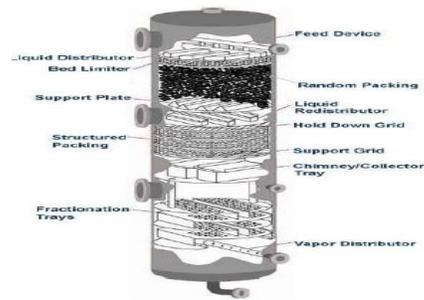


Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.4. *Packed Random Packing*

2. Regular *Packing*

- Disusun secara teratur.
- Jenis *packing* yang digunakan adalah *raschig ring*, dan *wood grid*.
- *Pressure drop* gas kecil, aliran fluida besar, dan ongkos besar.



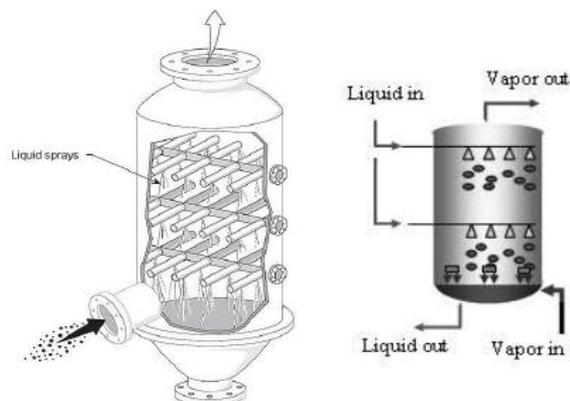
Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.5. Regular *Packing*

c. *Spray Tower*

Cara kerja *spray tower*

Menara sembur terdiri dari sebuah menara dimana terletak dari puncak menara cairan disemburkan dengan menggunakan *nozel* semburan. Tetes-tetes cairan akan bergerak ke bawah karena gravitasi dan akan berkontak dengan arus gas yang naik ke atas. *Nozel* semburan dirancang untuk membagi cairan kecil-kecil. Makin kecil ukuran tetes cairan, makin besar kecepatan transfer massa. Tetapi apabila ukuran tetes cairan terlalu kecil, tetes cairan dapat terikut arus gas keluar. Menara sembur biasanya digunakan untuk transfer massa gas yang sangat mudah larut. Gambar *spray tower* dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini.

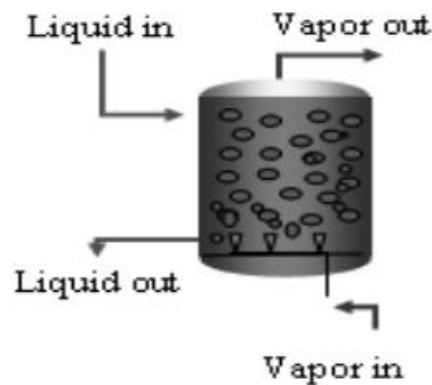


Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.6. Skema *Spray Tower*

d. Bubble Tower

Kolom gelembung (*Bubble Tower*) adalah peralatan tempat terjadinya proses perpindahan massa, dimana gas akan berkontak dengan *liquid*. Gas akan terdispersi ke dalam *phase liquid* yang *kontinue* dalam bentuk gelembung. Tingkat perpindahan massa dalam kondisi tertentu akan menentukan lajunya dimana seluruh proses terjadi. Tujuan proses ini adalah untuk dapat terjadinya laju perpindahan massa yang tinggi, yaitu dengan memperbesar luas *interfacial* dan tingkat intensitas turbulensi yang tinggi. Kolom *bubble* (gelembung) banyak digunakan dalam industri kimia, antara lain sebagai absorber, fermentor dan reaktor dimana terjadi reaksi antara gas dan liquid yang dalam proses tersebut sangat memerlukan daerah kontak yang besar antara kedua fase tersebut. Kolom *bubble* adalah peralatan yang sederhana dan tidak mahal. Kolom *bubble* merupakan alat kontak dimana gas yang masuk berupa *bubble* bergerak secara relatif terhadap *phase liquid kontinyu*. Gas masuk melalui sparger pada dasar kolom, begitu gas masuk ke dalam kolom maka liquid akan mengembang. Dalam kolom, gas terdispersi ke dalam *phase liquid* dalam bentuk gelembung-gelembung kecil yang berakibat luas kontaknya menjadi besar. Kolom gelembung (*Bubble Tower*) dapat dilihat pada gambar 2.7.



Sumber : (Santosa, H., 2004)

Gambar 2.7. *Bubble Tower*

2.3.4 Pemilihan Solven

Pemilihan solven umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain (Treybal, 1981)

- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka solven ditentukan berdasarkan sifat dari produk.
- Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan yang mungkin. Misalnya air, dimana merupakan solven yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar. Terdapat beberapa hal lain yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan solven, yaitu:

a. Kelarutan Gas

Kelarutan gas harus tinggi sehingga meningkatkan laju absorpsi dan menurunkan kuantitas solven yang diperlukan. Umumnya solven yang memiliki sifat yang sama dengan bahan terlarutkan lebih mudah dilarutkan. Jika gas larut dengan baik dalam fraksi mol yang sama pada beberapa jenis solven, maka dipilih solven yang memiliki berat molekul paling kecil agar didapatkan fraksi mol gas terlarut yang lebih besar. Jika terjadi reaksi kimia dalam operasi absorpsi maka umumnya kelarutan akan sangat besar. Namun bila solven akan *direcovery* maka reaksi tersebut harus *reversible*. Sebagai contoh, etanol amina dapat digunakan untuk mengabsorpsi hidrogen sulfida dari campuran gas karena sulfida tersebut sangat mudah diserap pada suhu rendah dan dapat dengan mudah dilucut pada suhu tinggi. Sebaliknya, soda kostik tidak digunakan dalam kasus ini karena walaupun sangat mudah menyerap sulfida tapi tidak dapat dilucuti dengan operasi stripping.

