

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Major Hazard Installations*

Menurut ILO (1991), *major hazard installations* didefinisikan sebagai instalasi industri yang menyimpan, menggunakan atau menghasilkan bahan kimia berbahaya, baik karena kuantitas maupun sifatnya yang berpotensi menimbulkan *major accident*. Berdasarkan jenis dan kuantitas bahan kimia yang digunakan, berikut adalah instalasi industri yang memiliki *major hazard*:

- a. Industri kimia dan petrokimia
- b. Kilang minyak
- c. Tempat penyimpanan LPG (*liquid petroleum gas*)
- d. Tempat penyimpanan gas dan cairan yang mudah terbakar
- e. Gudang bahan kimia
- f. Industri pupuk**
- g. Tempat pengolahan air yang menggunakan klorin

Berikut merupakan penjabaran singkat tentang *major hazard* yang terdiri atas kebakaran, ledakan dan kebocoran bahan kimia (Lees, 1996):

a. Kebakaran

Dalam proses industri, kebakaran merupakan bahaya yang paling mengkhawatirkan dan menempati urutan pertama dalam hal kekerapannya bila dibandingkan dengan ledakan dan kebocoran bahan kimia berbahaya. Kebakaran dapat terjadi sebagai akibat dari kebocoran maupun tumpahan bahan kimia yang disebabkan oleh kerusakan pipa, pompa atau tabung bejana.

b. Ledakan

Ledakan menempati urutan kedua dalam hal tingkat keseriusannya. Namun, bila ledakan sampai terjadi dalam proses industri, kerusakan yang ditimbulkannya lebih parah bila dibandingkan dengan kebakaran.

c. Kebocoran bahan kimia berbahaya

Kebocoran bahan kimia berbahaya, kebocoran dalam jumlah yang sangat besar dapat berdampak sangat serius dan fatal bila dibandingkan dengan dampak yang ditimbulkan oleh kebakaran atau ledakan. Untungnya, kebocoran bahan kimia berbahaya dalam jumlah yang sangat besar jarang sekali terjadi dan dampak yang ditimbulkannya pun sangat tergantung pada kondisi dan karakteristik bahan kimia itu sendiri.

## 2.2 Konsep Ledakan

Setiap orang pasti tahu apa itu ledakan. Namun, penjelasan teknis tentang ledakan tidaklah sederhana. Diantara sekian banyak ahli dan analis yang mendefinisikan ledakan, Lees (1996) menyatakan bahwa ledakan adalah pelepasan sejumlah energi yang terjadi secara tiba-tiba. AIChE/CCPS (AIChE,1994) dalam Crowl (2003) mendefinisikan ledakan sebagai pelepasan energi yang menimbulkan bunyi letusan. Crowl dan Louvar (2002) dalam Crowl (2003) menyatakan bahwa ledakan merupakan konsekuensi dari pemuaihan gas yang terjadi dengan sangat cepat diikuti oleh tekanan atau gelombang kejut (*shock wave*). Sedangkan menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (2003), ledakan merupakan kejadian yang mengeluarkan bunyi sangat keras.

Berdasarkan penjabaran tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa ledakan adalah suatu proses pelepasan energi yang terjadi dengan tiba-tiba dalam waktu singkat yang disertai dengan gelombang kejut (*shock wave*) dan bunyi letusan yang keras.

Menurut Crowl (2003), ledakan suatu material bergantung pada banyak variabel, termasuk diantaranya bentuk fisik material (*physical state*) seperti cairan, padatan, gas, bubuk & kabut (*powder & mist*); reaktivitas dan properti fisik material tersebut, seperti tekanan uap, *heat capacity*, panas pembakaran dan lain sebagainya. Tipe ledakan yang dihasilkan juga bergantung pada beberapa faktor seperti (Crowl, 2003):

- a. Kondisi material pada awal penyimpanan dan penggunaannya
- b. Cara material tersebut terlepas
- c. Cara penyebaran material dan proses tercampurnya dengan udara

d. Kapan dan bagaimana material tersebut terignisi

## 2.3 Klasifikasi Ledakan

Terdapat beberapa jenis energi yang mungkin dilepaskan ketika terjadi ledakan. Pada prinsipnya, energi tersebut dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu energi fisik, energi kimia dan energi nuklir. Energi fisik dapat muncul dalam berbagai bentuk, diantaranya dapat berupa energi tekanan (*pressure energy*) pada gas, energi tegangan (*strain energy*) pada logam atau berbentuk energi listrik. Sedangkan energi kimia dan energi nuklir berasal dari reaksi kimia (Lees, 1996).

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, ledakan merupakan sebuah pelepasan energi yang terjadi dengan tiba – tiba. Berdasarkan jenis energi yang dilepaskan dan proses terjadinya, maka ledakan dapat diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu ledakan fisik (*physical explosion*) dan ledakan kimia (*chemical explosion*).

### 2.3.1 Ledakan Fisik (*Physical Explosions*)

Ledakan fisik terjadi karena keluarnya energi mekanik secara tiba-tiba, seperti lepasnya gas bertekanan tapi tidak melibatkan reaksi kimia (Crowl, 2003). Ledakan fisik meliputi bejana pecah (*vessel rupture*), BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) dan ledakan pada fase transisi (*rapid phase transition explosions*).

#### 2.3.1.1 *Vessel Rupture*

##### a. *Pressure Vessel Rupture*

Ledakan ini terjadi ketika proses dalam bejana (*vessel*) yang mengandung tekanan mengalami kerusakan atau kegagalan operasi secara tiba-tiba (Crowl, 2003) mengakibatkan energi yang tersimpan didalamnya keluar dan menimbulkan gelombang kejut (*shock wave*) dan mempercepat retaknya bejana (*vessel*) (CCPS, 1999).

Kerusakan ini dapat disebabkan oleh banyak hal, diantaranya adalah (CCPS, 1999):

- a. Kegagalan pengaturan dan peralatan pengendali tekanan.
- b. Berkurangnya ketebalan bejana (*vessel*) yang disebabkan oleh korosi, erosi dan serangan bahan kimia.
- c. Berkurangnya daya tahan bejana (*vessel*) yang disebabkan oleh temperatur panas yang berlebih, kerusakan material bejana, serangan bahan kimia seperti *stress corrosion cracking* dan penggetasan (*embrittlement*)
- d. Reaksi internal yang tak beraturan (*Internal runaway reaction*).

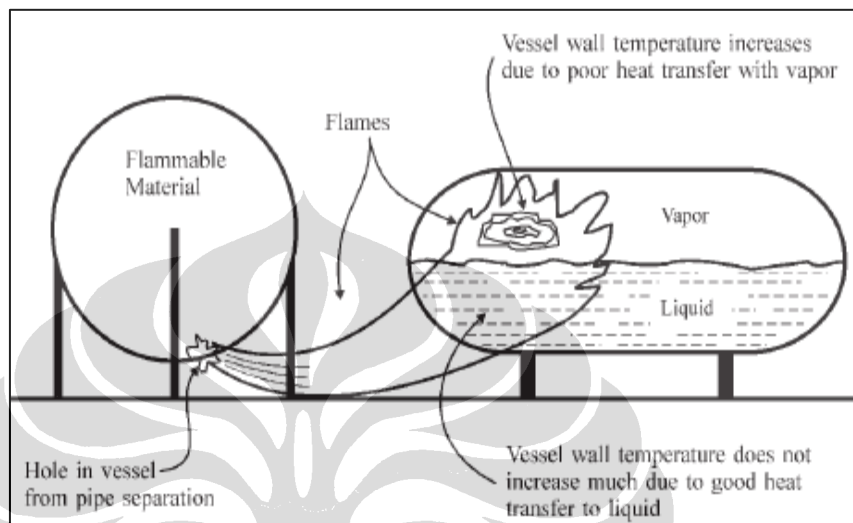
Contoh ledakan dari jenis ini adalah ledakan pada bejana (*vessel*) yang mengandung gas dengan tekanan berlebih maupun ledakan yang disebabkan oleh kegagalan *relief device* dalam mengontrol tekanan berlebih (Crowl, 2003).

b. BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*)

BLEVE merupakan ledakan yang disebabkan oleh kerusakan bejana (*vessel*) dengan kandungan gas cair (*liquefied gas*) atau cairan (*liquid*) yang disimpan dengan temperatur jauh diatas titik didih normalnya (Crowl, 2003).

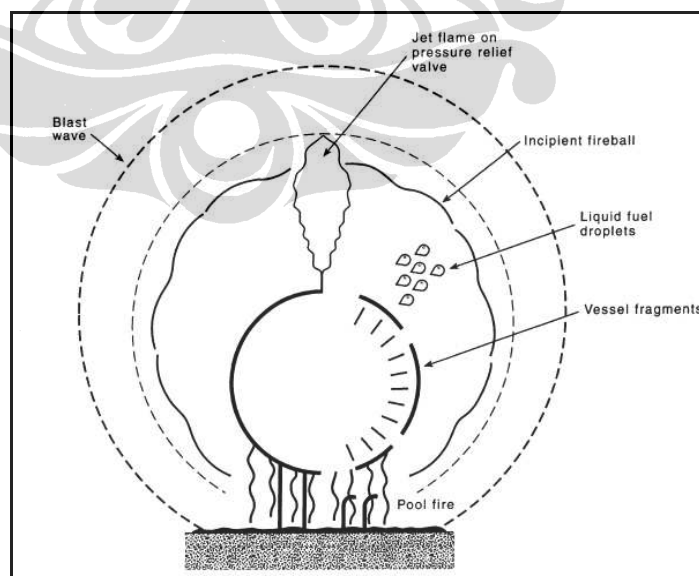
Sedangkan menurut Lees (1996), BLEVE biasanya terjadi ketika bejana bertekanan yang mengandung cairan mudah terbakar (*flammable liquid*) terpajan api atau panas, cairan (*liquid*) tersebut menguap dan menghasilkan tekanan. Tekanan tersebut menambah tekanan yang sebelumnya telah ada dalam bejana. Tepat pada saat tekanan dalam bejana mencapai batas maksimalnya, dinding bejana yang terus menerus dihantam oleh tekanan tersebut mulai kehilangan kekuatannya dan pecah. Hal ini sangat mungkin terjadi meski fungsi katup pengatur tekanan beroperasi dengan baik. Hal ini terjadi karena katup pengatur tekanan hanya beroperasi sesuai dengan temperatur disain bejana,

sehingga penambahan temperatur yang disebabkan oleh *vapor* dapat melemahkan daya tahan material bejana akibat panas yang ditimbulkannya.



Gambar 2.1 Mekanisme Terjadinya BLEVE oleh *eksternal flame*

Sumber : Crowl (2003)



Gambar 2.2 BLEVE

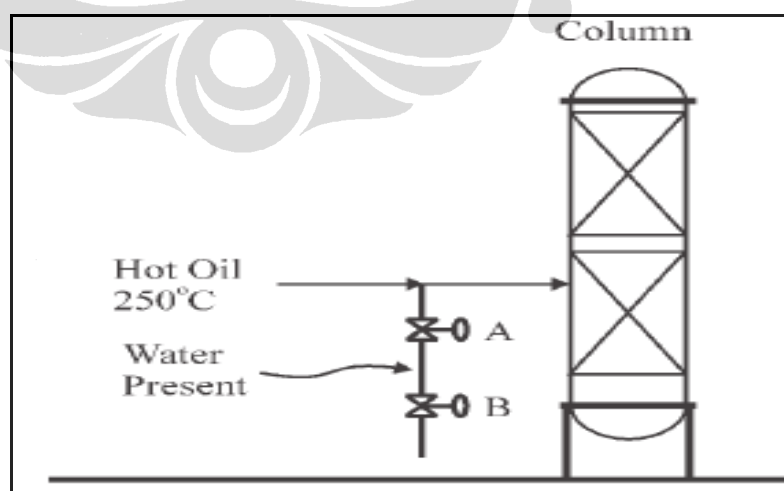
Sumber : Less (1996)

Kebanyakan BLEVE melibatkan bejana bertekanan atau mobil tanki yang mengangkut bahan kimia cair mudah terbakar (*flammable liquid*) (Lees, 1996). Kondisi yang dapat mengakibatkan kerusakan pada *container* dapat berupa (CCPS, 1994):

- a. Api atau sumber panas dari luar *container*.
- b. Pengaruh mekanis
- c. Korosi
- d. Tekanan internal *container* yang terlalu besar
- e. Kerusakan metalurgi (komposisi pembentuk material bejana)

#### 2.3.1.2 Rapid Phase Transition

Ledakan ini terjadi ketika material terpajan sumber panas yang menyebabkan perubahan fase dengan cepat dan mengakibatkan volume material. Contoh *rapid phase transition explosion* adalah minyak panas yang dipompakan ke dalam bejana (*vessel*) yang mengandung air, dan katup pipa yang terbuka terkena semburan air dan mengenai minyak panas (Crowl, 2003).



Gambar 2.3 *Rapid Phase Transition*

Sumber : Crowl (2003)

Tabel 2.1 Karakteristik Berbagai Tipe Ledakan Fisik

Tipe	Energi Gelombang Kejut
Bejana berisi gas	Ekspansi gas
Bejana berisi cairan ( <i>liquid</i> ) Temperatur cairan ( <i>liquid</i> ) < titik didihnya	Ekspansi gas dari <i>vapor space volume</i> ; bentuk cairan ( <i>liquid</i> ) tidak berubah dan keluar dari bejana
Bejana berisi cairan ( <i>liquid</i> ) Temperatur cairan ( <i>liquid</i> ) > titik didihnya	Ekspansi gas dari <i>vapor space volume</i> bersamaan dengan evaporasi cairan.

Sumber : *Center for Chemical Process Safety* (1999)

### 2.3.2 Ledakan Kimia (*Chemical Explosions*)

Ledakan kimia terjadi karena reaksi kimia yang berlangsung cepat. Reaksi kimia tersebut dapat berasal dari reaksi pembakaran, reaksi dekomposisi atau reaksi eksotermis (Crowl, 2003). Ledakan kimia terbagi menjadi dua, yaitu *propagating explosion* dan *uniform explosion*, ledakan pada bejana cenderung membentuk *uniform explosion* sementara ledakan pada pipa yang panjang, cenderung membentuk *propagating explosion* (Lees, 1996).

