

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu material yang paling banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari adalah material polimer. Aplikasinya meliputi beberapa bidang seperti bidang otomotif, insulasi hingga peralatan rumah tangga. Banyaknya bidang aplikasi, membuat perkembangan industri polimer berkembang begitu cepat. Salah satu berkembangnya industri polimer adalah poliuretan, dimana pada tahun 1967 poliuretan ditemukan oleh prof. Otto Bayer sebagai pembentuk serat yang didesain untuk menandingi serat nylon. Tetapi penelitian lebih lanjut poliuretan bukan saja digunakan sebagai serat tetapi dapat juga digunakan untuk membuat busa (*foam*), bahan elastomer (karet/plastik), lem, pelapis (*coating*) dan lain-lain.

Poliuretan merupakan jenis polimer yang murah, mudah dibentuk, dapat dibuat oleh manusia dan jumlahnya berlimpah. Poliuretan mempunyai potensi besar untuk dapat diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari. Poliuretan banyak digunakan dalam bentuk *foam*, *rigid* dan elastomer (*thermoplastic*). Termoplastik poliuretan merupakan jenis polimer termoplastik yang sering digunakan daripada termoplastik yang lainnya. Hal ini dikarenakan sifat termoplastik poliuretan yang keras juga kuat mengakibatkan termoplastik jenis poliuretan lebih banyak digunakan

Thermoplastic Polyurethane berkembang diindonesia pada tahun 1993, hal ini disebabkan material poliuretan dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang. Memiliki karakteristik yang kuat dan awet sehingga dapat digunakan dalam waktu yang lama, membuat perkembangan pasar poliuretan semakin cepat. Jadi tidak heran bila pasar poliuretan sangat berkembang. Seperti negara UK dan USA yang masih membutuhkan poliuretan cukup tinggi, pada 5 tahun terakhir UK mengimpor poliuretan sebanyak 221.823,313 ton sedangkan Cina mengimpor poliuretan sebanyak 860.725,751 ton.

Untuk memicu perkembangan industri poliuretan di Indonesia serta memenuhi kebutuhan negaralain kami sebagai anak bangsa mencetuskan untuk memproduksi *thermoplastic polyurethane*.

1.2 Maksud dan Tujuan

1.2.1 Maksud

Maksud dari perancangan pabrik ini adalah untuk memenuhi kebutuhan poliuretan di Indonesia dan dunia, karena produk ini banyak digunakan sebagai bahan baku pada bidang automotif dan bahan baku untuk casing elektronik. Maka dalam perancangan pabrik ini akan dirancang pabrik kimia yang memproduksi poliuretan dari *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI) dan *Poly Tetramethylene Ether Glycol* (PTMEG).

1.2.2 Tujuan

Tujuan dari perancangan pabrik poliuretan ini adalah:

1. Untuk meningkatkan jumlah produksi poliuretan yang ada di dalam negeri
2. Untuk memenuhi kebutuhan industri yang menggunakan poliuretan sebagai bahan baku.
3. Meningkatkan jumlah ekspor poliuretan
4. Menerapkan disiplin ilmu teknik kimia dalam sebuah perancangan pabrik kimia.

1.3 Analisa Pasar

1.3.1 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan untuk memproduksi poliuretan adalah *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI) dan *Poly Tetramethylene Ether Glycol* (PTMEG). MDI yang digunakan diperoleh dari Zhejiang Xianglong Cina yang kapasitas produksinya 25.000 ton/tahun, adapun kekurangannya kita peroleh dari import luar negeri yaitu dari Cina, Korea, Jepang dan Vietnam (www.alibaba.com). Sedangkan PTMEG diperoleh dari PT Bayer Material

Science Indonesia, Cilegon, Banten yang kapasitas produksinya 35.000 ton/tahun (www.alibaba.com)

1.3.2 Kebutuhan Produk

Permintaan poliuretan diperkirakan akan meningkat mengingat semakin berkembangnya industriomotif dan elektronik di dalam negeri maupun di luar negeri. Kebutuhan poliuretan di Indonesia, sebagian besar mengandalkan produksi lokal dan juga impor dari beberapa negara. Tetapi, permintaan akan poliuretan di negara lain seperti UK, Cina, Jepang, USA dan Korea cukup tinggi selama 5 tahun terakhir.

