

# Quantitative Risk Analysis Kebocoran Hidrogen pada Hydrogent Plant

Dian Nur Hanifah<sup>\*1</sup>, Agung Nugroho<sup>2</sup>, dan Adhi Setiawan<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

\*E-mail: dianurhanifah@gmail.com

## Abstrak

Hidrogen merupakan unsur kimia yang sangat berbahaya dengan sifatnya yang mudah meledak. Penelitian ini dilakukan khususnya pada unit *purification system* di hydrogen plant yang memproduksi hydrogen dari natural gas melalui metode *steam methane reforming*. *Quantitive analysis* digunakan untuk mengetahui frekuensi kebocoran hydrogen, estimasi risiko dan pemodelan konsekuensi. Hasil analisa menunjukkan bahwa frekuensi tertinggi terjadi pada kejadian *unignited release*. Untuk estimasi risiko kebocoran hydrogen pada kejadian Dampak skenario *jet fire* menghasilkan jarak aman terjauh pada kasus kebocoran di HPU yaitu 60 meter, *flash fire* menghasilkan jarak aman terjauh pada kasus kebocoran di HPU yaitu 80 meter, dan *explosion* pada radius 200 meter akan mengalami *blast overpressure* 7.62 psig dengan estimasi *fatality* 22% dari populasi. Analisa frekuensi kebocoran berdasarkan prinsip ALARP sebagian besar berada pada level dapat ditoleransi. Meskipun demikian, tetap diperlukan beberapa usulan rekomendasi untuk mengendalikan risiko sehingga risiko tetap berada pada level yang dapat diterima

**Keywords:** ALARP, Hidrogen, Consequence Modeling, Risiko

## PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan zat kimia berbahaya dalam fase liquid maupun gas. Hidrogen memiliki rentang flammability limit campuran yang sangat besar yaitu 4% hingga 75% dalam udara dimana bahan kimia ini mudah terbakar dan campuran 18,3% hingga 59% merupakan konsentrasi mudah meledak dan membutuhkan energi ledakan sebesar 0.02 mJ, rentang campuran seperti ini sangat besar dibanding kebanyakan sifat flammable gas lainnya, sebagai perbandingan *flammability limit* gas lain yaitu: bensin 1-7,6% atau diesel 0,6-5,5% (HydrogenAssociation.org).. Sehingga potensi kebocoran kecil pada tangki penyimpanan hidrogen memiliki kemungkinan potensi yang besar untuk terjadinya kebakaran/ledakan. Adapun kasus kecelakaan industri yang melibatkan ledakan dan kebakaran dahsyat akibat hidrogen yang keluar sistem, yaitu pabrik Amonia di Norwegia pada unit wash tower (30 Bar) menyebabkan terjadinya ledakan disusul kemudian jet fire sepanjang 50 meter dalam waktu 30 detik dan dampak ledakan mencapai radius 60 meter (Bjerketvedt, nd)

PT. Oli Pelumas memproduksi pelumas baru dari pelumas bekas, yang dalam prosesnya membutuhkan hidrogen yang memiliki kemurnian tinggi mencapai 99,9% *melalui hydrogen plant*. Hidrogen yang digunakan merupakan bahan utama yang membantu proses reaksi di unit hydrofinishing yang merupakan unit utama dalam proses pemurnian oli bekas untuk mengurangi secara signifikan kandungan impuritas (logam) pada oli bekas. Pada proses produksi hidrogen terdapat bahan kimia yang mudah terbakar, meledak dan mempunyai toksisitas terhadap kesehatan manusia, diantaranya adalah gas hidrogen sulfida, methana, karbon monoksida dan hidrogen (*Manual Proses Book* PT. Oli Pelumas 1995). Hidrogen diproduksi di unit hidrogen plant dengan bahan baku natural gas dengan metode *steam methane reforming*. Unit ini beroperasi pada tekanan 24,8 BARG dan suhu maksimum 421°C hal ini dapat menimbulkan potensi ketegangan pada material meningkat sehingga komponen seperti perpipaan, flanges dan valve rentan terhadap kebocoran selain itu gas hidrogen termasuk gas yang sangat ringan dan dapat memungkinkan release dengan mudah (NASA, 2005). Sehingga perlu tindakan untuk penilaian risiko dan pengukuran terhadap risiko tersebut. Penelitian sebelumnya pada unit ini menggunakan evaluasi secara kualitatif

potensi bahaya pada hidrogen plant menggunakan metode Integrated Inherent Safety Index (I2SI) termasuk dalam kategori Moderately Hazardous (Yoga, 2013)