#### 2.3.2.1 *Propagating Reactions*

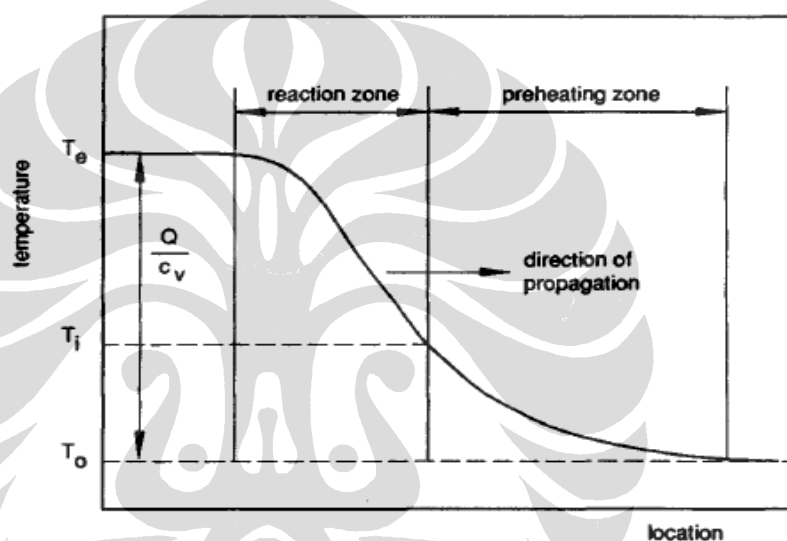
*Propagating reactions* adalah reaksi yang menyebar melalui reaksi massa, seperti pembakaran dari *flammable vapor* pada pipa, *vapor cloud explosion*, atau dekomposisi dari padatan yang tidak stabil. *Propagating reactions* dikategorikan menjadi *deflagration* dan *detonation*, tergantung dari kecepatan bidang reaksi menyebar melalui massa yang tidak bereaksi (Crowl, 2003).

##### a. *Deflagrations*

Keadaan yang dapat memicu terjadinya deflagrasi adalah ketika campuran gas berada pada *flammable range* dan terdapat

sumber ignisi sehingga campuran gas tersebut terus memanaskan mencapai titik ignisi otomatisnya (*auto ignition*) (Lees, 1996).

Pada deflagrasi, campuran kimia *flammable* terbakar secara perlahan atau dengan kata lain, bidang reaksi berpindah lebih lambat dari kecepatan suara (Crowl, 2003). Jika sumber ignisi begitu kuat, tidak menutup kemungkinan deflagrasi berubah menjadi detonasi (Lees, 1996).



Gambar 2.4 Distribusi Temperatur melintasi *laminar flame*

Sumber : Lees (1996)

#### b. *Detonations*

Beberapa ledakan karena bahan kimia eksplosif (*explosive chemical*) disebabkan oleh detonasi. Detonasi dapat terjadi pada cairan atau padatan bahan kimia eksplosif, pada campuran gas eksplosif dalam pabrik, dan dalam *vapor cloud*. Dalam detonasi, ujung lidah api menjalar sebagai gelombang kejut (*shock wave*) yang diikuti oleh gelombang pembakaran (*combustion wave*) sambil melepaskan energi untuk menopang gelombang kejut (*shock wave*) didepannya (Lees, 1996).



Detonasi terjadi ketika bidang reaksi berpindah sejajar atau lebih cepat dari kecepatan suara dalam medium yang tidak bereaksi (Crowl, 2003), menghasilkan tekanan yang jauh lebih besar dan lebih destruktif dari deflagrasi. Puncak tekanan yang disebabkan oleh deflagrasi pada campuran hidrokarbon dan udara dalam bejana tertutup hanya mencapai 8 bar, sedangkan dalam kondisi yang sama, puncak detonasi dapat mencapai 20 bar (Lees, 1996).

Untuk perlindungan, Nettleton (1987) dalam Lees (1996) memberikan beberapa alternatif yang dapat dilakukan, diantaranya adalah dengan menghambat laju pembakaran lidah api, *venting* tahap awal ledakan, *quenching* kompleksitas kejut lidah api, menekan detonasi dan mengurangi efek detonasi.

Baik deflagrasi dan detonasi, keduanya dapat terignisi oleh sumber berikut (Lees, 1996):

- a. Api atau permukaan yang panas
- b. *Sparks*
- c. Bahan kimia (tidak stabil, reaktif dan katalis, atau *pyrophoric iron sulphide*)
- d. Elektro statis
- e. Kompresi

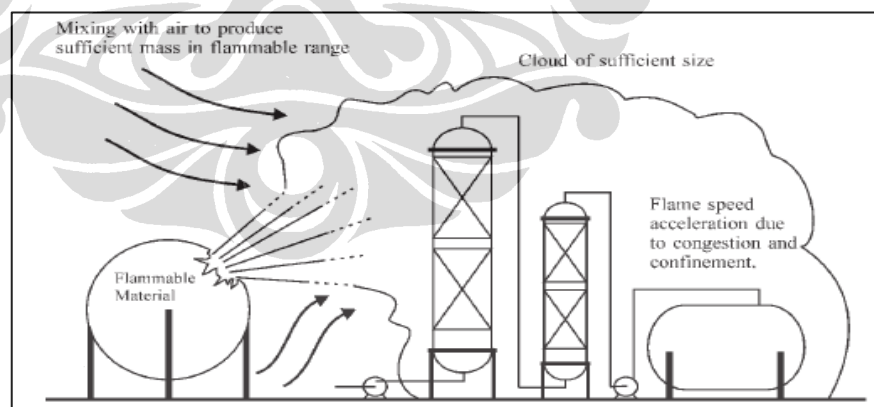
c. *Vapor Cloud Explosions (VCEs)*

*Vapor Cloud Explosions* atau VCEs merupakan salah satu bahaya ledakan yang paling serius dan cenderung sangat destruktif pada proses industri (Lees, 1996). Dulu, *vapor cloud explosions* lebih dikenal dengan nama *Unconfined Vapor Cloud Explosions (UVCE)*. Namun, istilah *confinement* (ruang tertutup) bertentangan dengan karakteristik VCE yang sejatinya terjadi pada area terbuka. Oleh karena itu, istilah *unconfined* dihilangkan dari terminologi VCE (Crowl, 2003).

VCE terjadi ketika sejumlah besar bocoran *flammable vapor* atau gas tercampur dengan udara luar dan terignisi sesudahnya (Crowl, 2003). Proses pembakaran yang terjadi dapat menimbulkan tekanan berlebih atau tidak sama sekali. Jika tidak terdapat tekanan, maka kejadian yang muncul adalah *vapor cloud fire* atau *flash fire*. Sedangkan jika terdapat tekanan, maka kejadian yang muncul adalah *vapor cloud explosion* (Lees, 1996)

Beberapa kondisi yang harus dipenuhi VCEs untuk menimbulkan kerusakan akibat tekanan berlebih (Crowl, 2003):

- a. Material yang terlepas harus *flammable*
- b. Material yang terlepas harus membentuk awan (*cloud*) dalam jumlah yang cukup sebelum terignisi
- c. *Vapor cloud* harus tercampur dengan udara untuk menghasilkan massa yang cukup dalam *flammable range* material tersebut.
- d. Kecepatan perambatan lidah api (*flame propagation*) harus dapat mempercepat pembakaran *vapor cloud*.



Gambar 2.5 Proses terjadinya *Vapor Cloud Explosions* (VCEs)

Sumber: Crowl (2003)

### 2.3.2.2 Uniform Reactions

*Uniform reactions* adalah reaksi yang terjadi secara serempak dari rangkaian reaksi. Contohnya adalah reaksi dalam *Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*. *Uniform reactions* dapat disebabkan oleh reaksi termal (*thermal reaction*) atau reaksi tak beraturan (*runaway reactions*). Reaksi tak beraturan (*runaway reactions*) terjadi ketika panas yang dilepaskan oleh reaksi melebihi panas yang hilang sehingga temperatur dan tekanan meningkat secara signifikan, cukup untuk merusak proses penyimpanan (Crowl, 2003).

## 2.4 Dampak Ledakan

Ledakan dapat melukai atau menghilangkan nyawa manusia dan merusak bangunan melalui beberapa cara, seperti radiasi pajanan panas, tekanan berlebih, puing reruntuhan yang beterbangan (Crowl, 2003). Ledakan juga dapat menimbulkan guncangan dan kawah (*crater*) atau cekungan pada tanah (Lees, 1996).

### 2.4.1 Pekerja

Dalam proses industri, pekerja dapat kehilangan nyawa atau mengalami cedera serius, baik disebabkan oleh ledakan maupun oleh pajanan radiasi panas sebagai efek samping ledakan. Dampak lain yang dapat mengancam pekerja adalah kehilangan pekerjaan.

### 2.4.2 Sistem Operasi

Bila terjadi dalam area industri, ledakan dapat menghancurkan atau merusak komponen – komponen penting dalam operasi pabrik. Dengan demikian, sistem operasi pabrik pun otomatis terhenti dan tidak dapat dijalankan.

### 2.4.3 Ekonomi

Terhentinya operasi pabrik mengakibatkan terhentinya proses produksi. Hal ini tentunya menambah jumlah kerugian yang diderita oleh

perusahaan disamping kerugian untuk memperbaiki bangunan atau biaya pengobatan pekerjanya. Terhentinya proses produksi juga menghambat pemenuhan permintaan klien perusahaan, sehingga lambat laun perusahaan tersebut akan ditinggalkan oleh kliennya.

#### 2.4.4 Sosial

Ledakan juga mengakibatkan hilangnya kepercayaan publik (Crowl, 2003). Pekerja yang kehilangan pekerjaannya belum tentu dapat segera diterima bekerja di tempat lain. Hal ini dapat meningkatkan jumlah pengangguran di masyarakat yang juga dapat memicu peningkatan tindak kriminalitas.

#### 2.4.5 Lingkungan

Lingkungan yang terkena ledakan dapat terganggu keseimbangan ekosistemnya dan menjadikan kehidupan alam tidak seimbang. Ledakan juga dapat menimbulkan cekungan pada tanah dan memusnahkan habitat makhluk hidup tertentu.

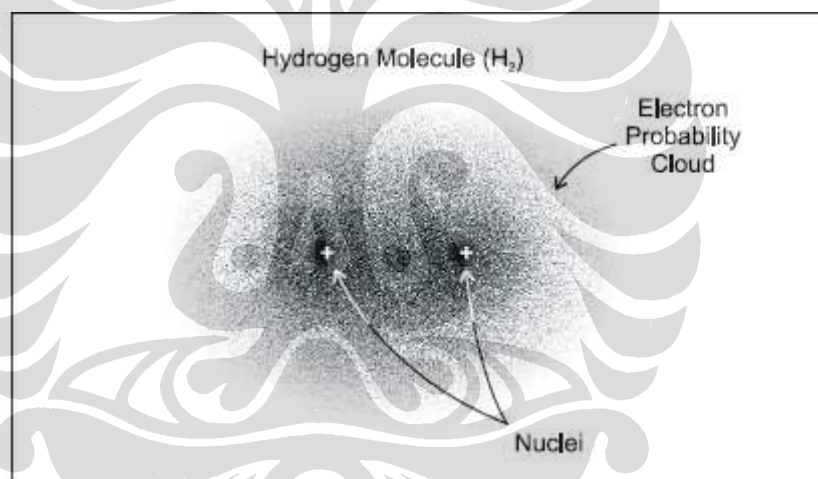
### 2.5 Hidrogen

Hidrogen merupakan elemen yang paling banyak terdapat dalam alam semesta, mengisi 75% massa dari semua zat pada bintang dan galaksi. Hidrogen merupakan bahan kimia yang paling sederhana dari semua elemen yang ada. Kita dapat membayangkan atom hidrogen sebagai sesuatu yang memiliki inti dengan satu orbit elektron yang mengelilinginya, sama seperti satu planet mengelilingi matahari (*College of the Dessert*, 2001).

Gas hidrogen tidak berbau, tidak berwarna dan tidak dapat dideteksi oleh indera manusia pada kondisi atmosferik. Oleh karena itu, ketidakmampuan ini dapat meningkatkan potensi terjadinya *asphyxia* pada manusia (Rigas&Sklavounos, 2008). Paparan hidrogen pada suatu material secara terus – menerus dapat menyebabkan terjadinya penggetasan (*embrittlement*). Penggetasan hidrogen dapat merusak logam maupun nonlogam, sehingga *container* penyimpanan

hidrogen sangat mungkin mengalami kebocoran bila didalamnya terjadi proses penggetasan (*College of the Dessert, 2001*).

Penggetasan hidrogen dilingkungan (*environmental hydrogen embrittlement*) dapat terjadi pada temperatur dalam *range* 200 - 300 °K (-73 °C - 27 °C). Sedangkan reaksi penggetasan hidrogen (*hydrogen reaction embrittlement*) dapat terjadi pada temperatur diatas temperatur ruangan (Rigas&Sklavounos, 2008). Hingga saat ini, belum diketahui secara pasti mekanisme yang menyebabkan terjadinya penggetasan hidrogen. Namun, beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat dan keparahan penggetasan hidrogen meliputi konsentrasi hidrogen, tekanan dan temperatur hidrogen, kemurnian hidrogen dan komposisi logam (*College of the Dessert, 2001*).



Gambar 2.6 Struktur Atom dari Molekul Hidrogen

Sumber : *College of the Dessert (2001)*

Pada kebanyakan atom hidrogen, inti atom terdiri atas satu proton, meski jarang membentuk *form* (atau isotop) hidrogen biasanya mengandung proton dan neutron. Bentuk hidrogen yang seperti ini disebut sebagai *deutrium* atau *heavy hydrogen*. Sebagian besar massa atom hidrogen terdapat pada intinya. Meski massa proton dan elektron sama, namun pada kenyataannya, proton 1800 kali lebih banyak dari jumlah elektronnya (*College of the Dessert, 2001*).

### 2.5.1 Karakteristik hidrogen

Berdasarkan sifat dasar pembentuknya, hidrogen termasuk ke dalam kategori hidrokarbon. Karakteristik utama dari hidrokarbon – termasuk hidrogen – yang mudah terbakar yang terkait dengan risiko kebakaran dan ledakan antara lain sebagai berikut (Nolan, 1996):

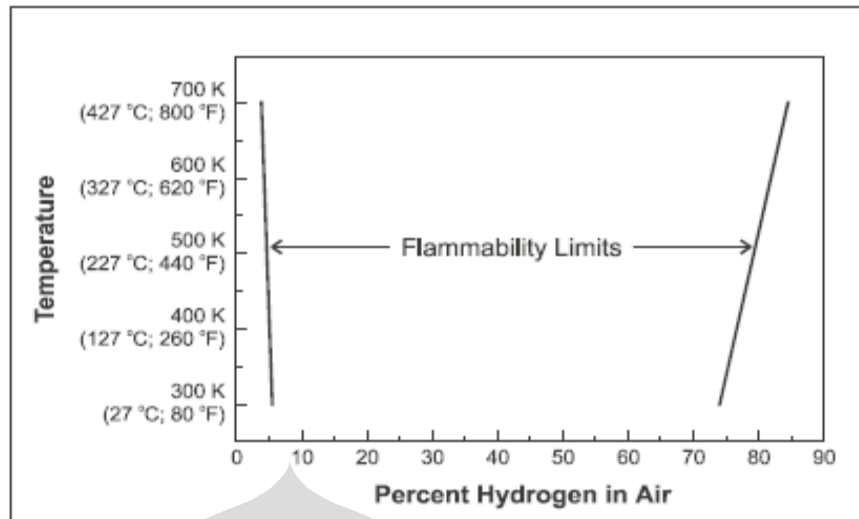
a. *Lower Explosive Limit* (LEL) atau *Upper Explosive Limit* (UEL)

LEL dan UEL adalah kisaran flamabilitas dari campuran uap atau gas dalam udara pada kondisi normal. Istilah *flammability limits* dan *explosive limits* adalah hal yang sama. Jika *range* antar kedua nilai besar, maka hidrokarbon tersebut relatif lebih berbahaya karena mempunyai kemungkinan lebih besar untuk terbakar dalam situasi tertentu. *Flammability limits* bukan sifat bawaan dari material, namun tergantung dari rasio permukaan terhadap volume dan kecepatan atau arah dari aliran udara.