Berikut merupakan data perkembangan poliuretan di negara lain ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

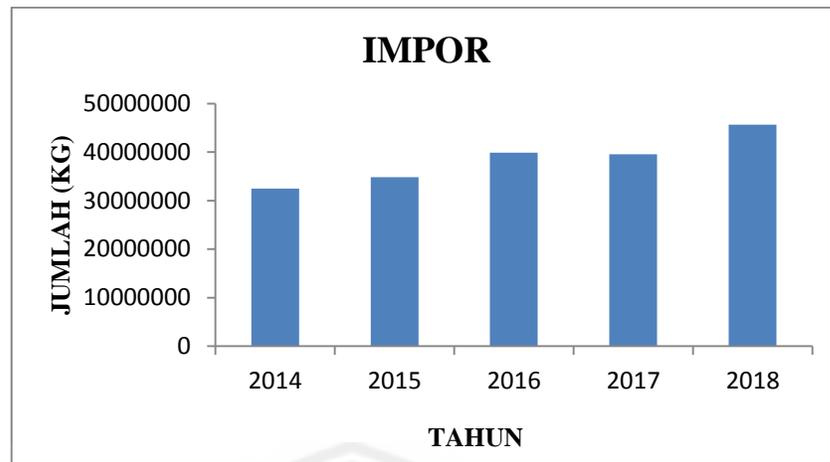
Tabel 1 Kebutuhan Poliuretan di Negara Lain Selama 5 Tahun

| Negara | Kebutuhan (ton) |
|--------|-----------------|
| UK | 221.823,313 |
| Cina | 860.725,751 |
| Jepang | 15.581,108 |
| USA | 92.229,627 |
| Korea | 18.846,965 |

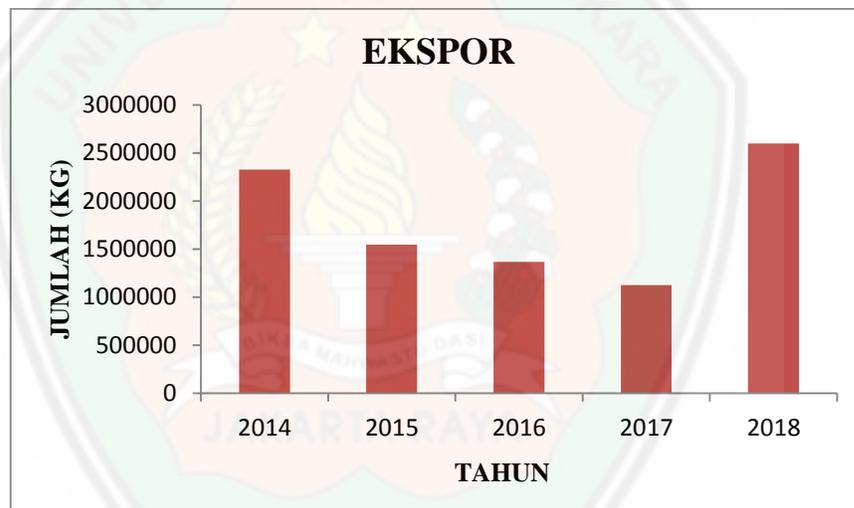
(sumber: United Nation data, 2019)

1.4 Penentuan Kapasitas Produksi

Kapasitas produksi merupakan salah satu hal yang harus diperhatikan dalam merancang suatu pabrik dimana kapasitas produksi dalam merancang suatu pabrik dimana kapasitas produksi dapat mempengaruhi perhitungan teknis maupun ekonomis. Berikut grafik impor dan ekspor *Thermoplastic Polyurethane* pada 5 tahun terakhir di Indonesia:



Gambar 1 Grafik Kapasitas Impor Thermoplastic Polyurethane
(sumber : bps.go.id)



Gambar 2. Grafik Kapasitas Ekspor Thermoplastic Polyurethane

Dari kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai impor termoplastik poliuretan di Indonesia mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Sedangkan untuk nilai ekspor, pada tahun 2014 sampai 2017 mengalami penurunan dan mengalami peningkatan pada tahun 2018. Hal ini menandakan bahwa peluang untuk memasok kebutuhan termoplastik poliuretan dalam negeri dan luar negeri pada tahun-tahun mendatang akan mengalami peningkatan.

