

LAPORAN TUGAS AKHIR

**PRARANCANGAN PABRIK KIMIA
HEXAMETHYLENETETRAMINE (Hexamine) DARI AMONIAK
DAN FORMALDEHID DENGAN PROSES ALEXANDER
F.MACLEAN KAPASITAS 120.000 TON/TAHUN**



**Disusun sebagai Salah satu Persyaratan untuk Menyelesaikan
Pendidikan Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik
Universitas Setia Budi Surakarta**

**Oleh :
Septia Ningsih
23170320D**

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SETIA BUDI
SURAKARTA
2022**

LEMBAR PERSETUJUAN

Laporan Tugas Akhir

**Prarancangan Pabrik Kimia *Hexamethylenetetramine (Hexamine)* dari
Amoniak dan Formaldehid dengan Proses Alexander F.Maclean**

Kapasitas 120.000 Ton/tahun

Oleh :

Septia Ningsih

23170320D

Telah Disetujui Oleh Pembimbing

Pada Tanggal 1 Agustus 2022

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Supriyono, S.T., M.T.
NIS. 01199508011049



Ir. Sumardiyono, M.T.
NIS. 01199403231041

Mengetahui,
Ketua Prodi S1 Teknik Kimia



Gregorius Prima Indra Budianto, S.T., M.Eng.
NIS. 01201407261183

LEMBAR PENGESAHAN

Laporan Tugas Akhir

Prarancangan Pabrik Kimia *Hexamethylenetetramine (Hexamine)* dari
Amoniak dan Formaldehid dengan Proses Alexander F.Maclean

Kapasitas 120.000 Ton/tahun

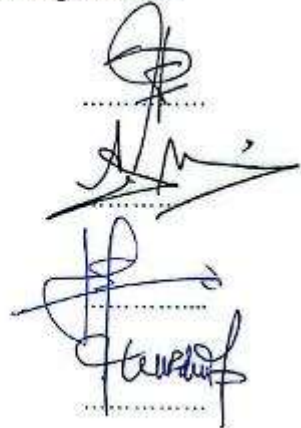
Oleh :

Septia Ningsih

23170320D

Telah Dipertahankan dalam ujian laporan pada tanggal 9 Agustus 2022

- Penguji :
1. Gregorius Prima Indra B, S.T.,M.Eng.
 2. Dewi Astuti Herawati, S.T.,M.Eng.
 3. Dr. Supriyono, S.T.,M.T.
 4. Ir. Sumardiyono, M.T.



Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Drs. Suseno, M.Si.

Ketua Program Studi



Gregorius Prima I.B., S.T., M.Eng.
NIS. 01201407261183

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

- ❖ *Ketika kamu merasa ingin berhenti dan menyerah, pikirkan tentang mengapa kamu memulainya dan seberapa jauh kamu telah melangkah.*
- ❖ *"If you gratefull, I will give you more and more"*
(Q.S. Ibrahim : 7)
- ❖ *"Tidak mengenal diri sendiri adalah suatu hal yang bodoh" - Chou Mobile legends*
- ❖ *Kalau kamu tidak jalan hari ini, maka besok kamu harus lari.*

♥ Terima kasih untuk.....

1. Allah SWT. segala puji syukur kupanjatkan hanya kepada-Mu atas segala tuntunanNya dan bersyukur aku menjadi hamba-Mu, semoga kami selalu terjaga dalam berkat-Mu.
2. Mama dan Bapak tersayang... Terima kasih seluruh kasih sayang, dukungan dan kepercayaannya selama ini. Kalian adalah segalanya bagiku. Bapak adalah seorang pahlawan yang sangat berarti dalam hidupku dan Mama adalah bidarari tanpa sayap yang ada dihidupku. Pahlawan yang banyak mengajarku arti kehidupan, yang selalu menyelipkan namaku disetiap doa-doa dan pengharapanmu. Mama dan Bapak semoga perjuangan kalian, tetesan keringatmu terwujud sebagai keberhasilan dan kebahagiaanku...
3. Pak Supri dan Pak Diyon, sebagai pembimbing tugas akhir saya sekaligus sebagai dosen saya selama menjadi mahasiswa di Tekkim USB, saya mengucapkan terima kasih atas bimbingannya selama ini, maaf jika saya mengesalkan karena kelemotan saya ☺
4. Seluruh Dosen Teknik Kimia USB, terima kasih atas masukan-masukannya, atas ilmu yang telah kalian berikan selama kuliah, atas kesediaan waktu untuk selalu

mendengarkan keluh kesah kami dan kesusahan-kesusahan kami.

5. Untuk Mas Win, Mas Ari, Yuk Yuyun dan Kak Diyah, terima kasih atas segala dukungan kalian, doa kalian dan telinga kalian yang telah bersedia mendengarkan *sambatan-sambatan* adikmu ini wkwkwkwk
6. Untuk sahabat-sahabatku selama kuliah (Putri, Novi dan Risa), terima kasih kalian telah menjadi teman seperjuanganku semasa kuliah. Aku juga tidak mungkin sampai dititik ini tanpa kalian. Aku harap dan selalu aku semogakan kalian juga dapat segera menyusul S.T yaw :p
7. Untuk Bestie ku, Wisnu. Terima kasih ya atas doa dan dukungannya sampai aku bias ditahap ini, juga siap sedia menemaniku dalam menyusun skripsi ini dan selalu menyemangatiku sampai akhirnya skripsi ini selesai.
8. Untuk Sahabatku sejak bayi, Ely Ekawati. Terima kasih atas dukungan, doa dan bantuannya selama aku menyusun skripsi ini, juga sebagai pendengar baik segala keluh kesahku tentang apapun, maaf ya sering aku susahin wkwk
9. Semua teman-teman perjuangan Tekkim 17, ayo semangat untuk cepet lulus dan menyelesaikan tugas akhir ini. Aku yakin kalian semua hebat, dan kita pasti bias, kawan. Semangat!!!
10. Untuk semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, terima kasih atas semua bantuannya kalian.
11. *Last but no least, / wanna thank me, / wanna thank me for believing in me, / wanna thank me for doing all this hard work, / wanna thank me for having days off, / wanna thank me for never quitting, / wanna thank me for just being me at all times.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat, hidayah dan petunjukNya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir prarancangan pabrik kimia dengan baik.