Tabel 2.2 Hidrokarbon *Flammability Limits* (kondisi normal)

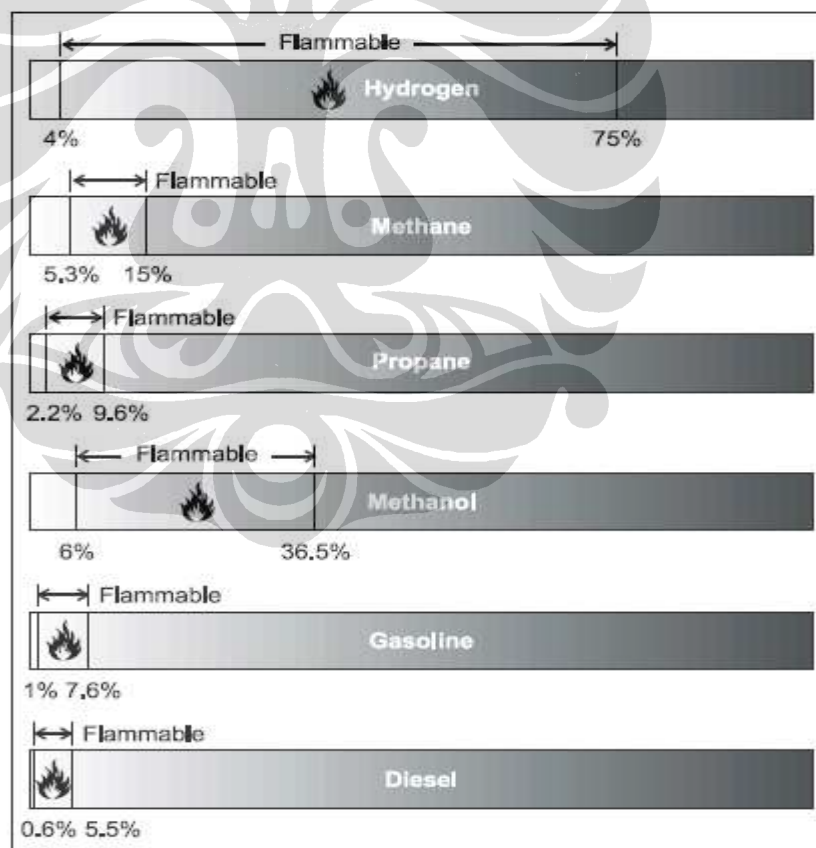
Material	% Range	Perbedaan
Hidrogen	4.0 – 75.6	71.6
Ethane	3.0 – 15.5	12.5
Methane	5.0 – 15.0	10.0
Propane	2.0 – 9.5	7.5
Butane	1.5 – 8.5	7.0
Pentane	1.4 – 8.0	6.6
Hexane	1.7 – 7.4	5.7
Heptane	1.1 – 6.7	5.6

Sumber : Nolan (1996)



Gambar 2.7. Variasi *Flammable Limits* dan Temperatur

Sumber : *College of the Dessert* ( 2001 )



Gambar 2.8 *Flammable Range*

Sumber : *College of the Dessert* ( 2001 )

b. *Flash Point* (FP)

*Flash point* adalah temperatur terendah bagi suatu cairan mudah terbakar untuk membentuk percampuran uap yang cukup diatas permukaan cairan atau di dalam bejana (*vessel*) yang digunakan. *Flash point* biasanya ditentukan dengan metode *open cup* atau *closed cup*, namun penelitian terakhir menunjukkan *higher* dan *lower flash point* juga tergantung dari luas permukaan dari sumber ignisi.

Tabel 2.3 Hidrokarbon *Flash Point* terendah  
(kondisi normal)

Material	Flash Point
Hidrogen	Gas
Ethane	Gas
Methane	Gas
Propane	Gas
Butane	-60 °C (-76 °F)
Pentane	< -40 °C (< -40 °F)
Hexane	-22 °C (-7 °F)
Heptane	-4 °C (25 °F)

Sumber : Nolan (1996)

c. *Autoignition Temperature* (AIT)

*Autoignition temperature* atau temperatur ignisi adalah temperatur minimum dimana suatu material menjadi panas dan



menyala atau dapat menyebabkan terbakar sendiri tanpa adanya sumber ignisi. Dua faktor yang paling signifikan dalam pengukuran AIT adalah rasio volume terhadap permukaan dari sumber ignisi. Temperatur ignisi harus dilihat sebagai nilai perkiraan dan bukan merupakan karakteristik pasti.

Tabel 2.4 AIT Hidrokarbon (kondisi normal)

Material	AIT
Heptane	204 °C (399 °F)
Hexane	225 °C (437 °F)
Pentane	260 °C (500 °F)
Butane	287 °C (550 °F)
Propane	450 °C (842 °F)
Ethane	427 °C (882 °F)
Hidrogen	500 °C (932 °F)
Methane	537 °C (999 °F)

Sumber : Nolan (1996)

d. Kerapatan Uap (*Vapor Density*)

Kerapatan uap adalah ukuran kerapatan uap atau gas murni relatif terhadap udara. Secara teknis, hal ini adalah berat uap per unit volume pada temperatur dan tekanan yang ditentukan. Uap dengan kerapatan uap lebih besar dari 1.0 berarti lebih berat dari udara dan akan mengikuti permukaan tanah hingga menghilang. Uap dengan kerapatan uap kurang dari 1.0 akan naik ke atmosfer,

semakin rendah kerapatannya maka akan semakin cepat naik ke atmosfer.

Tabel 2.5 *Vapor Density* Hidrokarbon (kondisi normal)

Material	Rasio Kerapatan Uap
Hidrogen	0.069
Ethane	0.554
Methane	1.035
Propane	1.56
Butane	2.01
Pentane	2.48
Hexane	2.97
Heptane	3.45

Sumber : Nolan (1996)

Tabel 2.6 Perbandingan Kerapatan pada fase *liquid* dan *vapor*

Substance	Vapor Density (at 68 °F; 20 °C, 1 atm)	Liquid Density (at normal boiling point, 1 atm)
Hydrogen	0.005229 lb/ft <sup>3</sup> (0.08376 kg/m <sup>3</sup> )	4.432 lb/ft <sup>3</sup> (70.8 kg/m <sup>3</sup> )
Methane	0.0406 lb/ft <sup>3</sup> (0.65 kg/m <sup>3</sup> )	26.4 lb/ft <sup>3</sup> (422.8 kg/m <sup>3</sup> )
Gasoline	0.275 lb/ft <sup>3</sup> (4.4 kg/m <sup>3</sup> )	43.7 lb/ft <sup>3</sup> (700 kg/m <sup>3</sup> )

Sumber : *College of the Desert* ( 2001)

e. Tekanan Uap

Tekanan uap adalah properti yang menunjukkan kemudahan suatu material untuk menguap.

f. *Specific Gravity*

*Specific gravity* adalah rasio berat dengan volume yang sama dari suatu material terhadap bahan lain yang biasanya air. Gas hidrogen dengan kerapatan sebesar  $0.00523 \text{ lb/ft}^3$  memiliki *specific gravity* sebesar 0.0696 atau hanya sekitar 7% dari kerapatan udara ( $0.0751 \text{ lb/ft}^3$ ;  $1.203 \text{ kg/m}^3$ ). Sedangkan untuk hidrogen cair dengan kerapatan sebesar  $4.432 \text{ lb/ft}^3$  memiliki *specific gravity* sebesar 0.0708 atau hanya sekitar 7% dari kerapatan air ( $62.4 \text{ lb/ft}^3$ ;  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) (*College of the Desert*, 2001).

g. *Heat of Combustion*

*Heat of combustion* didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan ketika satu satuan kuantitas sebuah material teoksidasi secara sempurna.

Tabel 2.7 Perbandingan Properti Hidrogen, Metana dan Gasoline

Property	Value			References
	Hydrogen	Methane	Gasoline	
Heat of combustion (low) (kJ/g)	119.93	50.02	44.50	17,20
	119.70	46.72	44.79	10,19
Heat of combustion (high) (kJ/g)	141.86	55.53	48.00	17,20
	141.70	52.68	48.29	19
Flammability limits in NTP air (vol%)	4.0-75.0	5.3-15.0	1.0-7.6	17-20
			1.2-6.0	
Flammability limits in NTP oxygen (vol%)	4.1-94.0	—	—	17
Detonability limits in NTP air (vol%)	18.3-59.0	6.3-13.5	1.1-3.3	17,18,20,21
	13.5-70.0	—	—	
Detonability limits in NTP oxygen (vol%)	15-90	—	—	17
Stoichiometric composition in air (vol%)	29.53	9.48	1.76	17,20
Minimum ignition energy in air (mJ)	0.017	0.29	0.24	17,20
	0.02	0.28	0.25	8,19,20
	0.14	—	0.024	—
Autoignition temperature (K)	858	813	501-744	17,19,20
			500-750	
Adiabatic flame temperature in air (K)	2318	2148	~2470	17-20
		2190		
Thermal energy radiated from flame to surroundings (%)	17-25	23-33	30-42	17,18,20
Burning velocity in NTP air (cm/s)	265-325	37-45	37-43	17,20
Detonation velocity in NTP air (km/s)	1.48-2.15	1.39-1.64	1.40-1.70	17,20
Energy of stoichiometric mixture in NTP air (MJ/m <sup>3</sup> )	3.58	3.58	3.91	22
Diffusion coefficient in NTP air (cm <sup>2</sup> /s)	0.61	0.16	0.05	17,18,20
Buoyant velocity in NTP air (m/s)	1.2-9.0	0.8-6.0	Nonbuoyant	17,20
Limiting oxygen index (vol%)	5.0	12.1	11.6	20
Maximum experimental safe gap in NTP air (cm)	0.008	0.12	0.07	17,20
Quenching gap in NTP air (cm)	0.064	0.203	0.200	17,19,20
Detonation induction distance in NTP air	L/D ~100	—	—	20

Sumber : Rigas & Sklavounos (2008)

### 2.5.2 Hydrogen Attack (Appl, 1999)

#### a. Chemical Hydrogen Attack

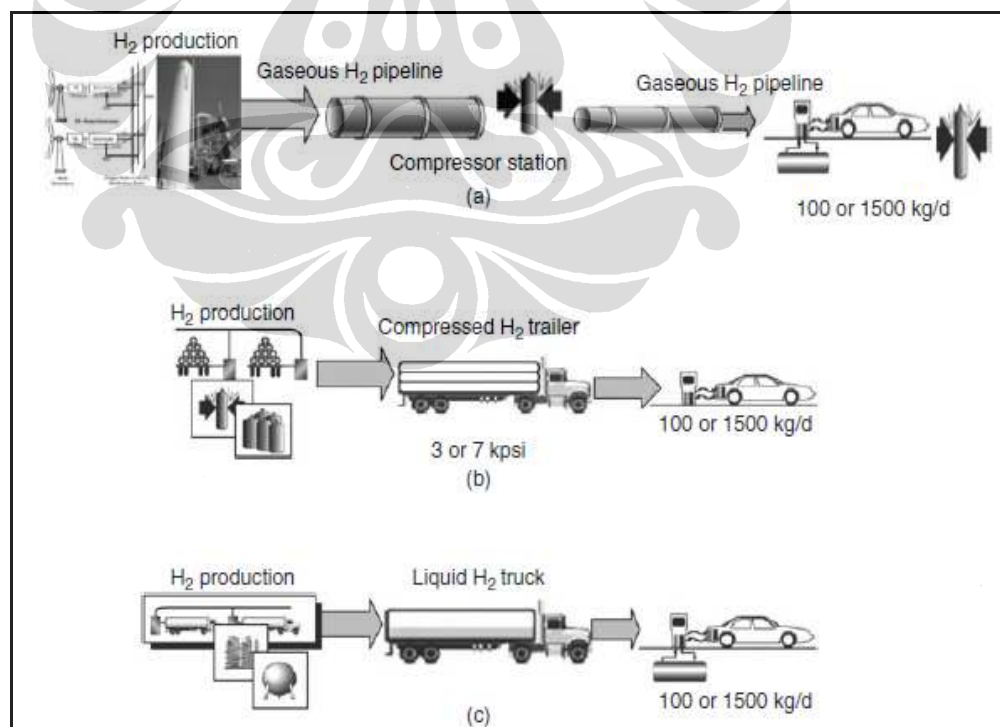
Pada kondisi tertentu, *chemical hydrogen attack* mungkin saja terjadi. Hidrogen berdifusi ke dalam baja, bereaksi dengan karbon yang merupakan komponen inti material baja, menghasilkan metana (CH<sub>4</sub>) dengan molekul yang lebih besar. Hal ini dapat merapuhkan baja karena molekul tersebut terperangkap dan menimbulkan rongga-rongga yang mengurangi kerapatan bahan sehingga kekuatan baja pun lambat laun ikut berkurang. Risiko ini baru dapat terjadi ketika temperatur dalam material mencapai 200 °C.

*b. Physical Hydrogen Attack*

Fenomena serupa adalah *physical hydrogen attack* yang biasanya terjadi bersamaan dengan *chemical hydrogen attack*. Hal ini terjadi ketika molekul hidrogen yang terserap pada temperatur tinggi, terurai menjadi atom hidrogen dan menyebar ke dalam struktur material. Fenomena ini lebih dikenal dengan nama *hydrogen embrittlement* (penggetasan hidrogen).

### 2.5.3 Transportasi Hidrogen (Gao&Krishnamurthy, 2008)

Terdapat tiga pilihan utama untuk mengangkut hidrogen, yaitu dengan menggunakan pipa, menggunakan *trailer* (truk bertanki) atau melalui zat lain dengan konsep *high-energy-density*. Penelitian telah menunjukkan bahwa jaringan perpipaan lebih efektif dan efisien untuk memindahkan hidrogen dalam jumlah besar dengan jarak tempuh yang cukup jauh.