Pabrik thermoplastik poliuretan direncanakan akan didirikan pada tahun 2024, dengan mempertimbangkan peluang kebutuhan dari dalam negeri dan juga luar negeri. Berikut perhitungan kapasitas pabrik yang akan digunakan:

Perhitungan Kapasitas Produksi Menurut Ilmu Statistik

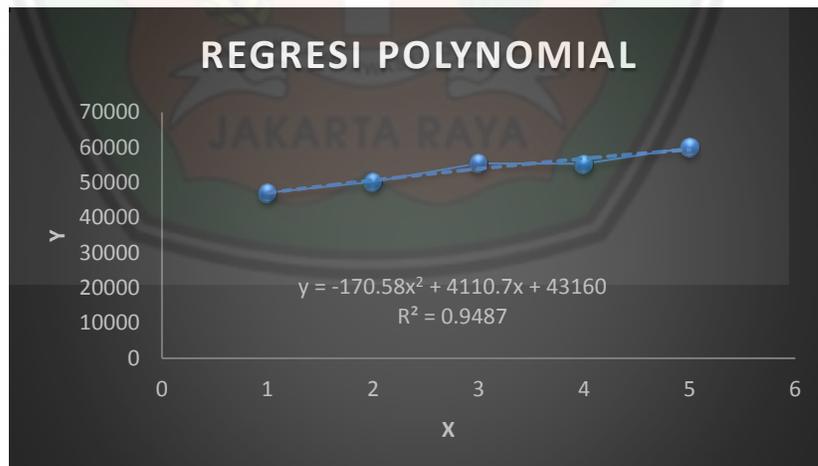
Tabel 2 Penentuan Kapasitas Produksi

| X | Y |
|---|--------------|
| 1 | 47.091,503 |
| 2 | 50.208,1187 |
| 3 | 55.476,95691 |
| 4 | 55.335,85717 |
| 5 | 59.963,34755 |

Dimana :

X = Tahun yang diobservasi

Y = Kebutuhan Polyurethane (ton)



Gambar 3 Grafik regresi polinomial

Dari grafik di atas didapatkan nilai regresi $R^2 = 0,9487$. Dengan persamaan $y = -170.58x^2 + 4.110,7x + 43.160$

Kebutuhan produk (y) pada tahun 2024 dimana x = 11

$$y = -170.58 (11)^2 + 4.110,7 (11) + 43.160$$

$$y = -20.640,18 + 45.217,7 + 43.160$$

$$y = 67.737,52 \text{ ton}$$

Kapasitas Produksi

$$\text{Kapasitas Produksi} = 15\% \times \text{Kebutuhan Produk}$$

$$\text{Kapasitas Produksi} = 15\% \times 67.737,52 \text{ ton}$$

$$\text{Kapasitas Produksi} = 10160.628 \text{ ton/tahun}$$

Berdasarkan perhitungan kapasitas pabrik menurut ilmu statistika, pada pra rancangan ini dipilih kapasitas 11.000 ton/tahun. Dimana diharapkan pabrik yang akan didirikan ini mampu mencukupi kebutuhan termoplastik poliuretan di Indonesia pada tahun 2024.

1.5 Pemilihan Lokasi Pabrik

Lokasi suatu pabrik memberikan pengaruh yang besar terhadap lancarnya kegiatan industri. Pemilihan lokasi pabrik yang tepat, ekonomis dan menguntungkan dipengaruhi oleh banyak faktor, sehingga sebelum pabrik didirikan, perlu dilakukan pertimbangan untuk menentukan lokasi pabrik yang kita rancang agar secara teknik dan ekonomis menguntungkan.

Oleh karena itu, pabrik poliuretan dengan kapasitas 11.000 ton / tahun direncanakan akan didirikan di kawasan industri Krakatau Industrial Estate Cilegon (KIEC), provinsi Banten dengan pertimbangan sebagai berikut :

1. Dekat dengan Produsen Bahan Baku

Bahan baku *Poly Tetramethylene Ether Glycol* (PTMEG) diperoleh dari PT Bayer Material Science Indonesia, Cilegon, Banten. Sedangkan bahan baku MDI, katalis dan surfaktan diimpor dari Cina, Korea dan Jepang.

2. Dekat dengan Daerah Pemasaran

Daerah tersebut berdekatan dengan kawasan jabodetabek yang merupakan area industri yang potensial sebagai daerah pemasaran. Di daerah jabodetabek terdapat beberapa industri otomotif dan industri elektronik yang menggunakan poliuretan.