Judul tugas akhir ini adalah **Prarancangan Pabrik Kimia Hexamethylenetetramine (Hexamine) dari Amoniak dan Formaldehid dengan Proses Alexander F. Maclean Kapasitas 120.000 Ton/Tahun**. Setiap mahasiswa Sarjana Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Setia Budi Surakarta harus memenuhi persyaratan Tugas Prarancangan Pabrik Kimia sebagai syarat untuk menyelesaikan program studi Sarjana. Dengan upaya ini diharapkan potensi peminatan dan pemahaman teori - teori yang telah teruji dalam jangka waktu yang lama akan meningkat.

Penyusun laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan serta dorongannya dari berbagai pihak. Melalui laporan ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Djoni Taringan, MBA., selaku Rektor Universitas Setia Budi Surakarta
2. Dr. Drs. Suseno, M.Si., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Setia Budi Surakarta
3. Gregorius Prima Indra Budianto, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Kimia Universitas Setia Budi Surakarta dan selaku dosen penguji saya yang telah meluangkan waktunya untuk menguji hasil laporan tugas akhir saya.
4. Dr. Supriyono, S.T., M.T., dan Ir. Sumardiyono, M.T., selaku pembimbing tugas akhir saya yang telah memberikan banyak bimbingan, masukan, waktu serta nasihat sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Dewi Astuti Herawati, S.T., M.Eng., selaku dosen penguji saya yang telah sudi memberikan dan meluangkan waktunya untuk menguji hasil laporan tugas akhir saya.
6. Bapak dan Ibu Dosen prodi teknik kimia yang telah memberikan ilmunya, bimbingannya serta masukannya selama kuliah.
7. Semua pihak, teman, sahabat, keluarga, dan Tata Usaha Fakultas Teknik yang telah membantu saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak kendala, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Penulis laporan terakhir ini percaya bahwa ini akan memberi saya dan semua teman saya informasi baru. Jika ada banyak kesalahan dalam penulisan, penulis mohon maaf. Saya berharap semua pihak yang membutuhkan dapat menggunakan tugas akhir ini sebagai referensi.

Surakarta, 15 Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
INTISARI	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Pendirian Pabrik.....	1
1.2 Kapasitas Rancangan.....	2
1.2.1 Kebutuhan <i>Hexamethylenetetramine</i> di Indonesia.....	2
1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku	3
1.2.3 Kapasitas Pabrik yang Sudah Ada.....	4
1.3 Penentuan Lokasi Pabrik	5
1.4 Proses yang dipilih	7
1.4.1 Macam-macam Proses	7
1.4.2 Manfaat Produk.....	10
1.5 Tinjauan Pustaka	10
1.5.1 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Dasar dan produk	11
1.5.2 Metode Pembentukan yang dipilih	13
BAB II SPESIFIKASI BAHAN DASAR.....	18
2.1 Spesifikasi Bahan Dasar.....	18
2.1.1 Amoniak.....	18
2.1.2 Formaldehid	18
2.2 Spesifikasi Produk.....	18
BAB III DESKRIPSI PROSES	19
3.1 Paparan Proses Pembentukan.....	19
3.1.1 Tahap Penyiapan Bahan Dasar.....	19
3.1.2 Tahap Pembuatan <i>Hexamethylenetetramine</i>	19
3.1.3 Tahap Pemurnian dan Penyimpanan Produk.....	20
3.2 Diagram Alir.....	21

BAB IV NERACA MASSA DAN NERACA PANAS.....	22
4.1 Neraca Massa	22
4.2 Neraca Panas	24
BAB V SPESIFIKASI PERALATAN PROSES	30
BAB VI DIVISI PENDUKUNG PRODUKSI (UTILITAS)	44
6.1 Divisi Pendukung Produksi (Utilitas)	44
6.1.1 Divisi Penyedia dan Pengelola Air	44
6.1.2 Bagian Penyediaan <i>Steam</i>	49
6.1.3 Bagian Penyediaan Udara Tekan	49
6.1.4 Bagian Penyediaan Listrik	49
6.1.5 Bagian Pasokan Bahan Bakar	51
6.1.6 Bagian Pengelola Limbah	52
6.1.7 Bagian Uji Laboratorium	53
6.1.8 Keselamatan dan Kesehatan Kerja.....	55
6.2 Peralatan Utilitas	56
BAB VII ORGANISASI DAN TATA LETAK LOKASI	
PERUSAHAAN.....	62
7.1 Wujud Perusahaan.....	62
7.2 Struktur Organisasi.....	63
7.3 Struktur Upah Karyawan.....	67
7.3.1 Struktur Karyawan	67
7.3.2 Struktur Upah.....	67
7.3.3 Pembagian kerja Karywan	69
7.4 Kesejahteraan Karyawan.....	71
7.5 Manajemen Tata Kelola Produksi	71
7.5.1 Merencanakan Produksi.....	72
7.5.2 Pengontrolan Proses.....	73
7.6 Tata Letak Lokasi Pabrik	74
7.7 <i>Lay Out</i> Perangkat Produksi.....	75
BAB VIIIEVALUASI EKONOMI.....	79
8.1 Kalkulasi Ongkos Produksi	82
8.2 <i>Total Fixed Capital Invesment</i>	84
8.3 <i>Working Capital</i>	85
8.4 <i>Manufacturing Cost</i>	85
8.5 <i>General Expanses</i>	86
8.6 Analisis Ekonomi	86
8.6.1 <i>Return Of Invesment</i> (ROI)	86
8.6.2 <i>Pay Out Time</i> (POT).....	87

8.6.3 <i>Break Event Point</i> (BEP).....	87
8.6.4 <i>Shut Down Point</i> (SDP).....	87
BAB IX KESIMPULAN	89
DAFTAR PUSTAKA.....	90
LAMPIRAN I	91
LAMPIRAN II.....	92
LAMPIRAN III	93
LAMPIRAN IV	106