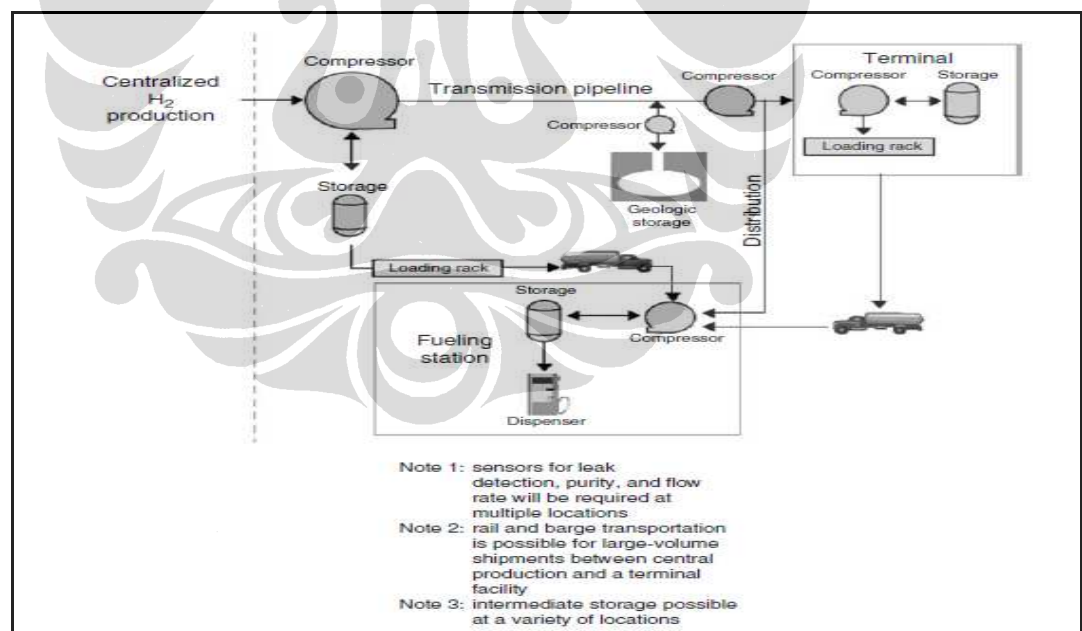


Gambar 2.7 Ilustrasi Transportasi Hidrogen

Sumber : Gao & Krishnamurthy (2008)

Beberapa hal yang perlu diperhatikan ketika memilih pipa sebagai sarana transportasi hidrogen:

- a. Investasi modal awal yang besar, keuntungan menggunakan pipa sebagai sarana transportasi hidrogen secara efektif dan efisien. Keuntungan ini sebanding dengan biaya pembangunan awal instalasi pipa yang cukup besar.
- b. Ancaman penggetasan hidrogen (*hydrogen embrittlement*), hidrogen yang melalui pipa biasanya berada pada tekanan yang sangat tinggi, sehingga pemilihan material pipa yang dapat menahan penggetasan hidrogen harus benar – benar diperhatikan.
- c. Ancaman kebocoran hidrogen dan sistem detektor gas.
- d. Kompresi hidrogen.



Gambar 2.8 Jalur Transportasi Hidrogen dengan menggunakan Pipa dan Truk Tanki

Sumber : Gao & Krishnamurthy (2008)

#### 2.5.4 Hidrogen *safety* (Rigas&Sklavounos, 2008)

Berikut ini merupakan panduan untuk menjamin keselamatan penyimpanan dan transfer hidrogen. Pencahayaan yang baik, perlindungan dari petir, sistem alarm dan detektor gas merupakan komponen yang sebaiknya dipasang pada instalasi pabrik.

- a. Pertimbangan atas kelistrikan, area dimana campuran *flammable* hidrogen dapat terjadi, area dimana terdapat penyimpanan atau transfer hidrogen harus diklasifikasikan sebagai area berbahaya. Semua sumber ignisi yang berasal dari listrik harus dilarang pada area ini.
- b. Pertimbangan atas transfer hidrogen, semua instalasi yang digunakan sebagai tempat penyimpanan maupun sebagai jalur perpindahan hidrogen harus dipasang diatas permukaan tanah.
- c. Eliminasi sumber ignisi, instalasi yang mengandung hidrogen harus dilindungi dari sambaran petir dengan menggunakan penangkal petir. Petir juga dapat menimbulkan percikan api sehingga akan lebih baik jika instalasi langsung menempel ke tanah.
- d. Pertimbangan atas disain dan konstruksi bangunan, material bangunan harus dibuat dari bahan yang tidak mudah terbakar dengan spesifikasi yang memadai.
- e. Penghalang (*barricade*) sebaiknya dipasang disekitar area yang mengandung hidrogen, sehingga dapat melindungi area lain bila terjadi kerusakan pada instalasi hidrogen.

Tabel 2.8 Kasus Ledakan Gas Hidrogen jenis VCEs (diolah kembali)

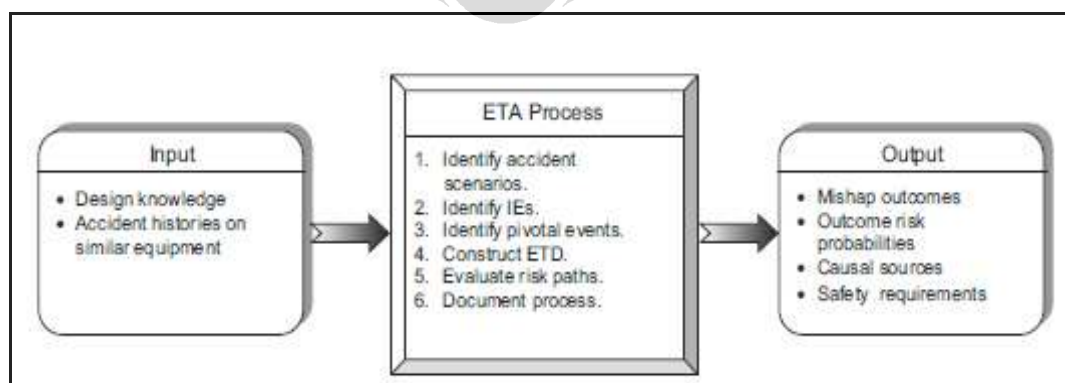
Waktu Kejadian	Lokasi	Jumlah massa yang terlepas (te)	Persamaan TNV
1964	<i>Jackass Flats</i> , Nevada.	0.09	0.027
1975	<i>Watson</i> , California.	0.3	0.018
1984	<i>Sarnia</i> , Ontario	0.03	0.91

Sumber : Lees (1996)

## 2.6 Analisis Pohon Kejadian (*Event Tree Analysis*) (Ericson, 2005)

Analisis Pohon Kejadian (*Event Tree Analysis*) adalah teknik analisis untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi urutan kejadian berdasarkan potensi skenario kecelakaan yang mungkin terjadi karena adanya kejadian pemicu (*initiating event*). Tujuan ETA adalah untuk menentukan apakah sebuah *initiating event* akan menjadi sebuah *mishap* atau dapat dikendalikan oleh serangkaian sistem proteksi yang tersedia.

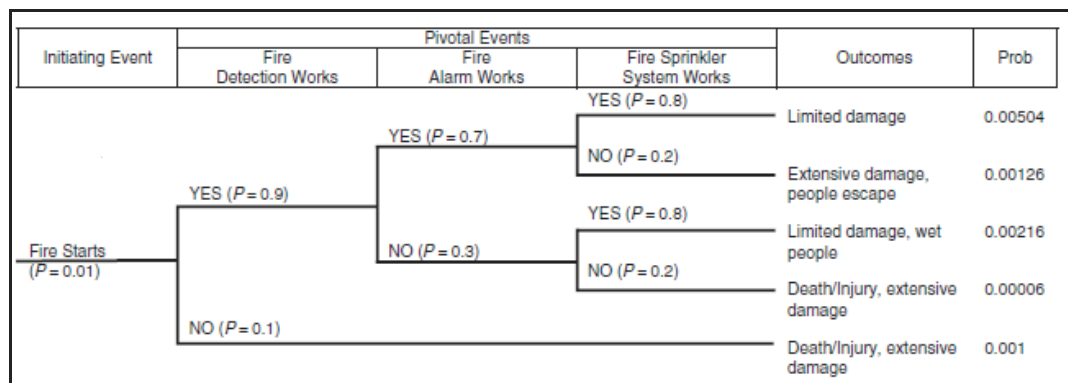
Secara sederhana, proses pembuatan ETA adalah sebagai berikut:



Gambar 2.9 ETA Overview

Sumber : Ericson (2005)





Gambar 2.10 Contoh ETA

Sumber : Ericson (2005)

Step	Task	Description
1	Define the system.	Examine the system and define the system boundaries, subsystems, and interfaces.
2	Identify the accident scenarios.	Perform a system assessment or hazard analysis to identify the system hazards and accident scenarios existing within the system design.
3	Identify the initiating events.	Refine the hazard analysis to identify the significant IEs in the accident scenarios. IEs include events such as fire, collision, explosion, pipe break, toxic release, etc.
4	Identify the pivotal events.	Identify the safety barriers or countermeasures involved with the particular scenario that are intended to preclude a mishap.
5	Build the event tree diagram.	Construct the logical ETD, starting with the IE, then the PEs, and completing with the outcomes of each path.
6	Obtain the failure event probabilities.	Obtain or compute the failure probabilities for the PEs on the ETD. It may be necessary to use FTs to determine how a PE can fail and to obtain the probability.
7	Identify the outcome risk.	Compute the outcome risk for each path in the ETD.
8	Evaluate the outcome risk.	Evaluate the outcome risk of each path and determine if the risk is acceptable.
9	Recommend corrective action.	If the outcome risk of a path is not acceptable, develop design strategies to change the risk.
10	Document ETA.	Document the entire ETA process on the ETDs. Update for new information as necessary.

Tabel 2.9 Proses ETA

Sumber: Ericson (2005)

Analisis Pohon Kejadian (*Event Tree Analysis*) memiliki beberapa keunggulan dan kelemahan, sebagaimana dapat dilihat pada tabel berikut:

Keunggulan	Kelemahan
1. Terstruktur, teliti dengan pendekatan yang metadis	1. Sebuah ETA hanya dapat menggunakan satu <i>initiating event</i>
2. Sebagian besar analisis dapat menggunakan computer	2. Memerlukan analis atau orang yang sudah berpengalaman
3. Efektif	3. Kegagalan maupun kesuksesan parsial tidak dapat dibedakan
4. Relative mudah dipelajari, dilakukan dan diikuti.	4. ETA dapat mengabaikan ketergantungan sistem ketika memodelkan sebuah kejadian.
5. Model visual dapat menunjukkan keterkaitan antara penyebab dan akibatnya	
6. Memodelkan hubungan dalam sistem yang begitu kompleks sehingga dapat dipahami	
7. Mengikuti alur kesalahan dalam batasan sistem	
8. Menggabungkan interaksi antara <i>hardware, software</i> , lingkungan dan manusia	
9. Dapat menggunakan <i>probability assessment</i>	
10. Tersedia <i>software</i> ETA	

Tabel 2.10 Keunggulan dan Kelemahan ETA

Sumber: Ericson (2005)

## 2.7 Proses Produksi di PT Pupuk Kujang Cikampek

Produk utama dari PT Pupuk Kujang Cikampek adalah amonia dan pupuk urea. Untuk mendapatkan amonia dan pupuk urea, maka PT Pupuk Kujang Cikampek membangun pabrik dengan instalasi sebagai berikut:

### 2.7.1 Pabrik *Utility*

Pabrik ini berfungsi untuk memproduksi bahan pembantu (utilitas) untuk memenuhi kebutuhan proses produksi pabrik-pabrik lainnya. Proses produksi yang dijalankan yaitu penjernihan dan pengolahan air (*water*

*treatment*), pembangkit dan distribusi listrik, pembangkit uap air (*steam*) penyediaan udara pabrik (*plant air*), dan udara instrument (*instrument air*).

Pabrik ini berfungsi menyediakan kebutuhan untuk proses di unit-unit produksi lainnya. Pabrik ini terdiri dari tujuh unit, yaitu:

a. *Unit pengolahan air*

Sumber air yang digunakan untuk keperluan pabrik diambil dari stasiun pompa air di Parungkadali-Bendungan Curug dan sungai Cikao di hilir Bendungan Jati Luhur. Sebelum digunakan, air tersebut diolah terlebih dahulu karena masih mengandung partikel-partikel, lumpur dan kotoran lain.

Pengolahan diawali dengan memasukkan air ke *premix tank* kemudian ditambahkan bahan-bahan kimia dan diaduk dengan menggunakan *agitator* (pengaduk). Bahan-bahan kimia yang ditambahkan adalah:

1. Alumunium sulfat ( $\text{Al}_2\text{SO}_4$ ), yang berfungsi sebagai *flokulan*
2. *Coagulan aid*, untuk mengumpulkan kotoran
3. *Caustic soda* (NaOH), sebagai pengatur PH
4. Kalsium Hipoklorit atau klorin cair ( $\text{O}_2$ ), sebagai disinfektan

Selanjutnya air dialirkan ke *clarifier* dan diaduk dengan putaran rendah agar kotoran yang terbawa mengendap oleh gaya gravitasi. Endapan lumpur yang terbentuk akan di *blow-down* sedangkan air yang *over flow* dialirkan ke *clearwell*. Dalam aliran *clearwell* ditambahkan larutan soda agar PH-nya netral. *Clearwell* juga berfungsi sebagai tempat penampungan sementara sebelum air dimasukkan ke *sand filter* (dengan cara dipompakan) yang merupakan penyaring dengan media pasir untuk menghilangkan kotoran-kotoran yang tidak mengendap di *clarifier*.

Air dari *sand filter* dibagi menjadi dua yang ditampung dalam dua buah tangki:

- *Portable water storage tank* yang menampung air untuk keperluan sehari-hari dipabrik dan perumahan. Air dalam tanki ini ditambahkan klorin sebagai desinfeksi

- *Filtered water storage tank* yang menampung air untuk keperluan air *hydrant*, air pendingin (*cooling water*) dan *service water* lainnya. Untuk menghilangkan klorin, bau dan warnanya, maka air ini dimasukkan ke karbon *filter* yang berisi karbon aktif pH air ini diharapkan berkisar antara 7 - 7,5.

b. *Unit demineralisasi*

Air yang digunakan dalam proses produksi adalah air yang tidak mengandung mineral. Kandungan mineral yang harus dihilangkan diantaranya adalah  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  dan  $\text{Cl}^-$ .

Air dari *filtered water storage tank* dimadukan ke *cation exchanger* yang berisi resin, untuk menghilangkan kandungan ion-ion positifnya sehingga air yang dihasilkan bersifat asam dengan pH 3,2-3,3. Jika resinya sudah jenuh (ditandai dengan pH air yang melebihi batas) maka dilakukan regenerasi dengan menambahkan asam sulfat.

Dari *cation exchanger*, air dimasukkan ke *anion exchanger* untuk menghilangkan ion-ion negatif agar pH air berkisar antara 8,6-8,9. Regenerasi dilakukan dengan menambahkan NaOH (*caustic soda*).