3. Kemudahan Transportasi

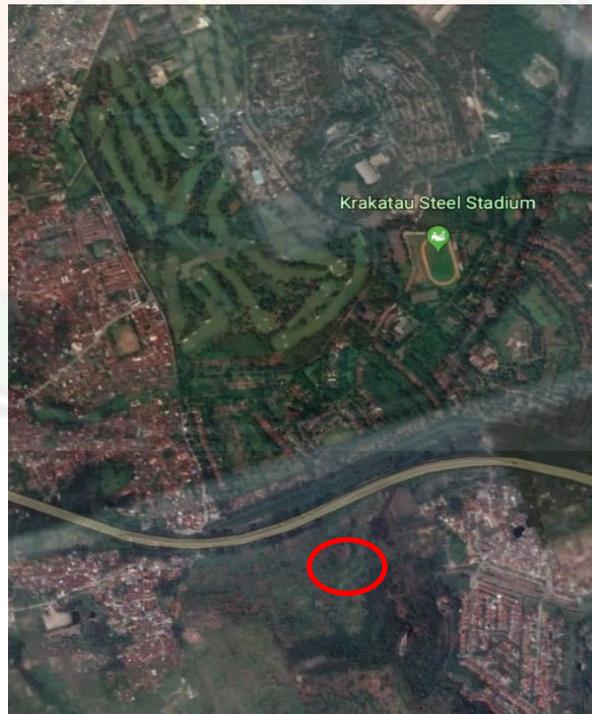
Daerah tersebut dekat dengan pelabuhan untuk keperluan transportasi impor serta jalan raya dan jalan tol yang memadai sehingga memudahkan pengangkutan bahan baku dan produk.

4. Keadaan Geografis

Kawasan industri Cilegon berada dalam daerah yang beriklim tropis, sehingga cuaca dan iklim relatif stabil. Begitu pula keadaan tanah yang relatif stabil

5. Tersedianya Tenaga Kerja

Tenaga kerja ahli dan berkualitas dapat diambil dari lulusan universitas / institusi di sekitar daerah atau pun dari luar daerah.



Gambar 4 Lokasi Pabrik Polyurethane

1.6 Macam-Macam Proses

1.6.1 Proses Pembuatan Termoplastik Poliuretan

Terdapat dua sistem yang dapat digunakan untuk membentuk poliuretan yaitu: Sistem *one-step (one-shot process)* dan sistem *two-step (prepolymer process)*. Sistem *one-step (one-shot process)* adalah semua bahan baku untuk menghasilkan polimer dicampur bersama-sama. Sistem *two-step (prepolymer process)*, komponen *polyol* direaksikan dengan *polyisocyanate* untuk membentuk prepolimer dengan gugus akhir *isocyanate*, proses ini yang disebut prepolimer, dan masih terdapat *isocyanate* yang berlebih. Campuran prepolimer direaksikan dengan senyawa diol atau diamine sebagai pemanjang rantai (*chain extender*). Selain itu juga ada proses *reaction in solution* dimana reaksi ini membutuhkan bantuan pelarut untuk mereaksikan poliuretan.

1.6.1.1 Sistem *one-step (one-shot process)*

Poliuretan dibuat secara spesifik dengan *one shot process* selama *mixing* dengan *co reactant* dan penambahan secara simultan dari *blowing agent*, katalis, *foam stabilizer* dan aditif lain. Reaksi yang terjadi adalah eksoterm dan tergantung dari katalis yang digunakan, reaksi yang sempurna biasa membutuhkan waktu 1- 3 jam.

1.6.1.2 Sistem *two-step (prepolymer process)*

Beberapa poliuretan elastomer dan hampir semua poliuretan dibuat dengan Prepolimer NCO sebagai intermediate. Metode ini mengikuti reaksi sempurna meskipun polieter diol mempunyai reaktifitas rendah, akan diperoleh target formasi struktur dengan adanya katalis. Selama penggunaan Pre polimer NCO yang merupakan monomer bebas, kontak dengan isosianat bebas (TDI atau Sikloheksan Diisosianat) bisa dihindari selama proses. Pembuatan intermediate dengan *End Group* yang diinginkan dan BM rata-rata dalam distribusi statistik juga bisa dilakukan dengan proses ini. Produk dengan *group NCO* (Pre Polimer NCO) secara teknis sangat penting sebagai intermediate untuk pembuatan poliuretan karena bisa digunakan dengan komponen multitudine yang terdiri dari hidrogen aktif. Poliuretan dibuat dengan

mereaksikan komponen di atau polihidrogen dengan di atau poliisosiyanat *excess*. Reaksi ini menghasilkan campuran homolog yang masih mengandung monomer isosiyanat. Jika monomer rendah yang diinginkan, diisosiyanat *excess* bisa dihilangkan dengan destilasi atau evaporasi. Bila perbandingan NCO/OH pada pembuatan pre polimer lebih besar dari tiga, produk yang dihasilkan disebut semi-pre polimer, karena hanya sebagian dari isosiyanat tersedia yang masuk ke dalam formasi pre polimer.