Berdasarkan penjalasan diatas, maka perlu diadakan penelitian pada konsekuensi kejadian kebocoran hidrogen plant pada PT. Oli Pelumas untuk mengevaluasi bahayanya. Pada proses di *hydrogen plant* terjadi pada tekanan dan temperatur tinggi. Sehingga perlu dilakukan adanya risk assesment dalam skenario kejadian kebocoran gas hidrogen yaitu dengan metode *Quantitative Risk Analysis* (QRA) kemudian memodelkan kejadian kecelakaan yang mungkin terjadi untuk memberikan gambaran kejadian sehingga diharapkan dapat menemukan tindakan preventifnya. QRA merupakan metode yang digunakan pada industri petrokimia dan telah digunakan sebagai metode resmi di berbagai negara Eropa dan Asia. QRA merupakan alat yang dapat membantu menerjemahkan latar belakang kejadian menjadi perkiraan (planning) dan menunjukkan cara pencegahan bahaya dalam memodelkan kejadian. Salah satu software yang dapat membantu memodelkan skenario *accident* adalah HyRAM (*Hydrogen Risk Assessment Models*). HyRAM adalah software yang akan memodelkan beberapa model fisik yang dapat digunakan untuk menghitung konsekuensi thermal dan overpressure yang nantinya akan dihubungkan dengan kriteria kerusakan; temperatur jet flame dan lintasan area sebagai fungsi posisi, radiasi heat flux dan lain-lain

## METODOLOGI

Mengidentifikasi node study pada diagram P&ID untuk menentukan kondisi proses maupun komposisi gas hidrogen yang tinggi yang akan di analisa pada perhitungan frekuensi kejadian dan pemodelan dampak fisik (*Consequence Effects*). Data yang digunakan adalah *material balance* hidrogen plant PT. Oli Pelumas dan frekuensi rata-rata kebocoran hydrogen yang dialami pada komponen-komponen yang ada di *Hydrogen Plant*. Pemilihan dilakukan berdasarkan komposisi hidrogen terbanyak dari beberapa tahapan hidrogen plant yang terdiri dari *Desulfurizer*, *Steam Reforming*, *Shift Converting*, dan *Purification System*. Dari hasil pemilihan konsentrasi hidrogen tertinggi dari semua sistem pada hidrogen plant adalah pada *Unit Purification System* karena pada tahap inilah proses pemurnian hidrogen dari impuritas mencapai kemurnian 99.9% hidrogen.

Analisis frekuensi kejadian dilakukan berdasarkan *Event Sequence Diagram* (ESD) kebocoran hidrogen. Dari ESD dapat kita ketahui bahwa skenario kejadian kebocoran hidrogen memberikan konsekuensi yang berbeda-beda bergantung pada penyebab atau kondisi yang memicu. Oleh karena itu dalam menganalisis frekuensi perlu mempertimbangkan penyebab skenario yang akan diketahui. Seperti, terjadinya *flash fire* dikarenakan gas hidrogen yang keluar tidak dapat terisolasi dan dipicu oleh penyalaaan langsung atau *immediate ignition*.

Dampak utama dari kebocoran hidrogen adalah dampak *termal* dan *overpressure* yang dapat membahayakan nyawa, asset dan lingkungan. Namun ada dampak lain yaitu dampak asphyxiation. Hidrogen sebenarnya memiliki sifat mengurangi jumlah oksigen (*oxygen deplation*) namun karena hidrogen bersifat highly buoyant dan diffusive sehingga dampaknya sangat kecil dan dapat diabaikan (HydrogenAssociation). Frekuensi akan dianalisa meliputi:

- Jumlah hidrogen yang bocor per-tahun (pada kasus penyalaaan maupun tanpa penyalaaan) ; *fGH2 release*
- Jumlah Jet Fire per-tahun (pada kasus penyalaaan lansung) ; *fJetfire*
- Jumlah Flash Fire per-tahun (pada kasus penyalaaan tidak lansung dengan didominasi efek termal) ; *fFlash Fire*
- Jumlah Explosion per-tahun (pada kasus penyalaaan tidak lansung dengan didominasi efek tekanan) ; *fExplosion*
- Jumlah Unignited Release per-tahun (pada kasus tidak terjadi penyalaaan) ; *fUnignited*