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Data Impor Hexamine di Indonesia.....	2
Tabel 2. Data Industri penghasil Amoniak di Indonesia	4
Tabel 3. Data Industri Penghasil Formaldehid di Indonesia	4
Tabel 4. Data Pabrik Hexamine beserta Kapasitasnya	4
Tabel 5. Komparasi Proses Pembuatan Hexamethylenetetramine	10
Tabel 6. Harga $\Delta H^{\circ}f$ Setiap Elemen.....	15
Tabel 7. Harga ΔG° Setiap Elemen	16
Tabel 8. Neraca Massa <i>Mixer</i>	22
Tabel 9. Neraca Massa Reaktor.....	22
Tabel 10. Neraca Massa Evaporator.....	23
Tabel 11. Neraca Massa <i>Crystallizer</i>	23
Tabel 12. Neraca Massa <i>Centrifuge</i>	23
Tabel 13. Neraca Massa <i>Rotary dryer</i>	24
Tabel 14. Data Kapasitas Panas (Cp) (kJ/mol.K)	24
Tabel 15. Neraca Panas <i>Mixer</i>	25
Tabel 16. Neraca Panas <i>Heater 1</i>	25
Tabel 17. Neraca Panas <i>Heater 2</i>	26
Tabel 18. Neraca Panas Reaktor.....	26
Tabel 19. Neraca Panas Evaporator.....	26
Tabel 20. Neraca Panas <i>Condensor</i>	27
Tabel 21. Neraca Panas <i>Cooler 1</i>	27
Tabel 22. Neraca Panas <i>Cooler 2</i>	27
Tabel 23. Neraca Panas <i>Crystallizer</i>	28
Tabel 24. Neraca Panas <i>Centrifuge</i>	28
Tabel 25. Neraca panas <i>Rotary dryer</i>	28
Tabel 26. Neraca Panas <i>Heater</i> Udara.....	29
Tabel 27. Neraca Panas <i>Cooling conveyor</i>	29
Tabel 28. Total air pendingin yang dibutuhkan alat proses.....	46
Tabel 29. Peralatan Proses yang Membutuhkan Steam.....	47
Tabel 30. Keperluan listrik dalam proses produksi	50
Tabel 31. keperluan energi listrik yang diperlukan utilitas	50
Tabel 32. Gaji Karyawan.....	68
Tabel 33. Pembagian Shift Pegawai.....	70
Tabel 34. Besar Area Bangunan Pabrik.....	74
Tabel 35. Indeks Harga Alat.....	80
Tabel 36. Harga Alat Proses	81

Tabel 37. Harga Alat Utilitas.....	82
Tabel 38. Total <i>Fixed Invesment</i>	84
Tabel 39. <i>Working Capital</i>	85
Tabel 40. <i>Manufacturing Cost</i>	85
Tabel 41. <i>General Expanses</i>	86
Tabel 42. <i>Fixed Cost, Variable Cost, Regulated Cost</i>	87
Tabel 43. Data Cp	110
Tabel 44. ΔH_f° keadaan standar (25°C)	115

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Grafik Data Impor <i>Hexamine</i>	3
Gambar 2. Peta Administrasi Kab. Gresik, Prov. Jawa Timur	7
Gambar 3. Diagram Alir Kualitatif.....	21
Gambar 4. Diagram Alir Kuantitatif.....	21
Gambar 5. Struktur Organisasi	63
Gambar 6. Lay Out Pabrik <i>Hexamethylenetetramine</i>	75
Gambar 7. Tata Letak Alat Proses.....	78
Gambar 8. Grafik BEP dan SDP	88
Gambar 9. Diagram Alir Proses <i>Hexamethylenetetramine</i>	91
Gambar 10. Diagram Alir Utilitas	92

INTISARI

Pada tahun 2026, Gresik, Jawa Timur, akan menjadi rumah bagi pabrik Hexamethylenetetramine 120.000 ton/tahun dari Formaldehida dan Amoniak. Formaldehida diperoleh dari PT. Intan Wijaya, Semarang, sedangkan bahan baku amoniak dipasok dari PT. Petrokimia, Gresik. Reaksi Heksamin dilakukan secara ireversibel dalam Reaktor Aliran Tangki Berpengaduk (RATB) dalam keadaan eksotermik dan isothermal dengan jaket pendingin pada suhu 40 °C dan tekanan 1 atm. Pabrik ini termasuk dalam kategori risiko rendah.

Formaldehida dan amonia pertama-tama direaksikan dalam reaktor untuk memulai proses heksamin (R-01). Produk Hexamine yang dihasilkan adalah 15151,15 kg/jam. Unit pendukung proses meliputi unit suplai air pendingin 860 kg/jam, kebutuhan make-up air pendingin 86 kg/jam, kebutuhan air sanitasi 1718,2 kg/jam, kebutuhan umpan boiler 3599,47 kg/jam, dan kebutuhan air proses 159 kg/jam. Air Sungai Bengawan Solo digunakan untuk kebutuhan air, dan PLN serta genset cadangan digunakan untuk kebutuhan energi pada saat PLN padam.

Studi ekonomi pabrik Hexamine menghasilkan pendapatan sebelum pajak sebagai hasilnya. Setiap tahun, 81.907.816.740,66. Penghasilan setelah pajak sebesar 61.430.862.555,50 setiap tahun. Sebelum pajak, Pengembalian Investasi (ROI) adalah 39%, dan setelah pajak, adalah 29%. Pay Out Time (POT) adalah 2,1 tahun sebelum pajak dan 3 tahun setelah pajak. 42,8% Break Event Point (BEP). 7,6% Titik Mati (SDP). Pendirian pabrik Hexamine adalah layak, sesuai dengan temuan dari analisis kelayakan yang dibahas di atas.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Pendirian Pabrik

Seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK), pembangunan Indonesia mengalami kemajuan yang sangat pesat, khususnya industri kimia. Sebagai negara berkembang, Indonesia diarahkan untuk menciptakan pembangunan struktur ekonomi yang lebih baik, seperti pembangunan industri. Pembangunan industri di Indonesia dapat memperkuat struktur ekonomi nasional, meningkatkan daya tahan ekonomi nasional, memperluas lapangan pekerjaan, meningkatkan kemampuan bersaing, menaikkan pangsa pasar dalam negeri maupun luar negeri serta mendorong berkembangnya kegiatan berbagai sektor pembangunan lainnya. Sektor industri mengalami peningkatan yang cukup pesat. Hal ini tentunya memacu perbaikan terus-menerus dan menciptakan terobosan-terobosan baru agar produk-produk manufaktur berdaya saing, efektif dan efisien. Tentunya produk yang dihasilkan pun harus tetap ramah lingkungan.

Salah satu produk yang diperlukan dikala ini adalah *Hexamethylenetetramine (Hexamine)*. *Hexamethylenetetramine* adalah senyawa organik heterosiklik dengan rumus kimia $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ yang berbentuk fase padat kristal bubuk berwarna putih bening.

Bahan kimia seperti *hexamethylenetetramine* memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan sehari-hari, terutama di sektor industri. *Hexamine* adalah elemen dasar umum untuk siklon yang sangat eksplosif pada saat penciptaan. Heksamin berfungsi sebagai bahan baku antiseptik pada bidang medis, pengeras pada industri resin, penghambat susut pada industri tekstil, dan penambah elastisitas pada industri serat selulosa, selain aplikasinya pada bahan peledak. Penggunaan fungisida dan pestisida dalam pertanian (Kent,1974).