1.6.1.3 Solution Polymerization

Pada metode solution polymerisation dimana pembuatan poliuretan dalam air dan menggunakan aqueous suspension. Hal yang paling penting pada metode ini adalah ketamine yang berasal dari reaksi amin dan ketone. Solution polymerisation dimulai dengan proses prepolymer dengan mereaksikan ketamine dan diamine dengan pengadukan yang cepat dan reaksi dilarutkan dalam pelarut organik. Setelah bereaksi, hasil akan diperoleh dengan proses dewatering dan drying. Pelarut organik yang digunakan seperti n-hexane atau cyclohexane. *Thermoplastic polyurethane* yang dihasilkan akan berbentuk bubuk.

1.6.2 Pemilihan Proses

Tabel 3. Macam-Macam proses pembuatan *Thermoplastic Poliuretan*

| parameter | Bulk Polymerisation | | solution polymerisation |
|---------------|-----------------------------|---|---|
| | one shot process | two shot process | |
| temperature | 55 C | 84 C | 110 C |
| tekanan | 1 atm | 1 atm | 1 atm |
| waktu tinggal | 1-2 jam | - | > 4 jam |
| reaktor | Reaktor Alir Berpengaduk | Reaktor Alir Berpengaduk | Reaktor Alir Berpengaduk |
| Alat | alat yang digunakan sedikit | alat yang digunakan tidak sedikit (perlu penambahan prepolymer tank) | alat yang digunakan tidak sedikit (perlu penambahan mixer dan prepolymer tank) |
| produk | pelet | pelet | bubuk (powder) |

Setelah membandingkan berbagai macam proses, maka dipilih proses *one shot* dengan pertimbangan sebagai berikut:

- a. Proses reaksi pada tekanan atmosferik dan suhu rendah sehingga menghemat biaya instalasi
- b. Prosesnya sederhana
- c. Biaya produksi lebih murah
- d. Proses pembentukan produk lebih cepat dibandingkan dengan *solution polymerization*
- e. Alat yang digunakan sederhana

1.7 Uraian Proses

1.7.1 Proses *Pre Treatment*

Sebelum bereaksi dengan *isocyanate*, *polyol* direaksikan terlebih dahulu dengan katalis dan *chain extender* pada tanki *premix*. Proses ini bisa disebut dengan proses inisiasi, dimana katalis diaktifkan terlebih dahulu untuk menghasilkan center radikal tempat terjadinya polimerisasi.

1.7.2 Polimerisasi

Proses ini bisa disebut dengan proses propagasi, dimana pada proses ini ditambahkan monomer untuk membentuk rantai panjang. Hasil dari tanki *premix* akan masuk kedalam reaktor yang kemudian akan ditambahkan MDI kedalamnya. Pada proses ini akan membentuk rantai panjang dimana pembentukan ini akan berhenti jika polyol sudah habis bereaksi, proses ini disebut terminasi.