Untuk penyempurnaan *demineralisasi*, maka digunakan *mixed bed polisher* yang berisis tresin penukar kation dan anion agar air yang keluar memiliki pH 6,1-6,2 yang ditampung di *demineralized water storage tank* (terdapat dua buah) sebelum dialirkan ke unit pembangkit *steam*.

c. *Unit pembangkit steam*

Sebelum diumpun ke *boiler* air yang berasal dari *demineralized water storage tank* harus diolah dulu untuk menghilangkan gas-gasnya. Gas-gas yang dihilangkan adalah  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  yang dapat menyebabkan korosi.

Menghilangkan gas ini dilakukan dengan cara *stripping* menggunakan *steam* bertekanan rendah dengan alat yang disebut *deaerator* ditambahkan dengan:

- Larutan amonia untuk meningkatkan pH air
- Hidrazin, untuk mengikat  $\text{O}_2$

- Fosfat, untuk mencegah terbentuknya kerak

Air yang keluar dari *deaerator* mempunyai pH 8,5 – 9,5. Sebelum dimasukkan ke *boiler*, air dipompa hingga tekanannya mencapai 52 kg/cm<sup>2</sup>.

Baru kemudian dimasukkan ke *steam drum (boiler)*, hasilnya adalah *super heated steam* dengan tekanan 42 kg/cm<sup>2</sup>, sebanyak 174 ton, yang dikirim ke pabrik amonia, pabrik urea, anak perusahaan dan untuk di utility sendiri.

#### d. Unit pengolahan air pendingin

Air dari *filter water storage tank* diumpankan ke *cold basin*. Kemudian ditambahkan:

- Asam sulfat, sebagai pengatur pH
- PO<sub>4</sub> untuk mencegah timbulnya kerak
- Morin untuk membunuh mikroorganisme
- Betz 2020 untuk mencegah pengendapan

Penambahan ini adalah untuk memenuhi syarat-syarat air pendingin, syarat-syarat tersebut yaitu tidak menyebabkan korosi, tidak menimbulkan kerak, tidak mengandung mikroorganisme yang menimbulkan lumut.

Air dari *cold basin* digunakan untuk *heat exchanger* (gas proses) yang menghasilkan limbah air temperature tinggi (*hot water*). *Hot water* ini didinginkan kembali dengan cara mengirimnya ke *cooling tower* bagian atas dan air akan jatuh ke *cold basin* yang kemudian ditambahkan bahan-bahan kimia dan airnya digunakan kembali.

#### e. Unit pembangkit listrik

Alat pembangkit listrik yang digunakan adalah *gas turbine generator hitachi*. Alat ini merupakan sumber listrik yang utama yang pada kondisi normal membutuhkan gas alam sebanyak 3700 Nm<sup>3</sup>/jam, listrik yang dihasilkan adalah 15 Megawatt. Selain pembangkit listrik utama, juga

terdapat tiga unit *diesel standby generator* dengan kapasitas 750 KW/unit dan satu unit *diesel emergency generator* dengan kapasitas 375 KW

f. *Unit pengolahan udara pabrik dan udara instrument*

Udara instrument adalah udara yang bebas air (H<sub>2</sub>O) yang digunakan untuk penggerakan alat-alat instrumentasi (*pneumatic*), sedangkan udara pabrik adalah udara yang masih mengandung air.

Proses untuk udara pabrik yaitu udara bebas dikompresi hingga minimal 3,5 kg/cm<sup>2</sup>. Sedangkan untuk udara instrument yaitu udara bebas dikompresi kemudian dikeringkan dengan menggunakan bahan penyerap air seperti *molsieve* atau *silica gel*. Udara yang telah kering tersebut masuk ke filter untuk menyaring debu, oli dan partikel-partikel lain baru dikirim ke pabrik amonia, pabrik urea dan pabrik pemurnian CO.

g. *Unit pengolahan air buangan*

Limbah cair dari pabrik perlu diolah terlebih dahulu untuk menghilangkan zat-zat yang dapat mencemari lingkungan. Limbah cair yang dihasilkan pabrik yaitu :

- Air sisa regenerasi resin yang bersifat asam dan basa
- Air buangan sanitasi
- Air yang mengandung minyak dari pompa-pompa dan compressor
- Air dari *clarifier* dan *sand filter* yang mengandung lumpur yang di *blown down* dari *clarifier*.
- Proses kondensat yang mengandung amonia.

Air sisa regenerasi bersifat asam dan basa, karena pada regenerasi resin digunakan asam sulfat dan *caustic soda*, sehingga perlu dinetralisasi dalam kolam sebelum dibuang. Air yang keluar dari kolam ini diharapkan pH-nya sekitar 6,9 – 7,2 dan tidak berbahaya bagi lingkungan. Air buangan sanitasi yang berasal dari seluruh toilet di kawasan pabrik dikumpulkan dan diolah dalam unit sanitasi dengan menggunakan lumpur aktif dan klorin.

Air yang mengandung minyak berasal dari buangan pelumas pada pompa, kompresor dan alat-alat lain. Limbah ini diolah dalam *Oily Water Separator* yang bekerja dengan memanfaatkan perbedaan berat jenis air dan minyak. Minyak berada diatas karena memiliki berat jenis yang lebih kecil, dikirim ke Burning Pit untuk dibakar. Sedangkan air berada dibawah dikeluarkan melalui bagian bawah separator dan dikirim ke kolam penampungan.

Sebelum dialirkan ke sungai, air berlumpur yang berasal dari *clarifier* dan *sand filter* perlu diendapkan dulu dalam kolam pengendapan. Pada kolam ini lumpur akan mengendap sedangkan airnya akan dialirkan ke sungai.

Air yang mengandung amonia diolah di *ammonia removal*. Air masuk dari puncak kolam, sedangkan dari bawah kolam dialirkan *steam* bertekanan rendah untuk menstripping amonia. *Steam* yang mengandung amonia dibuang melalui bagian atas menara sedangkan air yang sudah tidak mengandung amonia dapat langsung dibuang ke sungai.

Semua air buangan yang telah diolah dikumpulkan dalam suatu tempat penampungan yang disebut *equalization pond*. Sebelum dibuang ke sungai Cikaranggalam yang sebelumnya dilakukan analisa terlebih dahulu.

### 2.7.2 Pabrik Amonia

Pabrik amonia adalah pabrik yang menghasilkan produk amonia ( $\text{NH}_3$ ) dan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dengan bahan baku gas alam ( $\text{CH}_4$ ) udara ( $\text{N}_2$ ) dan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Proses pembuatan amonia dapat dikelompokkan menjadi tiga cara proses, yaitu proses oksidasi parsial, proses elektrolisa dan proses *steam reforming*.

Proses oksidasi parsial digunakan bila umpan proses lebih berat dari nafta, contohnya adalah batubara. Proses ini dikembangkan oleh perusahaan Texaco, Shell dan Koppers-Totzek. Proses ini dianggap efisien karena tidak ada gas yang terbuang sebagai hasil sampingan.

Proses elektrolisa adalah proses yang menggunakan air sebagai umpan proses yang utama. Elektrolisa air menghasilkan hidrogen yang dapat

digunakan sebagai bahan baku pembuatan pupuk. Proses ini paling cocok digunakan pada daerah yang listriknya murah.

Proses yang digunakan oleh PT Pupuk Kujang Cikampek adalah proses *steam reforming* dari *Kellog Overseas Corporation* (KOC) yang secara garis besar prosesnya bisa dijelaskan secara singkat sebagai berikut (UNIDO&IFDC, 1979; Appl, 1999):

Gas alam dari Pertamina dimasukkan ke unit pemurnian bahan baku untuk membuang dan memisahkan gas atau bahan yang bersifat racun seperti sulfur dan merkuri.

Hasil dari proses ini diteruskan ke *primary reformer* yang direaksikan dengan uap air dan udara sehingga terbentuk gas sintesa kasar. Gas sintesa kasar diolah lebih lanjut melalui *high temperature shift converter*, dilanjutkan ke *low temperature shift converter* dan selanjutnya dimasukkan ke penyerap carbondioksida. Gas CO<sub>2</sub> dikirim ke pabrik Urea, sedangkan gas sintesa dikirim ke unit Metanasi yang berfungsi untuk merubah sisa oksida menjadi Metana.

Gas sintesa bersih dari *methanator* diteruskan ke *ammonia converter* (pembuat amonia) dan menghasilkan amonia. Hasil keluaran ini dikirim ke pabrik Urea dan kelebihanannya disimpan di tanki penyimpanan amonia (*Amonia storage*) untuk dijual.

Proses yang berlangsung di pabrik amonia adalah mereaksikan gas alam, udara dan uap air menjadi amonia (NH<sub>3</sub>) selain itu juga dihasilkan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan Hidrogen (H<sub>2</sub>). Pabrik ini memiliki lima unit proses, yaitu:

a. *Unit desulfurisasi*

Gas alam yang digunakan oleh PT. Pupuk Kujang, diambil dari beberapa sumber. Seperti, *offshore* Arco, L.Parigi-pantai Cilamaya dan Mundu-Indramayu. Dari semua sumber tersebut komposisi yang terkandung dalam gas alam berbeda-beda, sedangkan senyawa yang dibutuhkan untuk proses pembuatan amonia adalah *metana* (CH<sub>4</sub>) sehingga senyawa *impurities* yang terkandung dalam gas alam tersebut



harus dihilangkan (dimurnikan). Proses pemurnian gas alam ini dilakukan di unit desulfurisasi.

Gas alam yang masuk ke pabrik, mula-mula dimasukkan ke *knock out drum* 116-F pada tekanan  $14,7 \text{ kg/cm}^2$  agar partikel halus dan tetes cairan terpisah, lalu hasil tersebut dibagi dua, sebagian digunakan sebagai bahan bakar di *auxiliary boiler* dan *start up preheater*. Sedangkan sebagian lagi lokasinya berada diluar pabrik (*butterfence*) unsur-unsur minor yang terkandung dalam suatu bahan lagi dimurnikan lebih lanjut di *Zinc Oxyde Guard Chamber* 108-D untuk gas proses.

Penghilangan *Mercury* diperlukan karena dapat meracuni katalistor pada proses berikutnya. Penghilangan mercury dilakukan di *Mercury Guard Chamber* dengan cara mengimpregnasikan gas pada karbon aktif. Dari sini tekanan gas yang keluar belum cukup tinggi untuk mengalir ke proses berikutnya sehingga gas ditekan dalam *Feet Gas Compressor* 102-J yang menghasilkan tekanan gas sebesar  $43 \text{ kg/cm}^2$  dengan temperatur  $146^\circ\text{C}$ .

Belerang (S) merupakan racun bagi katalis di *Primary Reformer* dan *Secondary Reformer*. Penghilangan tahap satu terjadi di *Cobalt-Moly Hydrotreater* 101-D dimana belerang direaksikan dengan hidrogen dan menghasilkan  $\text{H}_2\text{S}$ . tahap dua terjadi di 108-D yang berisi katalis  $\text{ZnO}$  reaksi yang terjadi antara  $\text{H}_2\text{S}$  dengan  $\text{ZnO}$  menghasilkan  $\text{ZnS}$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  (Air). Temperatur gas yang keluar sekitar  $391^\circ\text{C}$  dengan tekanan  $37,7 \text{ Kg/Cm}^2$  selanjutnya gas diumpan ke *mixfeed primary reformer*.

## b. Unit Reforming

### 1. Primary reformer

Reaksi yang terjadi *primary reformer* 101-D adalah reaksi pembentukan  $\text{H}_2$  dari senyawa hidrokarbon dan *steam*. Gas alam yang keluar dari 108-D dicampur dengan *steam* dan dipanaskan di *mixfeed preheater coil*, hasilnya adalah gas dengan temperatur  $483^\circ\text{C}$  dan tekanan  $36,8 \text{ kg/cm}^2$ . Di *primary reformer* terdapat sembilan baris *tube*

katalis dengan 42 *tube* setiap barisnya. Katalis yang dipakai *nikel oksida*.

Gas yang bereaksi melalui *tube* akan keluar melalui bagian bawah *tube* dan disatukan dalam *riser* yang kemudian dikirim ke *secondary reformer* 103-D melalui *transfer line*. Temperatur gas yang keluar sekitar 810-815°C dan tekanan 32,5kg/cm<sup>2</sup> dan diharapkan gas CH<sub>4</sub> yang lolos kurang dari 1%.

## 2. *Secondary reformer*

*Secondary reformer* terbagi atas dua, yaitu bagian atas adalah *mixing zone* atau *combustion zone* dan bagian bawah disebut *reaction zone* yang berupa *packbed katalist nickel oxyde*. Gas proses dan campuran udara steam masuk ke *secondary reformer* secara terpisah dari bagian atas dan dicampur dalam *mixing zine* sehingga terjadi pembakaran yang menghasilkan panas yang digunakan untuk reaksi *reforming* di *bed kalatis*.

Temperatur gas di *bed* pertama sekitar 1100-1200°C dengan tekanan 32,5kg/cm<sup>2</sup> sampai di *bed* ketiga temperaturnya sekitar 872°C dengan tekanan 31,5kg/cm<sup>2</sup>. Kadar CH<sub>4</sub> dalam gas yang keluar dari *secondary reformer* hanya 0,3%.

## c. *Unit pemurnian gas proses*

Unit ini berfungsi untuk mengubah CO menjadi CO<sub>2</sub>, proses perubahan terjadi di *shift converter* 104-D. *Shift converter* dibagi dua, bagian atas disebut *High Temperature Shift Converter* (HTS) dan bagian bawah disebut *Low Temperature Shift Converter* (LTS). HTS berfungsi untuk mempercepat reaksi dengan bantuan katalis FeCr yang berbentuk tablet. Gas yang keluar dari sini temperaturnya 433 °C dan tekanan 30,3 kg/cm<sup>2</sup>.

LTS berfungsi untuk memperbesar konversi katalis Cu. Gas yang keluar temperaturnya 232°C dan tekanannya 28,8 kg/cm<sup>2</sup>. Gas ini selanjutnya dikirim ke unit penyerapan CO<sub>2</sub>.

### ***Pemurnian Karbon Monoksida (CO)***

#### ➤ Penyerapan gas CO<sub>2</sub>

Bahan baku pabrik ini berasal dari *secondary reformer* pabrik amonia. Proses pemurnian CO dimulai dengan pemisahan gas CO kemudian dilakukan pengeringan untuk menghilangkan kadar air. Gas CO diserap oleh larutan *cosorb* kemudian dipisahkan dan dikirim ke PT Sintas Kurama Perdana sebagai bahan baku pembuatan asam semut (asam formiat). Gas sisa yang tidak terserap oleh larutan *cosorb* akan dikompresi dan dimurnikan kemudian dikirim ke pabrik amonia kembali.

Bahan baku yang diperlukan di pabrik pemurnian karbon monoksida adalah gas proses yang berasal dari *secondary reformer* pabrik amonia.