Kebutuhan *Hexamethylenetetramine* di Indonesia dikala ini teenuhi sebagian besar masih mengimpor dari luar negara. Adanya pabrik *Hexamethylenetetramine* di Indonesia hanya berdiri satu pabrik menyebabkan Indonesia hendak terus menerus bergantung terhadap impornya dari luar negara untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri, serta dapat menimbulkan devisa negara menurun. Untuk mencukupi kebutuhan dan mengurangi impor bahan kimia khususnya *Hexamethylenetetramine*, maka cukup tepat untuk mendirikan lagi

pabrik *Hexamethylenetetramine* di Indonesia. Di samping itu, amoniak dan formaldehid selaku bahan baku dapat diperoleh di Indonesia sendiri. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka pabrik *Hexamethylenetetramine* dapat didirikan di Indonesia mempunyai kesempatan yang besar di berbagai aspek sehingga kebutuhan dalam negara bisa teenuhi, menghemat devisa negara dan membuka lapangan pekerjaan untuk kurangi tingkatan pengangguran.

1.2 Kapasitas Rancangan

Dalam pendirian suatu pabrik, analisa pasar untuk penentuan kapasitas pabrik adalah hal yang sangat penting. Dalam penentuan kapasitas perancangan pabrik *Hexamethylenetetramine* diperlukan beberapa pertimbangan yaitu kebutuhan produk dan ketersediaan bahan baku.

1.2.1 Kebutuhan *Hexamethylenetetramine* di Indonesia

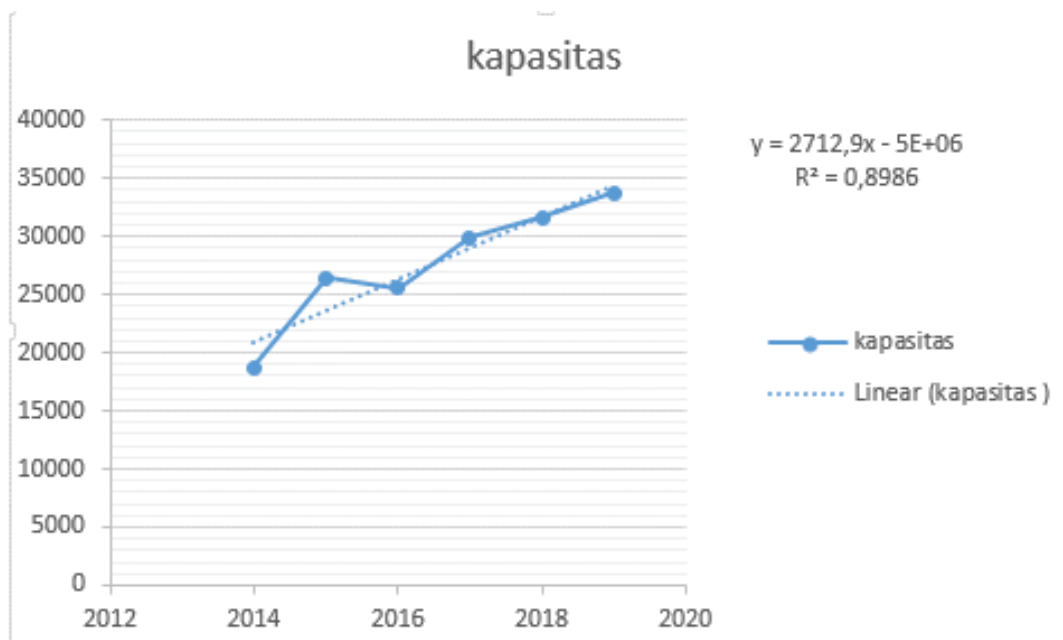
Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, 2019, kebutuhan impor *Hexamethylenetetramine* di Indonesia mengalami peningkatan. Data impor *Hexamethylenetetramine* di Indonesia dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Data Impor *Hexamine* di Indonesia

Tahun	Kapasitas (Ton/tahun)
2014	18700
2015	26412
2016	25561
2017	29875
2018	31558
2019	33772

(Sumber : <https://www.bps.go.id>. 2021)

Berdasarkan data impor tersebut *Hexamethylenetetramine* terus meningkat. Peningkatan tersebut dapat menjadi pertimbangan dalam pendirian pabrik *Hexamethylenetetramine* di Indonesia. Untuk menentukan kapasitas perancangan pabrik dapat dilakukan dengan beberapa metode untuk memprediksikan kebutuhannya *Hexamethylenetetramine* pada tahun 2026. Berikut salah satu metode yaitu regresi linier yang dilakukan dengan data dari Badan Pusat Statistik:



Gambar 1. Grafik Data Impor *Hexamine*

Dari grafik di atas didapatkan persamaan yang R^2 lebih mendekati 1 yaitu metode linier dengan $R^2 = 0,8986$ dan persamaan $y = 2712,9x - 5E+06$. Dari persamaan tersebut didapatkan hasil perhitungan kebutuhan *Hexamethylenetetramine* sebagai berikut :

$$y = 2712,9x - 5E+06$$

$$y = 2712,9 (2026) - 5E+06$$

$$y = 496.335,4 \text{ ton /tahun}$$

dengan :

y = data impor *Hexamethylenetetramine*

x = tahun kebutuhan *Hexamethylenetetramine*

Sehingga pada tahun 2026 kapasitas perancangan pabrik *Hexamethylenetetramine* dapat didirikan dengan kapasitas sebesar 120.000 ton/tahun.