Dengan data dan asumsi yang diperlukan meliputi :

### 1. Component Leaks

Bertujuan untuk menghitung frekuensi kebocoran tiap komponen yang terlibat pada sistem. Dengan cara menghitung secara keseluruhan jumlah komponen yang ada pada area yang diidentifikasi terdiri dari kompresor, silinder, filter, flange, hoses, joint, pipe, valve dan instrumentasi kemudian dikalikan dengan data frekuensi kebocoran dari lima variabel kebocoran yang sesuai pada *generic data* dari Sandia National Laboratories. Variabel kebocoran yang digunakan yaitu: *Very small: leak area* 0.01% dari *total flow area*; *Minor: leak area* 0.1% dari *total flow area*; *Medium: leak area* 1% dari *total flow area*; *Majo : leak area* 10% dari *total flow area*; *Rupture: leak area* 100% dari *total flow area*

### 2. Ignition probability

Bertujuan untuk mengetahui kemungkinan penyalaan atau *Ignition probability* dua skenario kejadian yaitu menyala secara langsung (menghasilkkan *jet fire*) atau menyala dengan *delay* (menghasilkan *explosion*). Pada tabel 1 merupakan nilai *ignition probability* berdasarkan pada beberapa laju alir kebocoran (kg/s).

3. *Probability of dominant effects*

Ketika terjadi penyalaan yang tertunda/delayed ignition sehingga terjadi akumulasi gas, dampak yang terjadi selanjutnya (flash fire atau explosion) bergantung pada konsekuensi yang dominan antara termal dan dampak tekanan. Pada penelitian kali ini menggunakan asumsi kejadian kebocoran yang berkelanjutan (*Continued Release*) dengan asumsi dominasi efek thermal dibandingkan dengan overpressure sebesar 40% akan terjadi kejadian explosion dan 60% akan terjadi *flash fire* (Purple Book, 1999).

**Tabel 1.** *Probability Ignition; the Tchouvelev Values*

<i>Hydrogen release rate (kg/s)</i>	<i>Probability Immediate Ignite</i>	<i>Probability Delayed Ignite</i>
<0.125	0.008	0.004
0.125 – 6.25	0.053	0.037
>6.25	0.23	0.12

(Sumber: SANDIA REPORT, 2009)

4. *Probability of Isolated*

Kemungkinan sebuah kebocoran berhasil diisolasi atau terdeteksi sebelum terjadi penyalaan atau *unignited release*. Nilai didapatkan dari *expert judgment* agar lebih sesuai dengan kondisi pabrik. Skenario dimodelkan dalam bentuk *Event Sequence Diagram* (ESD) pada kejadian kebocoran hidrogen. Sebelum menghitung frekuensi skenario terlebih dahulu mengetahui frekuensi kebocoran pada tiap variabel kebocoran (k%) berdasarkan jumlah komponen disetiap *study node* menggunakan rumus 1:

$$f_{GH_2 \text{ release variabel leak (k\%)}} = \sum_i N_{\text{component } i} x f_{\text{leak } i}$$

Dimana  $N_{\text{(component } i)}$  merupakan jumlah 9 komponen (*Compressors, Cylinders, Valves, Instruments, Joints, Hoses, Pipes (m), Filters, Flanges*) pada masing-masing *study node* dan  $f_{\text{(leak } i)}$  rata-rata kebocoran pada *component i*.