Prosesnya dimulai dengan pemisahan atau penghilangan kandungan air (H<sub>2</sub>O) dari gas proses dengan cara dipanaskan. Gas proses masuk ke *vessel* untuk diserap CO<sub>2</sub>-nya dengan menggunakan *steam*, kemudian didinginkan sehingga airnya akan terkondensat. *Vessel* yang berisi *molsieve* digunakan untuk menyerap air. Kadar air yang diharuskan adalah 0,1 ppm karena dalam proses bila terdapat kandungan air akan mengakibatkan racun pada larutan *cosorb* jika bercampur dengan air (H<sub>2</sub>O) akan terbentuk asam klorida (HCl) yang bersifat korosif.

Dalam proses penyerapan CO<sub>2</sub> digunakan larutan *cosorb* dan gas toluene sebagai bahan pembantu. Pada proses penyerapan CO, masih terkandung gas inert (N<sub>2</sub> dan lain-lain) sehingga harus dibuang dengan cara di *flushing*. Temperatur yang diperlukan dalam proses absorpsi Co adalah 335 °C dengan tekanan 25 kg/cm<sup>2</sup>.

Gas yang tidak terserap berupa CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> dikirim ke pabrik amonia untuk digunakan dalam proses. Gas hasil pemurnian CO dikompresikan untuk dikirim ke PT Sintas Kurama Perdana sebagai bahan baku pembuatan asam semut (asam formiat).

Larutan penyerap yang digunakan adalah *benfield*. Larutan *benfield* terdiri dari:

1. kalium karbonat ( $K_2CO_3$ ) yang berfungsi sebagai *absorbent* dan *deabsorber*  $CO_2$
2. diethanol amin (DEA) sebagai aktivator
3. kalium fanadat ( $KVO_3$ ) dimana  $V^{5+}$  nya berfungsi untuk melapisi permukaan menara absorber dan menjadi *corrosion inhibitor* (penghambat terjadinya korosi).
4. Ucon sebagai anti *foam*

Larutan *Benfield* ini dibagi menjadi dua aliran. Yaitu, *lean benfield* (sama sekali tidak mengandung  $CO_2$ ) yang masuk dari puncak menara dan larutan *semi lean benfield* (masih mengandung  $CO_2$ ) yang masuk melalui bagian tengah.

Pada absorpsi  $CO_2$ , mula-mula gas  $CO_2$  bereaksi dengan  $H_2O$  membentuk asam karbonat ( $H_2CO_3$ ). Asam karbonat bereaksi dengan ion karbonat ( $CO_3^{2-}$ ) membentuk ion bikarbonat ( $HCO_3^-$ ).

Gas dari LTS yang masuk dari bagian bawah *absorber* akan kontak dengan larutan *semi lean benfield* yang menyerap sebagian besar gas  $CO_2$  yang ada. Kemudian sisa  $CO_2$  akan diserap oleh larutan *lean benfield* temperatur dalam absorber adalah  $70-100^\circ C$  dan tekanan  $27 \text{ kg/cm}^2$ . Larutan yang kaya akan  $CO_2$  (larutan *rich benfield*) keluar dari dasar *absorber* dengan temperatur  $123^\circ C$  dan mengalir melalui turbin *Hydrolic 1107-JA* menuju bagian atas *stripper 1102-E* kondisi operasi *stripper* bertekanan  $0,6 \text{ kg/cm}^2$  dan temperaturnya  $107-1029^\circ C$ .

Larutan *lean benfield* yang keluar dari dasar *stripper* dialirkan ke puncak *absorber* sedangkan gas  $CO_2$  keluar dari puncak menara *stripper*. Gas  $CO_2$  ini masih mengandung uap air yang cukup tinggi sehingga perlu dikurangi kadar airnya. Untuk mengurangi kadar air tersebut gas dimasukkan ke  $CO_2$  *overhead condenser 1110-C* kemudian gas masuk ke *stripper reflux drum 1103-F* untuk dipisahkan kondensat. Kondensat keluar dari bagian bawah *stripper* sedangkan gas  $CO_2$  keluar dari bagian atas dan dikirim ke pabrik urea.

➤ *Methanator*

Gas yang keluar dari absorber masih mengandung CO dan CO<sub>2</sub> yang merupakan racun di amonia converter 105-D oleh karena itu harus diubah menjadi CH<sub>4</sub> dalam metanator 106-D yang berisi katalis nikel oksida. Kondisi operasi di metanator temperaturnya mencapai 335°C dengan tekanan 26 kg/cm<sup>2</sup>. Reaksi yang terjadi adalah CO dan CO<sub>2</sub> bereaksi dengan H<sub>2</sub> menjadi CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub>O gas yang keluar dari metanator memiliki tekanan 26 kg/cm<sup>2</sup> dengan temperatur 310°C dan kadar CO dan CO<sub>2</sub> maksimal 0,3 ppm.

d. *Unit Refrigerasi*

Gas dari *methanator* tekanannya kurang tinggi untuk reaksi di *ammonia converter* karena kondisi operasi di *ammonia converter* membutuhkan tekanan 150 kg/cm<sup>2</sup> dan temperatur 430-500°C sehingga gas harus dinaikkan tekanannya didalam sintesis gas dan *recycle compressor* 1034 yang terdiri dari *low pressure case compressor* dan *high pressure case compressor*

*Ammonia converter* terdiri dari empat buah *bed* katalis *promoted iron* dan dindingnya dibuat rangkap dengan ruang antara (*annulus*). Gas yang masuk ke *ammonia converter* terbagi dua melalui atas dan bawah

Gas umpan yang melalui bawah mengalir dari bagian bawah *annulus* menuju ke puncak *converter* dan masuk kedalam *bed* katalis melalui *shell exchanger* yang selanjutnya gas ini mengalir dalam tiap-tiap *bed* gas umpan yang mengalir dalam *annulus* mengambil panas dari reaksi sehingga temperaturnya naik dan pada saat sampai di *shell exchanger* temperaturnya sudah cukup untuk reaksi yaitu 335°C gas hasil reaksi keluar dari *bed* empat menuju puncak *converter* dan temperaturnya 481°C. Untuk mengurangi gas *inert* berupa CH<sub>4</sub> dan Argon (Ar) sebagian gas di *purge* sebelum di *recycle* melalui *high pressure case compressor*.

Adanya produk amonia dalam aliran *purge* gas akan mempengaruhi kesetimbangan reaksi sehingga konversi amonia menjadi berkurang, karena itu amonia harus dipindahkan dahulu dari aliran *recycle* gas yang

menuju *converter* pemisahan dilakukan dengan cara mengembunkan amonia melalui *chiller* selanjutnya gas dan amonia cair dimasukkan ke amonia *separator* 106-F. Amonia yang keluar dari 106-F masih mengandung gas H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar dan CH<sub>4</sub> sehingga harus dipisahkan dengan cara di *flushing* dalam *flush* drum 111-F dengan tekanan 3,3 kg/cm<sup>2</sup> dan di 112-F dengan tekanan 0,03 kg/cm<sup>2</sup> uap yang terbentuk dikompresikan di amonia *refrigerant compressor* 105-J selanjutnya gas didinginkan dan dipisahkan di *refrigerant receiver* 109-F. amonia yang terbentuk ditampung di *storage tank* yang dikirim ke pabrik urea.

e. *Unit hydrogen recovery atau Purge gas Recovery Unit (PGRU)*

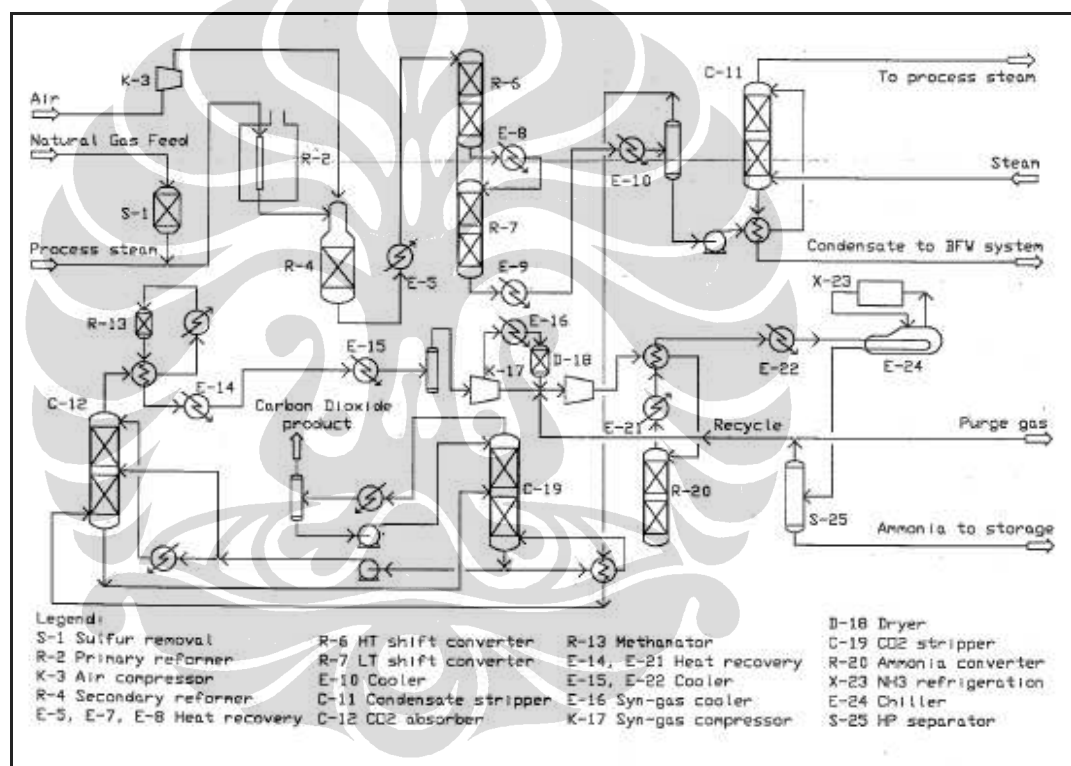
PGRU berfungsi memisahkan H<sub>2</sub> dari gas-gas lain untuk dimanfaatkan kembali sebagai daur ulang gas sintesa di unit amonia dan untuk keperluan lain. *Purge* gas adalah gas-gas yang harus dibuang dari daur ulang gas sintesa agar kandungan *inert*-nya berkurang. Kandungan *inert* tersebut adalah H<sub>2</sub> (61%), N<sub>2</sub> (20%), CH<sub>4</sub>( 12%), Ar (5%) dan NH<sub>3</sub> (2%). H<sub>2</sub> dan NH<sub>3</sub> akan diambil kembali untuk meningkatkan produksi dan efisiensi unit amonia dan H<sub>2</sub> murni digunakan untuk pembuatan peroksida.

Proses di PGRU ini menggunakan sistem *membrane separator* dengan prinsip kerja memanfaatkan perbedaan kecepatan difusi gas melalui *membrane semipermeabel*.

Gas buang dari 108-F dilewatkan pada *pre-heater* untuk dinaikkan temperaturnya dari -23°C menjadi -7°C dengan tekanan 131 kg/cm<sup>2</sup>. Selanjutnya gas diumpankan ke *Scrubber* dengan kecepatan 5700-12.400 Nm/jam untuk dipisahkan amonianya, baru kemudian masuk ke *digester* untuk pemisahan antara *noncondensable gas* dengan larutan amonia. Amonia cair yang dihasilkan diumpankan ke *stripper* dengan tekanan 38 kg/cm<sup>2</sup> dan temperature 127°C. Uap amonia yang relatif murni keluar dari puncak menara kemudian diembunkan dalam *condensor* dan diumpankan ke *accumulator*, hasilnya amonia cair yang sebagian dikirim ke *ammonia*

storage dan sebagian lagi ke menara *stripper*. Pemisahan  $H_2$  terjadi di *Prism Separator* yang terdiri dari 3 tingkat. Di tingkat I, terjadi difusi:

1. Gas *non permeable* mengalir keatas dan diumpankan ke *Prism Separator* tingkat II, menghasilkan  $H_2$  90% (dikembalikan sebagai daur ulang gas sintesa di unit amonia) dan  $H_2$  10% (dimanfaatkan sebagai bahan bakar).
2. Gas yang kaya akan  $H_2$  mengalir kebawah dan diumpankan ke *Prism Separator* tingkat III, hasilnya  $H_2$  99% (dikirim ke pabrik hydrogen peroksida) dan  $H_2$  85% (dikembalikan sebagai daur ulang gas sintesa di unit amonia).



Gambar 2.11 Alur Pembuatan Amonia

Sumber: UNIDO & IFDC (1979)

### 2.7.3 Pabrik Urea

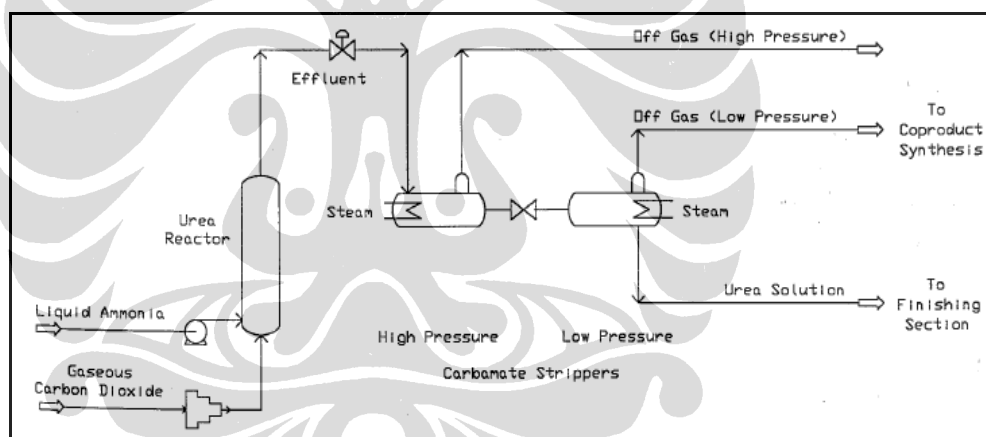
Pabrik urea adalah pabrik yang menghasilkan produk urea dengan bahan baku amonia dan  $CO_2$  yang dihasilkan oleh pabrik amonia. Berdasarkan perlakuan terhadap bahan yang tidak terkonversi, proses

pembuatan urea dibagi menjadi tiga kelompok yaitu (UNIDO&IFDC, 1979):

a. *Once Through Process* (Proses Sekali Lewat)

Proses pembuatan urea yang paling sederhana ini memiliki tahapan sebagai berikut:

1.  $\text{NH}_3$  cair dan  $\text{CO}_2$  masuk ke dalam reaktor urea pada kondisi tekanan 200 atm dan temperatur  $185^\circ\text{C}$ .
2. Pemisahan karbamat dari larutan urea dilakukan pada *carbamate stripper* untuk selanjutnya diuraikan kembali menjadi  $\text{NH}_3$  dan  $\text{CO}_2$ .
3. Gas yang tidak terkonversi digunakan sebagai bahan baku produk lain seperti amonium sitrat, amonium nitrat, dan lain – lain.