1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku pembuat *Hexamethylenetetramine* adalah amoniak dan formaldehid. Kebutuhan bahan baku pembuat *Hexamethylenetetramine* semua sudah tersedia di Indonesia sehingga tidak perlu dikhawatirkan dan dirasa sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan bahan baku. Berikut daftar beberapa industri penghasil amoniak dan formaldehid di Indonesia pada tabel di bawah ini :

Tabel 2. Data Industri penghasil Amoniak di Indonesia

No	Nama Industri	Kapasitas (Ton/tahun)
1	PT. Pupuk Sriwijaya Palembang (www.pusri.co.id , 2019)	1.440.000
2	PT. Pupuk Iskandar Muda Aceh (www.pupuk-indonesia.com , 2015)	865.050
3	PT. Petrokimia Gresik (www.petrokimia-gresik.com , 2017)	1.150.000
4	PT. Pupuk Kujang Cikampek (www.pupuk-kujang.co.id , 2020)	660.000
5	PT. Pupuk Kaltim (www.pupuk-indonesia.com , 2015)	2.080.000

Tabel 3. Data Industri Penghasil Formaldehid di Indonesia

No	Nama Industri	Kapasitas (Ton/tahun)
1	PT. Intan Wijaya Chemical Industry Semarang	65.000
2	PT. Dover Chemical Cilegon	60.000
3	PT. Batu Penggal Chemical Industry Samarinda	28.000

(Sumber : Daftar Perusahaan Indonesia, 2018)

1.2.3 Kapasitas Pabrik yang Sudah Ada

Pada tabel di bawah ini dapat dilihat data kapasitas produksi pabrik *Hexamine* yang sudah berdiri sebagai berikut :

Tabel 4. Data Pabrik *Hexamine* beserta Kapasitasnya

Negara	Perusahaan	Kapasitas (Ton/tahun)
India	Kanoria Chemicals & Ind. Ltd ¹	20.000
Indonesia	PT. Intan Wijaya Internasional ²	500.000
Iran	Sina Chemical Industrial ³	25.000
China	Jinan Xiangrui Chemical Co., Ltd ⁴	22.000
China	Hebei Yuhang Chemical Industry Co., Ltd ⁵	20.000

(Sumber : www.karoniachem.com¹, www.intanwijaya.com², <http://sinachem.com>³, Gmdu.net⁴, www.hxchem.net⁵)

Pabrik yang akan didirikan pada tahun 2026 dirancang dengan kapasitas 120.000 ton/tahun guna untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri dan di Indonesia baru memiliki satu pabrik yang memproduksi

Hexamethylenetetramine serta mempertimbangkan pabrik yang sudah berdiri di luar negeri.

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

Letak geografis suatu pabrik memiliki pengaruh yang besar terhadap keberhasilan suatu perusahaan. Beberapa faktor yang dijadikan acuan dalam menentukan lokasi pabrik antara lain suplai bahan baku, pemasaran produk, transportasi, tenaga kerja, kawasan industri, suplai air, dan masih banyak faktor lain yang perlu diperhatikan. Ringkasnya, arah perusahaan dalam menentukan lokasi pabrik ditujukan untuk mencapai manfaat teknis dan ekonomis yang optimal. Selain itu, dalam membangun pabrik perlu dijaga agar tidak mengganggu lingkungan dan melindungi alam dan manusia itu sendiri. Dalam perancangan pendirian pabrik *Hexamethylenetetramine* pada tahun 2026 mendatang, lokasi yang dipilih adalah daerah Gresik, Jawa Timur, dengan beberapa pertimbangan di bawah ini :

a. Penyediaan bahan baku

Lokasi bahan baku sangat penting karena bahan baku merupakan kebutuhan penting dalam pembuatan produk untuk keberlangsungan pabrik. Lokasi Gresik sangat cocok untuk membangun pabrik hexamethylenetetramine karena dekat dengan pemasok bahan baku tempat produksi amoniak hasil produksi PT. Petrokimia, Gresik, dan formaldehid hasil produksi PT. Intan Wijaya Chemical Industry, Semarang.

b. Pemasaran produk

Lokasi pabrik di Gresik sangat strategis untuk pemasaran *Hexamethylenetetramine* karena dekat dengan pelabuhan sehingga jalur distribusi pemasaran dan pengiriman akan menjadi lebih mudah.

c. Transportasi

Sarana dan prasarana transportasi sangat diperlukan dalam penyediaan bahan baku dan pemasaran produk. Gresik merupakan daerah yang strategis memiliki jalur darat yang baik serta dekat dengan pelabuhan sehingga mempermudah dalam pemasaran produk ke luar Pulau Jawa untuk menunjang kemajuan suatu industri.

d. Tenaga kerja

Ketersediaan pekerja terampil merupakan salah satu faktor kunci dalam mendukung keandalan pabrik. Kabupaten Gresik memiliki banyak perguruan tinggi dan sekolah kejuruan yang melatih tenaga terampil siap pakai untuk memenuhi kebutuhan tenaga terampil dan terdidik untuk memperlancar arus proses industri.

e. Utilitas

Agar proses produksi dapat berjalan dengan lancar, perlu diperhatikan fasilitas pendukung seperti air dan listrik. Pemenuhan kebutuhan listrik dapat ditagihkan ke PLN dan genset sebagai cadangan jika terjadi pemadaman PLN. Di sisi lain, kebutuhan air berasal dari Sungai Bengawan Solo, dan bahan bakar sebagai sumber energi dapat diperoleh dengan membeli di Pertamina.

f. Kebijakan pemerintah dan peraturan daerah

Pendirian pabrik perlu mempertimbangkan beberapa faktor kepentingan yang terakait meliputi : kebijaksanaan pengembangan industri dengan pemerataan kesempatan kerja, kesejahteraan dan hasil-hasil pembangunan. Selain itu pabrik yang didirikan harus berwawasan lingkungan yang artinya keberadaan pabrik tersebut tidak mengganggu bahkan atau merusak lingkungan sekitarnya.

Dari perspektif otonomi daerah, kebijakan pemerintah daerah sangat mendukung pendirian pabrik, yang nantinya akan meningkatkan pendapatan daerah. Berdasarkan pertimbangan faktor-faktor di atas, maka lokasi pendirian *Hexamethylenetetramine* ditempatkan di Gresik, Jawa Timur.

Aliran formalin dan amonia dari tangki bahan baku yang memasuki reaktor *plug flow*. Reaksi yang terjadi sangat cepat sehingga laju reaksi dikendalikan oleh laju pembentukan kristal heksametilenatetramine. Proses ini menggunakan panas reaksi yang dihasilkan oleh reaktor untuk menguapkan air reaksi. Reaktor dalam proses ini dirancang khusus untuk bertindak sebagai vakum evaporator dan kristalisasi sekaligus selain mereaksikan gas amonia dengan gas formaldehid. Ada dua reaktor dengan suhu reaksi 20 hingga 30°C. Untuk menjaga suhu reaksi di dalam reaktor, gunakan gas inert atau atur tekanan total saat campuran mendidih di dalam reaktor. Hal ini untuk

mengurangi kebutuhan pendinginan. Produk *heksametilenatetramine* yang keluar dari reaktor memiliki konsentrasi 25-30%. Dengan adanya panas, *Hexamethylenetetramine* dapat mengkristal langsung dari reaktor. Uap di dalam reaktor dikondensasikan saat reaktor beroperasi, dan uap yang terkondensasi dikeluarkan saat bahan inert dan tidak murni seperti metanol dilepaskan dari bagian atas reaktor. Gas ini masih mengandung hidrogen 18-20% dan dapat digunakan sebagai bahan bakar. Setelah reaktor, produk masuk ke *Centrifuge* untuk dicuci dengan air kemudian dikeringkan dan dipasarkan. Konversi dari proses Meissner adalah sekitar 97%, dan hasil dari proses ini adalah sekitar 95%. (*European Patent Office* No. 0468353A1, 1954).