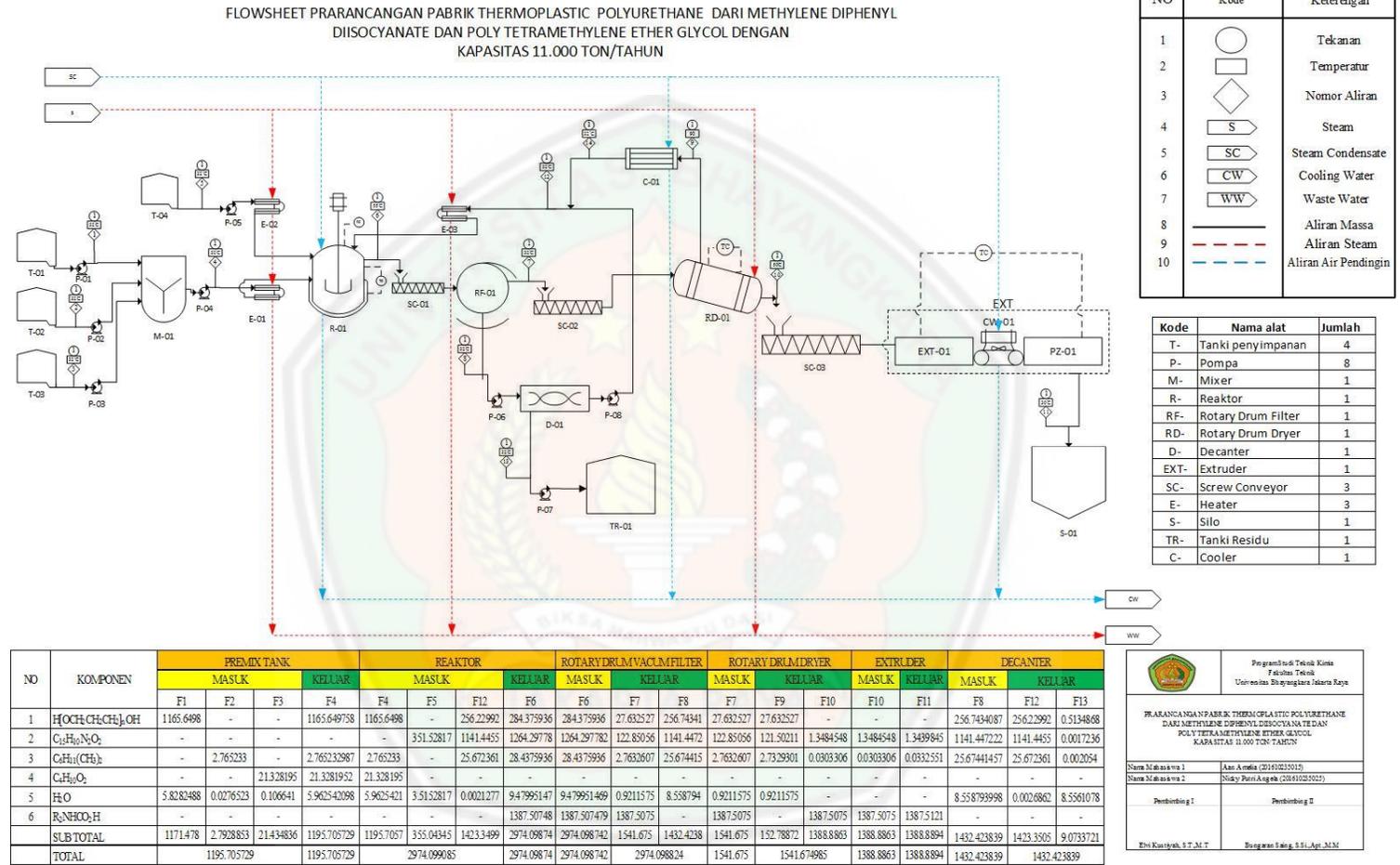
1.7.3 *Pelletizer*

Hasil keluaran reaktor yaitu berupa produk poliuretan dalam bentuk *slurry*, sisa reaktan dan katalis kemudian dipisahkan dalam *centrifuge*. Hasil keluaran *rotary drum filter* yang berupa padatan basah diumpankan ke *rotary dryer* untuk menghasilkan produk dengan kemurnian yang lebih tinggi. Hasil produk dari *rotary dryer* diumpankan masuk kedalam *extruder pelletizer* untuk membentuk pellet poliuretan. Sedangkan hasil cair yang dikeluarkan

oleh *rotary drum filter* akan dialirkan menuju *decanter* untuk proses pemisahan berdasarkan kelarutan. Cairan yang nilai kelarutannya tinggi akan di *recycle* kembali ke dalam reaktor, sedangkan sisanya (*waste*) ditampung kedalam tangki limbah untuk dikelola oleh pihak ke-3.