Dalam CPQRA dijelaskan bahwa suatu kecelakaan diawali dengan terjadinya suatu peristiwa dimana dari peristiwa tersebut akan menghasilkan hasil akhir atau konsekuensi yakni terlepasnya suatu proses seperti *toxic* maupun *flammable*. Untuk menganalisa perlu dilakukan analisis untuk menentukan dampak fisik dari hasil pelepasan bahan kimia berbahaya. Dalam memodelkan bentuk fisik dapat menggunakan software yang memudahkan kita dalam menganalisa bentuk fisik dari sebuah skenario kejadian. Salah satu software yang digunakan dalam pemodelan bentuk fisik kecelakaan berupa kebakaran adalah HyRAM atau *Hydrogen Risk Analysis Models*. Dengan menggunakan software HyRAM akan membantu menggambarkan konsekuensi dampak dari jet fire dan gas plume dispersion, khusus pada gas plume dispersion seperti yang ditunjukkan tabel 2 dapat digunakan dalam pemodelan flash fire karena dalam pemodelan *gas plume dispersion* diketahui persebaran mol fraksi, sedangkan dampak flash fire dapat diketahui dari konsentrasi LFL yang tersebar (Muhammadfam, 2015) . Pada pemodelan skenario jet flame dan gas dispersion plume penulis menggunakan Notional Nozzle model dari pemodelan Yüceil & Ötügen. Nozzle model merupakan model yang menentukan keluarnya suatu zat liquid maupun gas dari sebuah lubang.

**Tabel 2.** Deskripsi Kriteria Flash Fire

<i>Incident outcome</i>	<i>Criteria</i>	<i>Damage</i>	<i>Fatality</i>
<i>Flash Fire</i>	LFL	<i>Fatality</i>	100%
	½ LFL	<i>Inhalation effects</i>	0

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pembagian Study node dari sistem *unit purification* terdiri dari 6 streamline (streamline 29, 30, 31, 32, 33, dan 34) dan 2 vessel (vessel HPU dan Waste Gas). Pada tabel 3 menunjukkan kondisi operasi setiap study node.

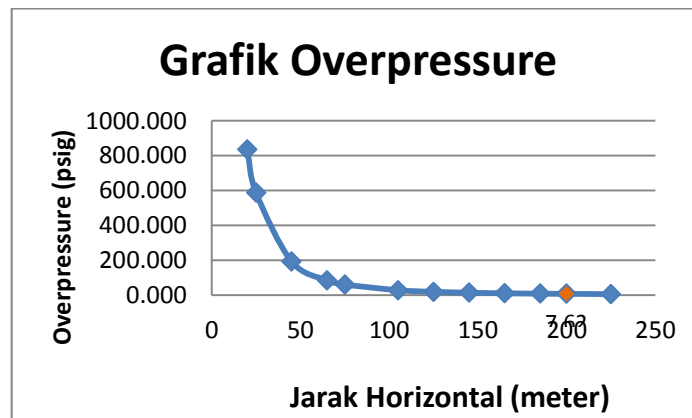
**Tabel 3.** Kondisi Operasi *Purification system*

	29	30	31 dan 34	32 dan 32	HPU	Waste Gas
<b>Temperature (F)</b>	105.0	105.0	105.0	105.0	104	104
<b>Pressure (Psi)</b>	242.7	242.7	237.7	237.7	232	49.3

Hasil perhitungan laju alir tiap study node menggunakan rumus (1) menunjukkan nilai hydrogen *release rate* < 0.125 kg/s berdasarkan tabel 1 sehingga nilai *probability immediate ignition* 0.008 dan nilai *probability delayed* 0.004 pada semua *study node*. Sedangkan nilai *probability isolated* yang digunakan adalah 0.2. Hasil dari perhitungan frekuensi kejadian per-tahun *unignited release, jet fire, flash fire* dan *explosion* dari rumus (2, 3, 4 dan 5) dengan 5 variasi kebocoran yaitu 0.01%, 0.1%, 1%, 10% dan 100% menunjukkan nilai rata-rata paling tinggi terjadi pada *unignited release* dimana terdapat 27 frekuensi dari total 40 frekuensi atau sekitar 68% yang menunjukkan level ALARP. Namun sisanya berada pada level *intolerable risk*. Sedangkan kejadian *jet fire, flash fire* dan *explosion* menunjukkan rata-rata kejadian hampir sama dengan range nilai ada pada level ALARP dan Low Risk

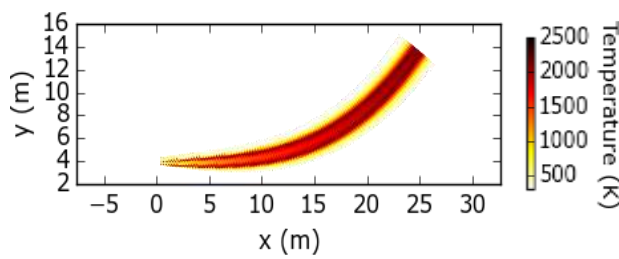
Dampak konsekuensi yang akan digambarkan pada penelitian ini diantara lain *explosion, jet fire* dan *flash fire* Salah satu metode untuk menghitung konsekuensi *explosion* adalah menggunakan metode *Equivalent TNT Mass Method* menghasilkan overpressure pada jarak 100 meter dimana terdapat bangunan terdekat dari lokasi ledakan sebesar 218.8 kPa atau 31.726 Psi.