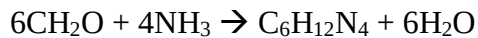
b. Proses AGF Lefebvre (Cair – gas)

Bahan yang digunakan dalam proses ini adalah larutan formalin dan gas amoniak tanpa metanol. Reaktor gelembung adalah jenis reaktor yang digunakan saat menggunakan proses ini. Formaldehida dialirkan ke dalam reaktor yang dilengkapi dengan pengaduk dan gas amonia diumpankan secara perlahan dari dasar reaktor. Suhu reaksi sekitar 20-30°C dan reaksinya eksotermis, memerlukan pendinginan. Amoniak diproduksi dalam jumlah banyak agar reaksi berlangsung sempurna. Produk yang meninggalkan reaktor diuapkan secara vakum di evaporator, bahan terkonsentrasi dan mengkristal. Kristal yang terbentuk dikumpulkan di bagian bawah evaporator dalam kotak garam dan kemudian dikirim ke *Centrifuge* untuk memisahkan kristal *hexamethylenetetramine* dan air dari *Centrifuge* dikembalikan ke evaporator. Setelah produk dikeringkan dan dikemas, produk siap untuk dikirim. Konversi dari proses ini adalah 97% dan rendemennya adalah 95%. (*US Patent* No. 3538199A, 1968).

c. Proses Alexander F. Maclean (Cair-cair)

Proses *Hexamethylenetetramine* dilakukan dengan menggunakan reaktor alir tangki beengaduk (RATB). Dalam proses ini, suhu yang digunakan dalam reaktor antara 20 dan 70 °Celcius, dan membutuhkan waktu 5 hingga 30 menit untuk penyesuaian pH. Kisaran pH yang digunakan adalah 7,0 hingga 8,0. Rasio umpan antara formaldehida dan amonia adalah 3:2.

Proses ini dapat menghasilkan rendemen 95% dengan tingkat konversi efektif 98%. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Hasil dari reaktor akan dimasukkan ke evaporator untuk pemekatan *Hexamethylenetetramine*. *Slurry* yang terbentuk dialirkan ke *Centrifuge filter*. Zat cair yang keluar dari *Centrifuge* kemudian dikembalikan ke *Mixer*. (US Patent No. 2640826A, 1953).

Berdasarkan paten, larutan yang digunakan adalah larutan formaldehida 37% dan larutan amonia 30%. Reaktor yang digunakan adalah jenis RATB. Temperatur larutan amoniak dan larutan formaldehida yang masuk ke dalam reaktor adalah 30°C, sedangkan temperatur keluar reaktor 40°C, tekanan dalam reaktor 1 atm, kondisi proses adiabatik dan sifat reaksi eksotermik, membutuhkan pendinginan adalah untuk menjaga suhu.

Dengan mengetahui dari tiga macam proses pembuatan *Hexamethylenetetramine* di atas, maka ditetapkan proses pembuatan *Hexamethylenetetramine* dengan proses Alexander F. Maclean dengan mengacu pada US Patent No. 2640826A, 1953 dan beberapa peninjauan lainnya yaitu :

- a. Informasi yang tertulis dalam US Patent ini untuk proses produksi *Hexamethylenetetramine* lebih lengkap dari tata cara sebelumnya, termasuk data kondisi operasi, tekanan di evaporator dan rentang suhu reaktor.
- b. Pengaruh Respon yang berlangsung ialah respon homogen fase cair sehingga penindakan lebih gampang dalam perihal *treatment* apabila dibanding respon homogen fase gas semacam tata cara proses Meissner maupun fase heterogen cair serta gas pada tata cara proses AGF Lefebvre.
- c. Perubahan yang dihasilkan cukup tinggi yaitu 98% dan yield 95% dibandingkan kedua proses di atas.

Berikut tabel perbandingan proses pembuatan *Hexamethylenetetramine* dapat dilihat di bawah ini :

Tabel 5. Komparasi Proses Pembuatan *Hexamethylenetetramine*

Sifat	Metode		
	Meissner	AGF Levebvre	Alexander F.Maclean
Fase Bahan Baku	Gas – gas	Cair - gas	Cair – cair
Suhu Reaksi (°C)	20 – 30	20 – 30	20 – 70
Tekanan Reaksi	1 atm	1 atm	1 atm
Konversi	97%	97%	98%
Yield	95%	95%	95%

1.4.2 Manfaat Produk

Secara umum manfaat *Hexamethylenetetramine* diperuntukan sebagai berikut :

1. Bidang medis selaku bahan antiseptik yang diketahui untuk *urotropin*
2. Diperuntukan sebagai bahan baku pembuatan *cyclonite* (bahan peledak)
3. Pada industri logam sebagai bahan anti karat atau korosi
4. Sebagai bahan untuk menyerap gas beracun
5. Bahan pendeteksi logam
6. Pada industri pupuk terutama urea dapat digunakan sebagai *anti caking agent*
7. Pada pembuatan resin digunakan sebagai bahan aditif
8. Dalam industri kain tekstil digunakan untuk *shrink-proofing agent* dan untuk mempercantik warna
9. Dalam industri karet digunakan sebagai *accelerator* dan untuk mencegah karet tervulkanisasi
10. Digunakan sebagai bahan aditif dalam proses pembuatan selulosa (untuk menambah elastisitas)

(Kent, 1974)

1.5 Tinjauan Pustaka

Hexamethylenetetramine juga dikenal sebagai *hexamine* atau *urotropin* adalah senyawa organik heterisiklik dengan rumus kimia $C_6H_{12}N_4$. Senyawa yang memiliki bentuk kristal berwarna putih ini sangat larut dalam air dan pelarut organik polar yang memiliki struktur seperti sangkar yang mirip dengan adamantane. Hal ini dapat berguna dalam sintesis senyawa organik lainnya termasuk plastik, obat-obatan dan aditif karet.