1.7.4 Blok Diagram Proses



Gambar 5. Flowsheet Pembuatan Thermoplastic Polyurethane

1.7.5 Diagram Alir Kuantitatif

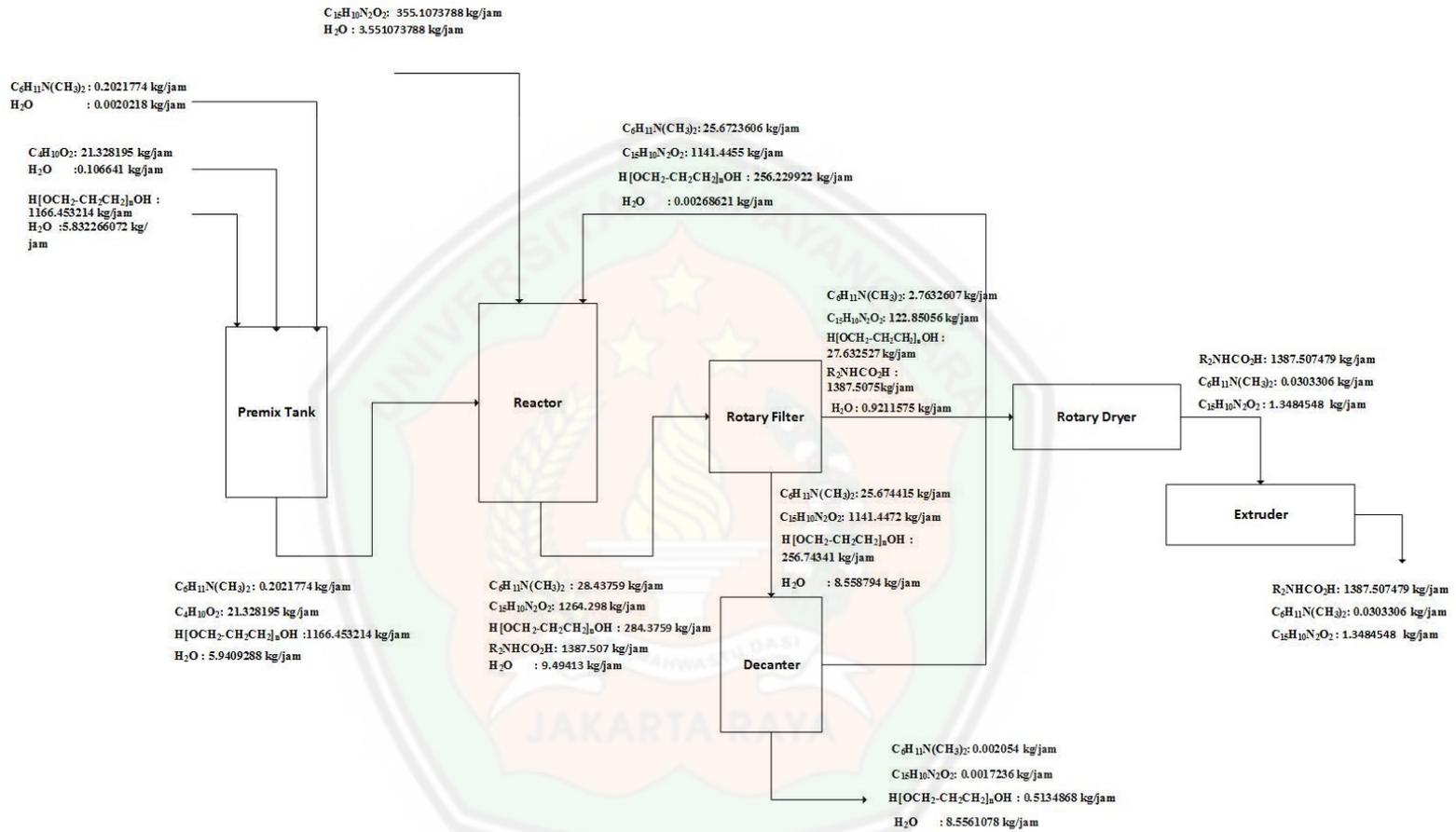


DIAGRAM ALIR KUANTITATIF

Gambar 6 Diagram Kuantitatif

1.7.6 Diagram Alir Kualitatif

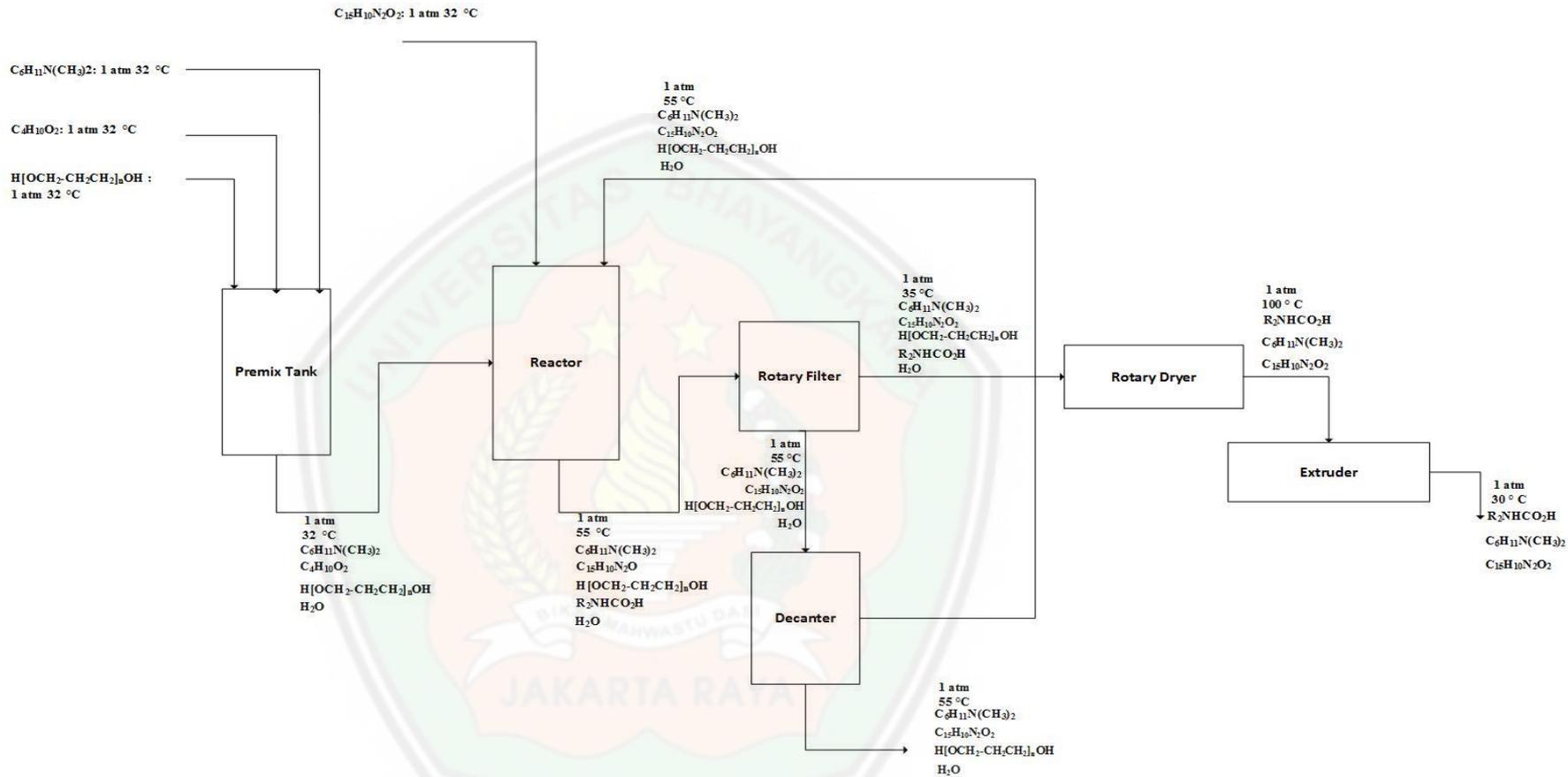


DIAGRAM ALIR KUALITATIF

Gambar 7 Diagram Alir Kualitatif

1.8 Tinjauan Pustaka

1.8.1 Polyurethane

Polyurethane adalah material polimer yang memiliki ciri khas adanya gugus uretan ($R-NHCOO-R'$) dalam rantai utama polimer. Gugus fungsi uretan dihasilkan dari reaksi antara senyawa yang mengandung gugus utama polimer. Gugus fungsi uretan dihasilkan dari reaksi antara senyawa mengandung gugus fungsi hidroksil fungsional ($R'-N=C=O$) yang disebut polioliol. Jumlah penggunaan poliuretan didunia pada tahun 2010 diperkirakan mencapai 17 milyar pounds atau sekitar 5% dari total konsumsi plastik didunia. Aplikasi poliuretan tergolong luas seperti material sealant dan insulasi maupun sebagai adhesive, serta aplikasi yang paling umum adalah sebagai material foam / busa pada furniture serta pada kursi kendaraan.