Gambar 1 berikut ini merupakan grafik yang menunjukkan hubungan nilai *overpressure* yang terjadi dalam pusig pada beberapa titik dari pusat ledakan dalam meter.

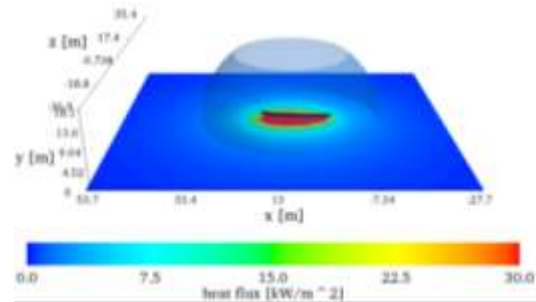


**Gambar 1.** Grafik Hubungan Jarak dan Overpressure

Untuk kejadian *jet flame*, pemodelan dilakukan berdasarkan temperatur dan energi radiasi yang dihasilkan. Pemodelan kejadian dilakukan menggunakan *software* HyRAM dimana hasil tertinggi dengan panjang api terpanjang mencapai lebih dari 25 meter terjadi pada *streamline* 29. Pada gambar 2 merupakan jet flame output dengan gradasi warna menunjukkan temperatur dalam kelvin, sedangkan pada gambar 3 merupakan energi radiasi (*heatflux*) yang dikeluarkan dalam kW/m<sup>2</sup>:



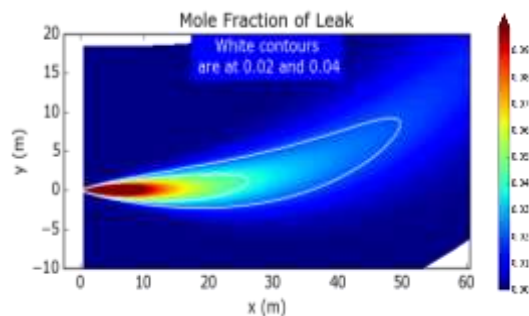
Gambar 2. Jet Flame Output (Streamline 29)



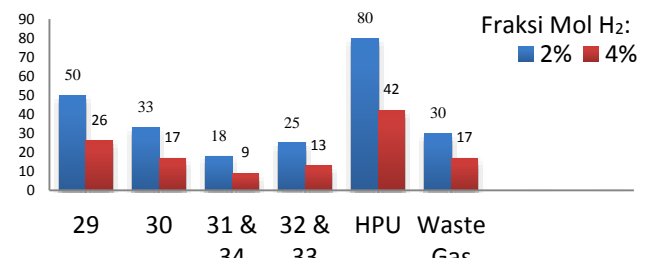
Gambar 3. Jet Flame Output (Streamline 29)

Dari pemodelan yang dilakukan pada 8 *study node* dapat diketahui jarak aman radiasi *thermal flux* adalah 1.6 kW/m<sup>2</sup> (World Bank, 1985). Dengan hasil perkiraan jarak aman *jet fire* pada streamline 29, 30, 31, 32 dan 33 berturut-turut pada jarak 31, 18, 10, 13, 13, dan 10 meter, sedangkan HPU dan *Waste Gas* pada jarak 60 dan 28 meter