Bahan baku dari pembuatan *Hexamethylenetetramine* adalah amoniak ($\text{NH}_{3(\text{aq})}$) dan formaldehid (CH_2O). Amoniak adalah senyawa kimia yang berwujud gas atau cair dengan bau tajam yang khas. Amoniak memiliki banyak kegunaan diantaranya sebagai bahan untuk obat-obatan, campuran untuk pembuatan pupuk urea dan ZA, bahan dasar untuk pembuat peledak, kertas plastik dan deterjen. Sedangkan formaldehid yang biasa disebut dengan formalin merupakan aldehida yang memiliki bentuk gas, cair atau padatan yang dikenal dengan *paraformaldehyde*. Formaldehid dapat digunakan sebagai pembasmi sebaigian besar bakteri, sehingga dapat digunakan sebagai disinfektan. Juga dapat dipakai sebagai pengawet dan vaksinasi.

1.5.1 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Dasar dan produk

1.5.1.1 Bahan Baku

1. $\text{NH}_{3(\text{aq})}$

Nama	: Amoniak, Ammonium Hidroksida
Rumus molekul	: $\text{NH}_{3(\text{aq})}$
Berat molekul	: 35,04 g/mol
<i>Spesific gravity</i>	: 0,5971 g/cm ³
Wujud	: cair
Warna	: tidak berwarna
Bau	: tajam
Kelarutan	: sangat mudah terlarut dalam air
Titik didih	: 37,7°C
Titik lebur	: -57,5°C

(https://id.wikipedia.org/wiki/Amonium_hidroksida)

Sifat kimia :

- Amoniak ketika bereaksi bersama formaldehid akan menghasilkan *Hexamethylenetetramine* dan air
- Amoniak dapat diuraikan atau didekomposisi menjadi unsur nitrogen dan hidrogen dengan katalis logam panas dan dialiri arus listrik. Reaksinya :

$$2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$$
- Amoniak mudah terbakar di udara. Ia akan terbakar oleh oksigen di atmosfer dan mneghasilkan gas nitrogen dan uap air. Reaksinya :

$$4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$

(Kirk & Othmer, 1998)

2. CH₂O

Nama	: Formaldehida, Formalin
Rumus molekul	: CH ₂ O
Berat molekul	: 30,03 g/mol
<i>Specific gravity</i>	: 1,067 g/cm ³
Wujud	: cair
Warna	: tidak berwarna
Bau	: tajam
Kelarutan	: larut sempurna dalam air, alkohol dan aseton
Titik didih	: 101°C
Titik beku	: 0°C

(MSDS, 2019)

Sifat kimia :

- a. Formaldehid selanjutnya tereduksi membentuk metal format beserta bantuan katalis tembaga atau asam borat.

Reaskinya :



- b. Formaldehid tereaksi dengan asetaldehid pada fase cair akan membentuk *pentaerythritol*. Reaksinya :



- c. Pada kondisi katalis asam dan fase cair formladehid bereaksi dengan alkohol membentuk formals, misalnya, dimetosimetana dari methanol. Reaksinya :



(Kirk & Othmer, 1998)

1.5.1.2 Produk

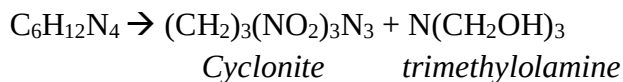


Nama	: <i>Hexamethylenetetramine, Urotropine</i>
Rumus molekul	: C ₆ H ₁₂ N ₄
Berat molekul	: 140,19 g/mol
<i>Specific gravity</i>	: 1,33 g/cm ³
Wujud	: kristal padat
Warna	: putih
Kelarutan	: larut dalam air, alkohol, kloroform
Titik didih	: 280°C
Titik lebur	: 200°C

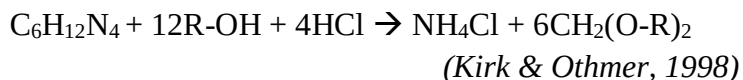
(Pubchem, 2018)

Sifat kimia :

- a. Pada reaksi nitrasi *Hexamethylenetetramine* akan dihasilkan *cyclotrimethylenetrinitramine* yang mempunyai daya ledak tinggi. Reaksinya :



- b. *Hexamethylenetetramine* tidak dapat bereaksi bersama alkohol pada kondisi netral ataupun biasa, tetapi bereaksi pada kondisi asam membentuk garam amoniak. Reaksinya :



1.5.2 Metode Pembentukan yang dipilih

1.5.2.1 Dasar Reaksi

Proses pembentukan *Hexamethylenetetramine* menggunakan bahan dasar larutan formaldehid dan amoniak cair disatukan di Reaktor Alir Tangki Beengaduk (RATB) tanpa memakai katalis dan proses berjalan secara kontinyu. Adapun reaksi yang terbentuk sebagai berikut:



(US Patent No. 2640826A, 1953)

1.5.2.2 Kondisi Proses

Dalam proses pembuatan *Hexamethylenetetramine* adalah menggunakan amoniak dan formladehid sebagai bahan baku. Pada dasarnya keadaan operasi dari proses pembuatan *Hexamethylenetetramine* dengan menggunakan proses Alexander F.Maclean adalah :

<i>Pressure</i>	: 1 atm
<i>Temperatur</i>	: 20 - 70°C
<i>Conversion</i>	: 98%
<i>Ratio Mol</i>	: 3 : 2 ($\text{CH}_2\text{O} : \text{NH}_{3(\text{aq})}$)
<i>Reaktor</i>	: RATB
<i>Fase reaksi</i>	: Cair-cair
<i>Waktu reaksi</i>	: 5 – 30 menit

(US Patent No. 2640826A, 1953)

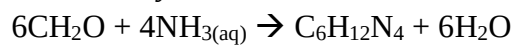
1.5.2.3 Mekanisme Reaksi

Reaksi pembuatan *Hexamethylenetetramine* melalui proses Alexander F.Maclean mengikuti tahap-tahap sebagai berikut :

1. Pertama tiga molekul formaldehid akan bereaksi bersama tiga molekul amoniak yang akan membentuk *methyleneamine* dan melepas H_2O .
2. Tiga molekul *methyleneamine* beraksi menciptakan *trimethylenetriamine*.
3. Selanjutnya molekul *trimethyleneamine* bereaksi bersama dengan tiga molekul CH_2O menciptakan *trymethylooltriamethylenetriamine*.
4. Hasilnya molekuul *trymethylooltriamethylenetriamine* beraksi dengan NH_3 dan menggugurkan tiga molekul H_2O menciptakan *Hexamethylenetetramine* (Hexamine).