b. Volatilitas

Pelarut harus memiliki tekanan uap yang rendah, karena jika gas yang meninggalkan kolom absorpsi jenuh terhadap pelarut maka akan ada banyak solven yang terbuang. Jika diperlukan dapat digunakan cairan pelarut kedua yang volatilitasnya lebih rendah untuk menangkap porsi gas yang teruapkan. Aplikasi ini umumnya digunakan pada kilang minyak dimana terdapat menara absorpsi hidrokarbon yang menggunakan pelarut hidrokarbon

yang cukup volatil dan di bagian atas digunakan minyak nonvolatil untuk *recovery* pelarut utama. Demikian juga halnya dengan hidrogen sulfida yang diabsorpsi dengan natrium fenolat lalu pelarutnya di-*recovery* dengan air.

c. Korosivitas

Solven yang korosif dapat merusak kolom.

d. Harga

Penggunaan solven yang mahal dan tidak mudah di-*recovery* akan meningkatkan biaya operasi kolom.

e. Ketersediaan

Ketersediaan pelarut di dalam negeri akan sangat mempengaruhi stabilitas harga pelarut dan biaya operasi secara keseluruhan.

f. Viskositas

Viskositas pelarut yang rendah amat disukai karena akan terjadi laju absorpsi yang tinggi, meningkatkan karakter *flooding* dalam kolom, jatuhkan tekanan yang kecil dan sifat perpindahan panas yang baik.

g. Lain-lain

Sebaiknya pelarut tidak memiliki sifat racun, mudah terbakar, stabil secara kimiawi dan memiliki titik beku yang rendah.

2.4 Penentuan Koefisien Perpindahan Massa

Nilai koefisien perpindahan massa gas (K_G) atau cairan (K_L), dapat dicari dengan menggunakan korelasi yang dibuat oleh *Billet* dan *Schultes*, meliputi koefisien perpindahan massa konvektif gas (K_G , $\text{kmol/m}^2\cdot\text{dt}$) dan cairan (K_L , m/dt). Untuk menentukan besaran kedua koefisien tersebut, maka harus ditentukan dahulu nilai dari diameter partikel efektif (d_P , m), faktor dinding (K_W), bilangan Reynolds gas (Re_G), kecepatan massa cairan (G_L , $\text{kg/m}^2\cdot\text{dt}$), kecepatan cairan (v_L , m/dt), bilangan Reynolds cairan (Re_L), bilangan Froude cairan (Fr_L), rasio luas permukaan (ah/a , m^{-1}), luas permukaan spesifik efektif *packing* (ah , m^{-1}), dan waktu tinggal cairan ($h_{L,j}$) bilangan Schmidt (Sc_G), faktor perpindahan massa dari jenis *packing*

yang digunakan untuk gas (C_v) dan untuk cairan (C_L), nilai tetapan gas ideal ($R=0,0821 \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/\text{kmol} \cdot \text{K}$), dan luas permukaan perpindahan massa per unit volume ($a, \text{ m}^{-1}$), berturut-turut:

$$dp = 6 \times \left(\frac{1-\varepsilon}{10} \right) \quad (2)$$

$$kw = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \times \left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right) \frac{dp}{b}} \quad (3)$$

$$Re_G = \frac{V_G \times dp \times \rho_G \times kw}{(1-\varepsilon) \times \mu_G} \quad (4)$$

$$G_L = \frac{4 \left(\frac{m_L}{3600} \right)}{\pi \times D^2} \quad (5)$$

$$V_L = \frac{GL}{\rho_L} \quad (6)$$

$$Re_L = \frac{V_L \times \rho_L}{\alpha \times \mu_L} \quad (7)$$

$$Fr_L = \frac{V_L^2 \times \alpha}{g} \quad (8)$$

$$\frac{\alpha h}{\alpha} = Ch \times Re_L^{0,5} \times fr_L^{0,1} \quad (9)$$

$$\alpha h = \frac{\alpha h}{\alpha} \times \alpha \quad (10)$$

$$h_L = \left[12 \times \frac{Fr_L}{Re_L} \right]^{1/3} \times \left[\frac{\alpha h}{\alpha} \right]^{2/3} \quad (11)$$

$$SC_G = \frac{\mu_G}{\rho_G \times DG} \quad (12)$$

$$K_G = 0,1304 \cdot C_v \cdot \left[\frac{D_G \cdot P}{R \cdot T} \right] \cdot \left(\frac{a}{[\varepsilon(\varepsilon - h_l)]^{0,5}} \right) \cdot \left[\frac{Re_G}{Kw} \right]^{\frac{3}{4}} \cdot SC_G^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

$$K_L = 0,757 \cdot C_L \cdot \left[\frac{D_L \cdot a \cdot v_L}{\varepsilon \cdot h_l} \right]^{0,5} \quad (14)$$