Berdasarkan perbedaan gradasi yang mewakili persentase molar hydrogen/*mole fraction* yang akan digunakan menjadi parameter atau kriteria yang digunakan pada *flash fire* adalah LFL. Dimana untuk memprediksi dampak *flash fire* dapat dipertimbangkan orang-orang yang berada pada radius dengan konsentrasi: dibawah LFL akan menyebabkan kontak langsung dengan api akan meninggal (fatality 100 % dari populasi) dan berada pada radius 1/2 LFL akan menderita dampak pernapasan (CCPS, 2000 dan Zarei, 2014). Pada gambar 4 merupakan salah satu contoh hasil pemodelan gas plume dispersion pada streamline 29. Dimana garis batasan putih menunjukkan konsentrasi LFL (4% atau 0.04) dan 1/2 LFL (2% atau 0.02). pada gambar 5 menunjukkan perbedaan estimasi panjang *gas plume dispersion*. Estimasi konsekuensi *flash fire* dapat diketahui dari jarak yang setara dengan konsentrasi LFL menyebabkan kematian sedangkan pada konsentrasi 1/2 LFL dapat menyebabkan gangguan pernapasan. Grafik pada Gambar 5 merupakan estimasi jarak dampak akibat *flash fire*. Sehingga dapat diketahui lokasi kebocoran yang paling berbahaya jika kebocoran terjadi ada pada unit HPU dimana potensi kematian akibat *flash fire* terjadi pada radius 80 meter dari lokasi kebocoran sedangkan potensi terjadinya gangguan pernapasan terjadi pada radius 120 meter dari lokasi kebocoran.



Gambar 4. Gas Plume Dispersion Output



Gambar 5. Grafik perbedaan jarak jangkauan mol fraksi 2% dan 4%

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi pustaka pada unit *hydrogen* potensi risiko yang tinggi terjadi kebocoran *hydrogen* pada *purification system* karena memiliki konsentrasi *hydrogen* tertinggi dapat mencapai 99.9% dan dalam fase gas. Berdasarkan hasil perhitungan frekuensi kejadian yang dilakukan pada 8 titik *study* (*streamline* 29-34, *vessel* HPU dan *vessel waste gas drum*) dengan 5 variabel kebocoran dapat disimpulkan bahwa yang paling tinggi nilai rata-rata skenario frekuensinya adalah *unignited release* atau kebocoran gas yang tidak menyala. Sedangkan pada *jet fire* dan *flash fire* dan *explosion* berada pada level ALARP atau dapat diterima.

Konsekuensi kebocoran pada unit *hydrogen plant* khususnya *purification system* memiliki potensi bahaya terjadinya skenario kecelakaan meliputi: *unignited release* yang dapat memicu *flash fire* dan *explosion* jika terjadi penyalaan. Sedangkan *jet fire* dan *flash fire* konsekuensi dampaknya berupa dampak termal dan *explosion* berupa dampak *overpressure*

Estimasi dampak dari *jet fire* terpanjang mencapai lebih dari 25 meter yang ada pada streamline 29 dan HPU dengan perkiraan jarak aman 60 meter jika ditinjau dari energi radiasi panasnya. Pada flash fire yang didapat dari pemodelan *unignited release* estimasi jarak terjauh yang menyebabkan *fatality* 40 meter lebih pada kebocoran HPU. Sedangkan pada explosion menimbulkan kematian pada jarak 200 meter sebanyak 22% dari populasi pada radius tersebut yang berada diluar ruangan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bjeketvedt, D., & Mjaavatten, A. (n.d.). A Hydrogen-Air Explosion in A Process Plant : A Case History, (3918), 1–11.
2. CCPS-AIChE. (2000). *Guidlines for Chemical Process Risk Quantitative Risk Analysis* (2nd ed.). New York: CCPS American Institute of Chemical Engineers.
3. Javad, M., Zarei, E., & Badri, N. (2012). The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. *International Journal of Hidrogen Energy*, 37(24), 19241–19249. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.082>
4. Mohammadfam, I., & Zarei, E. (2015). Risk modeling and major accidents analysis of hidrogen and natural gas releases : A comprehensive risk analysis framework. *International Journal of Hidrogen Energy*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.117>
5. Mulya, Y. A. (2014). *Evaluasi Potensi Bahaya pada Hidrogen Plant Menggunakan Metode Integrated Inherent Safety Index (I2SI) (Studi Kasus : PT. XYZ)*.
6. NASA. (2005). SAFETY STANDARD FOR HIDROGEN AND HIDROGEN. *Guidlines for Hidrogen System Design, Materials, Selection, Operation, Storage, and Transportation*.
7. Netherlands. (1999). Guidelines for quantitative risk assessment: "purple book". The Hague: Directorate-General for Social Affairs and Employment.