1.5.2.4 Tinjauan Kinetika

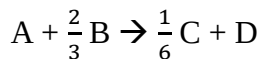
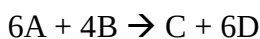
Reaksi pembentukan *Hexamethylenetetramine* :



Data :

$$X_A = 98\% = 0,98$$

$$A : B = 3 : 2$$



- Formaldehid 37%

$$BM = 30,03 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} C_{A0} &= 37 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} \times 30,03 \frac{\text{gram}}{\text{mol}} \\ &= 37 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} : 30,03 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{L}} \\ &= 12,33 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_A &= C_{A0} (1 - X_A) \\ &= 12,32 (1 - 0,98) \\ &= 0,25 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

- Amoniak 30%

$$BM = 17,03 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} C_{B0} &= 30 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} \times 17,03 \frac{\text{gram}}{\text{mol}} \\ &= 30 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} : 17,03 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{L}} \\ &= 17,65 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_B &= C_{B0} - \frac{2}{3} \cdot C_{A0} \cdot X_A \\ &= 17,65 - \frac{2}{3} \cdot 12,33 \cdot 0,98 \end{aligned}$$

$$= 9,59 \text{ mol/L}$$

$$k = 1,42 \cdot 10^3 e^{-3090/T}$$

$$k = 1,42 \cdot 10^3 e^{-3090/313}$$

$$k = 0,07 \text{ L/mol.menit}$$

(Froment and Bischoff, 1979)

Orde 2 :

$$-r_A = k C_A C_B$$

$$-r_A = k \cdot (C_{A0} - C_{A0} X_A) (C_{B0} - C_{A0} X_A)$$

$$M = C_{B0} / C_{A0} = 17,65 / 12,32 = 1,43$$

$$-r_A = k \cdot C_{A0}^2 (1-X_A) (M-X_A)$$

$$\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1-X_A)(M-X_A)} = C_{A0} \cdot k \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{1-X_B}{1-X_A} = \ln \frac{M-X_A}{M(1-X_A)} = \ln \frac{C_B \cdot C_{A0}}{C_{B0} \cdot C_A}$$

$$\ln \frac{C_B \cdot C_{A0}}{C_{B0} \cdot C_A} = C_{A0} \left(\frac{C_{B0}}{C_{A0}} - 1 \right) k \cdot t$$

$$\ln \frac{9,56 \times 12,33}{17,65 \times 0,25} = 12,33 (1,43 - 1) \cdot 0,07 \cdot t$$

$$3,29 = 0,37 t$$

$$t = 8,85 \text{ menit}$$

$$t = 9 \text{ menit}$$

(Levenspiel, 1999)

Berdasarkan hasil kalkulasi di atas maka dapat disimpulkan bahwa reaksi di atas menggunakan suhu 40°C dengan waktu reaksi 9 menit dan reaksi berjalan *irreversible*.

1.5.2.5 Tinjauan Termodinamika

Tinjauan secara termodinamika reaksi dapat terbentuk secara eksotermis atau endotermis ditentukan melalui peninjauan panas membentuk standar (ΔH°_f) pada 298°C.

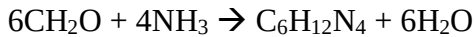
Harga ΔH°_f setiap elemen pada suhu 298K (25°C) dapat diamati dari bagan berikut ini :

Tabel 6. Harga ΔH°_f Setiap Elemen

Elemen	ΔH°_f (kJ/mol)
CH ₂ O	-115,89
NH ₃	-67,2
C ₆ H ₁₂ N ₄	332,56
H ₂ O	-285,84

(Himmelblau, 1996)

Reaksi pembentukan *Hexamethylenetetramine* :



$$\begin{aligned}\Delta H^\circ_{f298} &= H \text{ produk} - H \text{ reaktan} \\ &= \{332,56 + 6(-285,84)\} - \{6(-115,89) + 4(-67,2)\} \\ &= -418,34 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas didapatkan entalpi pembentukan standar (ΔH°_f) pada suhu 298K yang memiliki nilai negatif, maka reaksi terbentuknya *Hexamethylenetetramine* bersifat eksotermis.

Arah reaksi bersifat reaksi bolak-balik (*reversibel*) atau reaksi searah (*irreversibel*) dapat menentukan melalui tinjauan energi Gibbs (ΔG°).

Harga ΔG° setiap komponen pada suhu 298K (25°C) dapat diamati dari bagan berikut ini :

Tabel 7. Harga ΔG° Setiap Elemen

Elemen	ΔH°_f (kJ/mol)
CH ₂ O	-109,91
NH ₃	-16,40
C ₆ H ₁₂ N ₄	410,80
H ₂ O	-228,64

(Perry & Green, 2008)

$$\Delta G^\circ_{298} = -RT \ln K_{298}$$

dengan :

ΔG°_{298} : energi bebas gibbs (298K)

K : konstanta kesetimbangan

T : suhu standar (K)

R : konstanta gas ideal (0,0083145 kJ/mol.K)

Reaksi pembentukan *Hexamine* : $6\text{CH}_2\text{O} + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4 + 6\text{H}_2\text{O}$

$$\begin{aligned}\Delta G^\circ_{298} &= \Delta G^\circ \text{ produk} - \Delta G^\circ \text{ reaktan} \\ &= \{410,80 + 6(-228,64)\} - \{6(-109,91) + 4(-16,40)\} \\ &= -235,98 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

$$\Delta G^\circ_{298} = -RT \ln K_{298}$$

$$-235,98 = -0,0083145 \times 298 \ln K_{298}$$

$$\ln K_{298} = 95,241$$

$$K_{298} = 2,30.10^{41}$$

Harga konstanta terlihat pada suhu 40°C (343K) dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \ln \left(\frac{K_{313}}{K_{298}} \right) &= \left(\frac{\Delta H_{f298}}{R} \right) \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \\
 \frac{\ln K_{313}}{2,30 \times 10^4} &= \left(\frac{-418,34}{0,0083145} \right) \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{298} \right) \\
 \frac{\ln K_{313}}{2,30 \times 10^4} &= \left(\frac{-418,34}{0,0083145} \right) (-0,000161) \\
 \ln K_{313} &= 1,86 \times 10^{42} \\
 K_{313} &= 6,42
 \end{aligned}$$

(Smith & VanNess, 1987)