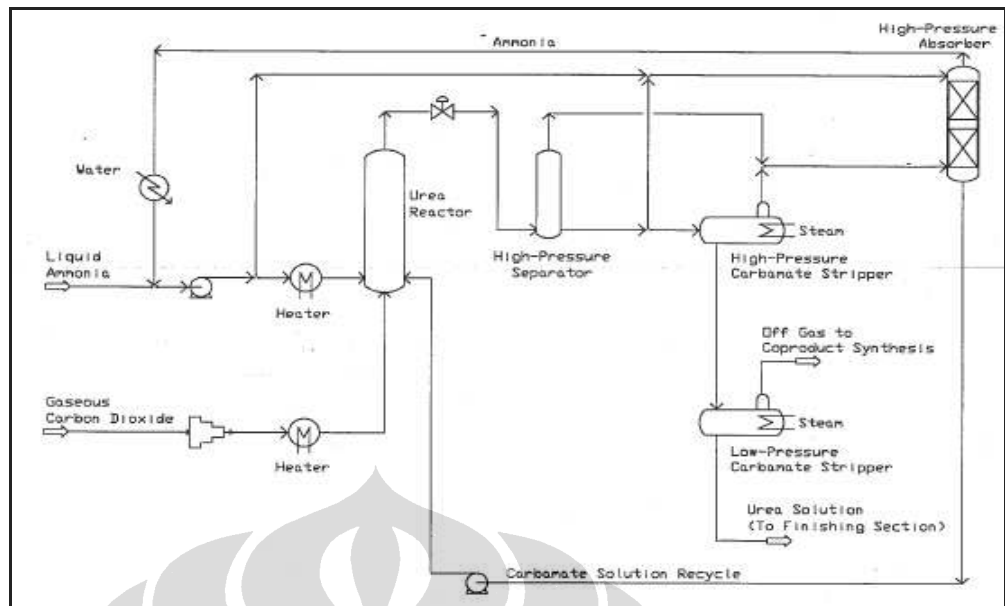
Gambar 2.12 *Once Through Process*

Sumber: UNIDO & IFDC (1979)

b. *Partial Recycle Process* (Proses Daur Ulang Sebagian)

*Partial recycle process* pada dasarnya hampir sama dengan *once through process*. Perbedaannya yang utama adalah pada jumlah amonia yang terpakai, yaitu lebih sedikit (15%). Urea dihasilkan setelah dilakukan pemisahan gas  $\text{NH}_3$  dan  $\text{CO}_2$  pada *high pressure separator* dan pada *high/low carbamate stripper*.



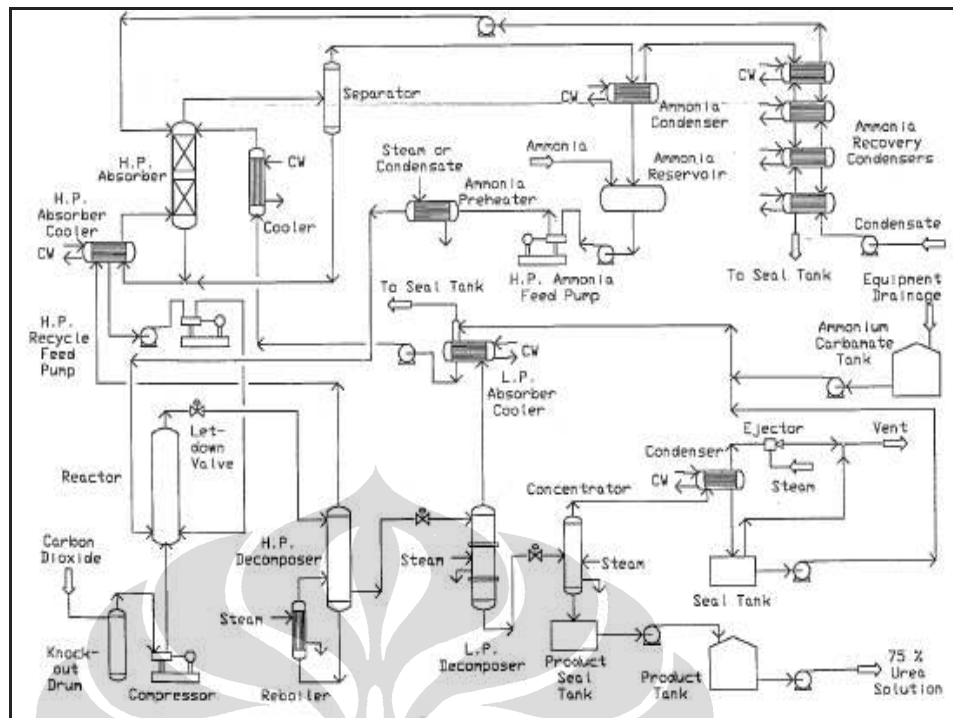


Gambar 2.13 *Partial Recycle Process*

Sumber: UNIDO & IFDC (1979)

c. *Total Recycle Process* (Proses Daur Ulang Total)

Pada proses ini, semua amonia dan karbon dioksida yang tidak terkonversi dikembalikan ke reaktor, sehingga konversi total menjadi 99%. Dibanding dua proses sebelumnya, proses ini lebih fleksibel karena hanya bergantung pada persediaan  $\text{NH}_3$  dan  $\text{CO}_2$  dari pabrik amonia. Namun, bila ditinjau dari biaya investasi dan biaya operasi, proses ini merupakan proses yang paling mahal.



Gambar 2.14 Total Recycle Process

Sumber: UNIDO & IFDC (1979)

Pabrik urea PT Pupuk Kujang menggunakan proses *Mitsui Toatsu Corporation (MTC)* dengan tipe *Total Recycle C-Improved* (Proses Daur Ulang Total yang ditingkatkan).

Amonia dan gas  $\text{CO}_2$  dari pabrik amonia yang secara bertahap masuk ke Unit Sintesa dan Pemurnian. Setelah terbentuk kristal urea, maka kristal tersebut dikirim ke Unit Menara Pembutiran dan kemudian dijatuhkan melalui alat penyebar dan membentuk butiran urea. Hasil keluaran urea ini dikantongi dan disimpan di gudang pengantongan atau langsung dikirim ke pelanggan.

Proses yang terjadi di pabrik urea adalah pembentukan urea *prill* dari amonia dan gas  $\text{CO}_2$  yang dihasilkan oleh pabrik amonia. Proses yang terdapat dipabrik urea dapat dibagi menjadi empat unit, yaitu:

- a. Unit sintesa urea
- b. Unit pemurnian/purifikasi
- c. Unit *recovery*
- d. Unit Kristalisasi dan pembutiran

Amonia cair yang berasal dari pabrik Amonia direaksikan dengan gas  $\text{CO}_2$  didalam *reactor* sintesis urea menjadi amonium karbamat

Gas  $\text{CO}_2$  dikompresikan dengan tekanan dan temperatur tinggi. Gas  $\text{CO}_2$  masuk ke *reactor* urea melalui bagian bawah. Amonia cair dari amonia *reservoir* dipompa melalui amonia *Boost Up Pump* menjadi dua aliran. Aliran yang satu digunakan sebagai penyerap pada *High Pressure Absorber* dan aliran yang satu lagi dilewatkan ke *Liquid Ammonia Feed Pump* dan dipanaskan dalam *Ammonia Pre-Heater* untuk dimasukkan ke dalam *reactor* urea melalui bagian bawah dengan temperatur yang tinggi.

Di unit pemurnian terjadi pemisahan kelebihan amonia pada urea hasil dari amonium karbamat. Amonium karbamat di dekomposisi menjadi gas-gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{NH}_3$  dengan cara menaikkan temperatur dan menurunkan tekanan.

Proses pemurnian urea ini dilakukan dengan menggunakan tiga alat. Mula-mula hasil dari *reactor* urea dimasukkan ke dalam *high pressure decompressor* sehingga gas-gas akan terpisah dari cairan. Gas ini akan mengalir ke bagian atas sedangkan cairan akan mengalir ke bagian bawah kemudian cairan ini akan di *stripping* agar gas-gas yang larut dapat terlepas.

Gas-gas yang dialirkan ke atas menuju *high pressure absorber cooler*, sedangkan cairannya dimasukkan ke *low pressure decompressor* agar terjadi *flushing* untuk *menstripping* amonia. Larutan akan dialirkan ke *separator* dan gas dimasukkan ke *low pressure absorber*.

*Separator* gas akan memisahkan larutan urea dengan gas  $\text{NH}_3$  dan  $\text{CO}_2$  dengan cara menghembuskan udara melalui distributor. Hasilnya berupa larutan urea dengan konsentrasi 70 – 75% yang dikirim ke Unit Kristalisasi dan Pembutiran.

Larutan yang masuk ke unit kristalisasi dan pembutiran ini akan dibentuk menjadi urea *prill*. Proses di unit ini dikelompokkan menjadi empat, yaitu proses pengkristalan, proses pemisahan dan proses pembutiran.

Pada proses pengkristalan, larutan urea dari separator gas dipompa melalui urea solution punip untuk dimasukkan ke *christallizer*. Pada proses pemisahan, kristal urea dan larutan induknya akan terpisah karena adanya gaya sentrifugal.

Kristal hasil pemisahan mengandung uap air dengan kadar 2,4%. Kemudian kristal ini dikirim ke *fluidizing drier* untuk dikeringkan. Pengeringan kristal terjadi karena hembusan udara kering dari bawah *drier*. Selanjutnya kristal urea yang sudah kering akan dihisap oleh *induced fan for drier* menuju *cyclone*.

Kristal urea yang masuk ke *cyclone* akan dipisahkan dari debu-debu halus yang melekat, lalu urea dikirim ke *melter* dengan menggunakan *screw conveyor*. Lelehan urea dari *Melter* akan dikeluarkan melalui *distributor* dan jatuh disepanjang *Prilling Tower*. Supaya tetes-tetes urea ini dingin maka urea *prill* yang terbentuk didinginkan lebih lanjut di *fluidizing cooler*. Selanjutnya dikirim ke *Urea Storage* di pabrik pengantongan dengan *belt conveyor*.

#### **2.7.4 Pabrik Pengantongan**

Pabrik ini melaksanakan pengantongan udara curah ke dalam kantong berukuran 50 kg dan 1 ton. Prosesnya yaitu urea curah dari pabrik urea dikirim melalui *belt conveyor* masuk ke bin kemudian ditimbang secara otomatis dan dimasukkan kedalam kantong plastic *polyethylene* dan dijahit. Produk urea dalam kantong dikirim ke konsumen dengan menggunakan truk.

### **2.8 Pemodelan Kejadian Ledakan**

CCPS (2003) dalam Khotimah (2008) menyatakan bahwa pemodelan merupakan penyederhanaan dari kenyataan yang dapat digunakan untuk memperbaiki proses atau memprediksi keadaan sistem pada keadaan tertentu.

Pemodelan ledakan secara matematis memiliki tingkat kesukaran yang berbeda, mulai dari pemodelan berdasarkan persamaan sederhana hingga pemodelan dengan menggunakan perhitungan diferensial dan integral hingga

perhitungan logaritma dan eksponensial. Beberapa pemodelan matematis biasanya menggunakan konsep TNT *Equations Models* atau TNO *Multi-Energy* (CCPS, 1999).

Selain pemodelan ledakan secara matematis, pemodelan ledakan juga dapat menggunakan piranti lunak komputer. Beberapa piranti lunak yang tersedia antara lain sebagai berikut:

2.8.1 HEXDAM (*high explosive damage assessment model*) dan VEXDAM (*vapor cloud explosion damage assessment model*) ([www.eng-consult.com](http://www.eng-consult.com), 2003).

HEXDAM dan VEXDAM merupakan produk pemodelan ledakan dari Breeze yang merupakan perluasan dari perusahaan Trinity. HEXDAM dan VEXDAM dapat memodelkan prediksi kerusakan pada fasilitas atau instalasi bangunan yang disebabkan oleh ledakan pertama maupun oleh ledakan susulan. Perbedaannya terletak pada target operasinya, dimana kegunaan utama dari HEXDAM adalah untuk menganalisis pabrik (*site analysis*), khususnya penyimpanan bahan kimia eksplosif pada fasilitas manufaktur. Sedangkan VEXDAM digunakan untuk menganalisis keselamatan (*safety analysis*) jika terjadi ledakan yang disebabkan oleh *vapor cloud*, khususnya pada penyimpanan bahan bakar pada industri petrokimia.

Kelebihan piranti lunak ini adalah pada tampilannya yang berbentuk tiga dimensi, kemampuannya memodelkan kurva *dynamic pressure* dan *overpressure* untuk memperkirakan tingkat tekanan pada area tertentu (HEXDAM), maupun untuk menunjukkan kurva *overpressure* dan durasi getaran per satuan waktu, berdasarkan *multi-energy method*. Salah satu kekurangan piranti lunak ini adalah keterbatasan akses bagi khalayak umum, setiap orang yang ingin memanfaatkan piranti lunak ini harus mengeluarkan sejumlah dana.

2.8.2 Piranti Lunak DNV ([www.dnv.com](http://www.dnv.com), 2009)

Produk keluaran terbaru dari DNV terkait pemodelan ledakan adalah dengan menggunakan *spreadsheets*. *Spreadsheets* ini dapat dioperasikan

dengan menggunakan program *excel* yang dikeluarkan oleh perusahaan piranti lunak raksasa, *Microsoft Corp.* Dengan cara ini, hasil analisis yang diperoleh menjadi lebih dalam dan lebih detail karena langsung terhubung dengan program komputer, sehingga proses *input* dan *output* data dapat lebih dikontrol dengan seksama.

*Spreadsheets* ini sangat mungkin digunakan untuk segala model ledakan seperti *multi-energy explosion* model, Baker-Strehlow *explosion* model dan CCPS BLEVE *explosion* model. Namun, sama seperti halnya HEXDAM dan VEXDAM, piranti lunak ini juga tidak dapat diakses secara cuma – cuma.

## 2.9 ALOHA (*Area Locations of Hazardous Atmosphere*)

### 2.9.1 Sejarah ALOHA

ALOHA (*Area Locations of Hazardous Atmosphere*) merupakan program komputer yang di disain khusus untuk merespon kebocoran kimia, termasuk didalamnya persiapan dan pelatihan gawat darurat (*emergency response dan emergency preparedness/planning*). Versi awal ALOHA adalah versi 5.2.3, yang dirilis tahun 1999.

ALOHA adalah *public domain code* yang merupakan bagian dari sistem *software* yang dikenal sebagai *Computer-Aided Management of Emergency Operations (CAMEO)* yang dibuat untuk merencanakan dan merespon keadaan darurat yang berhubungan dengan bahan kimia. Versi 5.4 adalah versi ALOHA yang terbaru, dapat memodelkan penyebaran gas beracun, ledakan dan radiasi pajanan panas. Versi yang dirilis sebelumnya hanya mampu memodelkan *toxic threat* (ALOHA Manual, 2007).

Piranti lunak ini secara luas digunakan bersama DOE (*Department of Energy*) *complex* untuk aplikasi analisis *safety*. *United States Environmental Protection Agency (EPA)*, melalui *Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office (CEPPO)*, dan kantor *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, bergabung bersama mensponsori ALOHA. ALOHA dapat didownload secara gratis dari website EPA (<http://www.epa.gov/ceppo/cameo/aloha.htm>) (Khotimah, 2008).

### 2.9.2 Cara Penggunaan ALOHA

ALOHA dapat memodelkan tiga jenis bahaya, yaitu penyebaran gas beracun (*toxic gas dispersion*), kebakaran dan ledakan. ALOHA menggunakan beberapa macam model termasuk model dispersi udara yang digunakan untuk memperkirakan gerakan dan dispersi asap gas-gas kimia. Pada model ini, ALOHA juga memungkinkan untuk memperkirakan kandungan racun dalam dispersi gas (*gas dispersion*), nilai tekanan yang berlebih (*overpressure*) dari suatu ledakan tertentu, atau suatu area yang mudah terbakar atau suatu kabutan asap tertentu.

Secara umum, cara menggunakan ALOHA adalah sebagai berikut:

1. Tentukan lokasi terjadinya kebocoran kimia, berdasarkan tempat dan waktu.
2. Pilih bahan kimia yang menjadi fokus penelitian dari dokumen informasi kimia (*chemical library*) ALOHA.
3. Masukkan informasi mengenai kondisi cuaca terkini.
4. Gambarkan bagaimana bahan kimia tersebut terlepas dari tempat penyimpanannya.
5. Tampilkan *threat zone*-nya.

Tampilan dasar operasi ALOHA terdiri dari tujuh menu utama, dari kiri ke kanan, yaitu:

1. **File and Edit**: Pilihlah items dari 2 menu ini untuk menampilkan operasi dasar, seperti membuka, menutup dan menyimpan file, mengeprint konten dari jendela ALOHA, dan mengcopy teks dan grafik yang terdapat dalam ALOHA.
2. **SiteData** : Pilihlah items dari menu SiteData untuk masuk ke dalam informasi mengenai kebocoran dari :
  - a. berdasarkan tanggal dan waktu.
  - b. Lokasi
  - c. Tipe bangunan dari keluaran gas beracun

3. **SetUp:** Pilihlah items dari menu SetUp untuk :
  - a. memilih suatu zat kimia dari dari dokumen ALOHA
  - b. indikasi kondisi cuaca (baik secara manual maupun melalui koneksi komputer kepada stasiun meteriologi-SAM).
  - c. "*set the source*" (menggambarkan bagaimana bahan kimia itu bocor). Pilihlah tipe dari kalkulasi dispersi dalam ALOHA (ALOHA dapat memprediksikan pergerakan dari asap *neutrally buoyant* yang menggambarkan kerapatan udara dan asap gas berat yang lebih rapat daripada udara)
  
4. **Display**

Pilihlah items dari menu Display untuk menunjukkan hasil ALOHA yang ingin dilihat.
  
5. **Sharing:** Pilihlah items dari menu Sharing, untuk:
  - a. Menampilkan suatu "zona berisiko" dari ALOHA diatas suatu peta kawasan tertentu dengan menggunakan MARPLOT, modul pemetaan the CAMEO®, atau
  - b. Melihat detail informasi mengenai paparan kimia tertentu yang telah Anda pilih, tampilkan dalam CAMEO's Response Information Data Sheets (RIDS) module.
  
6. **Help:** Pilihlah items dari menu *sharing*, untuk melihat daftar topik bantuan dan untuk mendapatkan informasi mengenai ALOHA

### 2.9.3 Keterbatasan ALOHA

Seperti model dan metode lainnya, ALOHA tidak dapat memberikan informasi yang lebih akurat berdasarkan informasi yang diberikan, sehingga menjadi sangat penting untuk memasukkan informasi yang sangat akurat. Jika informasi tentang suatu hal tidak diketahui atau kurang lengkap, maka sebaiknya yang dipilih adalah informasi dengan skenario terburuk atau mencoba beberapa kemungkinan skenario lain dan membandingkan hasilnya.



Hasil pemodelan ALOHA dapat dikatakan *reliable* bila memenuhi syarat-syarat berikut:

1. Kecepatan udara yang sangat rendah

*Threat Zone* ALOHA menjadi akurat jika arah angin tidak berubah dari nilai yang dimasukkan.

2. Kondisi atmosfer yang sangat stabil

Dibawah kondisi atmosfer yang sangat stabil (umumnya pada akhir malam hari atau di kondisi dini hari), biasanya angin sangat sedikit dan hampir tidak tercampur dengan paparan kimia dalam bentuk apapun disekitar udara.

Dalam kondisi atmosfer yang begitu stabil, zat kimia dari awan akan menyebar dengan cara yang sama seperti krim yang ditaburkan diatas segelas kopi, dimana krim tersebut akan berkurang dan menyebar dengan lambat ke dalam kopi. Sama halnya dengan awan yang menyebar dengan lambat dan konsentrasi gas yang tinggi akan membangun gundukan-gundukan untuk periode yang panjang, meski jaraknya jauh dari titik keluarannya.

3. Terdapat perubahan angin dan efek pemetaan topografi

ALOHA memperbolehkan input untuk kecepatan angin dan petunjuk angin secara manual, yang kemudian diasumsikan bahwa kecepatan angin konstan (dalam ketinggian berapa pun). ALOHA menganggap dataran disekitar lokasi adalah datar tanpa hambatan.

4. Pekatnya konsentrasi dan dekatnya sumber paparan.

#### 2.9.4 *Explosion Level of Concern ALOHA*

Program ALOHA versi 5.4 dapat membentuk skenario kebakaran dan ledakan sebagaimana skenario dispersi gas beracun. Program ALOHA versi 5,4 ini menyediakan informasi dasar mengenai kebakaran dan ledakan yang

kemudian menjelaskan bagaimana membentuk skenario kebakaran dan ledakan ini dalam program ALOHA.

ALOHA dapat memodelkan ledakan dengan 4 tipe sumber, yakni: *Direct*, *Puddle*, *Tank*, dan *Gas Pipeline*. Lebih jelasnya, dijelaskan pada Tabel berikut:

Tabel. 2.11 Skenario dan Sumber

Source	Toxic Scenarios	Fire Scenarios	Explosion Scenarios
<b>Direct</b>			
Direct Release	Toxic Vapor Cloud	Flammable Area (Flash Fire)	Vapor Cloud Explosion
<b>Puddle</b>			
Evaporating	Toxic Vapor Cloud	Flammable Area (Flash Fire)	Vapor Cloud Explosion
Burning (Pool Fire)		Pool Fire	
<b>Tank</b>			
Not Burning	Toxic Vapor Cloud	Flammable Area (Flash Fire)	Vapor Cloud Explosion
Burning		Jet Fire or Pool Fire	
BLEVE		BLEVE (Fireball and Pool Fire)	
<b>Gas Pipeline</b>			
Not Burning	Toxic Vapor Cloud	Flammable Area (Flash Fire)	Vapor Cloud Explosion
Burning (Jet Fire)		Jet Fire	

Sumber: US EPA & NOAA (2007)

Variasi tekanan dalam ALOHA ditentukan berdasarkan tinjauan dari berbagai sumber, diantaranya adalah *American Institute of Chemical Engineers* (1994), *Federal Emergency Management Agency et al.* (1988), dan Lees (2001). Variasi tekanan (*Level of Concern - LOC*) merupakan batasan tekanan dari gelombang ledak (*blast wave*) yang biasanya menyertai bahan kimia. ALOHA menetapkan tiga batasan sebagai standar *threat zone*, yaitu:

Merah : (8.0 psi) = menghancurkan gedung

Oranye : (3.5 psi) = menimbulkan cedera berat

Kuning : (1.0 psi) = memecahkan kaca

## BAB 3

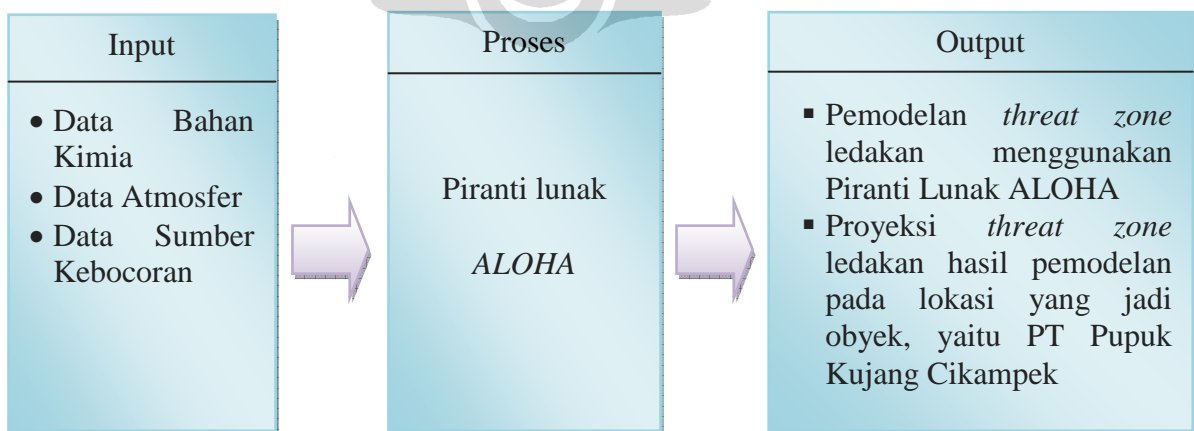
### KERANGKA KONSEP DAN DEFINISI OPERASIONAL

#### 3.1 Kerangka Konsep

Dalam proses industri, ledakan merupakan bahaya yang berpotensi destruktif. Dampak yang ditimbulkan oleh ledakan pipa gas tidak hanya merugikan secara materi, tetapi juga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan menghilangkan nyawa makhluk hidup termasuk nyawa manusia. Data USBL (1999) dalam Crowl (2003), menyatakan bahwa pada tahun 1998, konsekuensi kecelakaan di Amerika yang disebabkan oleh kebakaran dan ledakan mencapai 3% dari total kecelakaan pada tahun tersebut.

Gas hidrogen merupakan bahan kimia yang sangat mudah terbakar (*highly flammable*) sehingga pipa yang menjadi sarana distribusi perpindahan gas ini memiliki risiko signifikan terhadap kemungkinan kebocoran yang dapat memicu terjadinya ledakan. Jenis ledakan yang dapat terjadi biasanya berupa *vapor cloud explosion* yaitu sebuah ledakan yang disebabkan oleh kebocoran bahan kimia mudah terbakar yang dipicu oleh sumber ignisi terdekat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dan proyeksi ledakan pipa gas hidrogen di PT Pupuk Kujang Cikampek dengan menggunakan piranti lunak ALOHA (*Area Locations Of Hazardous Atmosphere*).

Berdasarkan hal tersebut, maka kerangka konsep penelitian ini dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.1 Kerangka Konsep Penelitian

### III. 2 Definisi Operasional

Tabel 3.1 Definisi Operasional Penelitian

Variabel	Definisi	Cara Pengukuran	Alat Ukur	Hasil Ukur	Skala Ukur
Data Bahan Kimia ( <i>Chemical data</i> )	Informasi tentang bahan kimia pada pipa yang menjadi obyek penelitian	Data Sekunder yang tersedia dalam piranti lunak ALOHA	<i>Checklist</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Berat molekul dalam satuan g/mol</li> <li>▪ Titik didih dalam satuan derajat Celcius (°C)</li> <li>▪ Temperatur kritis dalam satuan derajat Celcius (°C)</li> <li>▪ Tekanan kritis dalam satuan atmosferik (atm)</li> <li>▪ Titik Beku dalam satuan derajat Celcius (°C)</li> <li>▪ LEL&amp;UEL dalam satuan <i>part per million</i> (ppm)</li> </ul>	Rasio
Data Atmosfer ( <i>Atmospheric data</i> )	Data tentang kondisi atmosfer pada area proyeksi ledakan dari pipa yang menjadi obyek penelitian	Data Sekunder yang tersedia dalam piranti lunak ALOHA	<i>Checklist</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kecepatan angin dalam satuan <i>meter per second</i> (m/s)</li> <li>▪ Arah angin berdasarkan petunjuk mata angin</li> <li>▪ Ketinggian pengukuran kecepatan angin dalam satuan meter (m)</li> <li>▪ Kerapatan permukaan daratan</li> <li>▪ Kondisi awan</li> <li>▪ Temperatur udara dalam satuan derajat Celcius (°C)</li> <li>▪ Kelembaban udara dalam persentase (%)</li> </ul>	Rasio
Data Sumber	Sumber kebocoran	Data Sekunder dari PT	<i>Checklist</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Panjang Pipa dari PGRU ke kompresor</li> </ul>	Rasio

Kebocoran ( <i>Source data</i> )	bahan kimia dari objek yang akan diteliti. Penelitian ini mengambil pipa sebagai sumber kebocoran ( <i>Pipe Source</i> )	Pupuk Kujang Cikampek		dalam satuan meter (m) <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diameter bagian dalam Pipa dari PGRU ke kompresor dalam satuan inchi (inch)</li> <li>▪ Tekanan Bahan Kimia pada Pipa dalam satuan <i>pounds per square inch area</i> (psia)</li> <li>▪ Temperatur Bahan Kimia pada Pipa dalam satuan derajat Celcius (°C)</li> <li>▪ Kekasaran (<i>roughness</i>) Pipa berdasarkan bahan material pipa</li> <li>▪ Ukuran lubang pada <i>reservoir</i> berdasarkan luas lubang pipa dalam satuan inchi kuadrat (sq inch)</li> </ul>	
Pemodelan <i>threat zone</i> ledakan ( <i>vapour cloud explosion</i> ) menggunakan piranti lunak ALOHA	Metode pemodelan <i>threat zone</i> ledakan yang mungkin terjadi	Sesuai pedoman piranti lunak ALOHA	Piranti lunak ALOHA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Red Zone</i> (8 psia) dengan radius dalam satuan meter (m)</li> <li>▪ <i>Orange Zone</i> (3,5 psia) dengan radius dalam satuan meter (m)</li> <li>▪ <i>Yellow Zone</i> (1 psia) dengan radius dalam satuan meter (m)</li> <li>▪ Diagram <i>threat zone</i> (area berisiko) dengan luas dalam satuan meter persegi (m<sup>2</sup>)</li> </ul>	Rasio
Proyeksi <i>threat zone</i> ledakan ( <i>vapour cloud explosion</i> )	Memindahkan hasil pemodelan ALOHA, berupa radius ledakan ke lokasi yang sebenarnya, yaitu PT Pupuk Kujang Cikampek	Radius efek ledakan hasil pemodelan diproyeksikan ke lokasi PT Pupuk Kujang Cikampek	Piranti lunak <i>Google Earth</i>	Gambar <i>threat zone</i> dari <i>Google Earth</i>	Nominal