1.8.2 Kegunaan Termoplastik Poliuretan

Kegunaan termoplastik poliuretan dalam kehidupan sehari-hari adalah sebagai berikut:

- a. Casing TV
- b. Elektronik
- c. Dashboard mobil
- d. Travelling bag
- e. Bumper mobil

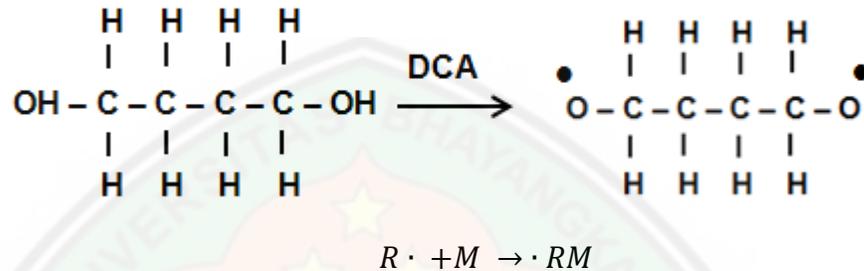
1.8.3. Tinjauan Proses

1. Inisiasi

Langkah pertama dalam polimerisasi adisi adalah pembentukan radikal bebas atau radikal aktif tahap ini biasanya disebut dengan tahap inisiasi. Inisiasi berlangsung dalam 2 tahap, dimana tahap pertama adalah pembentukan radikal bebas dari suatu insiator, didikuti dengan penambahan salah satu radikal bebas ke molekul monomer. Radikal bebas dapat dibentuk oleh 1 dari 2 metode utama yaitu pemotongan homolitik ikatan tunggal dan reaksi redoks yang melibatkan transfer elektro tunggal

dari ion atau molekul. Pusat aktif dibuat ketika radikal bebas ($R\cdot$) yang dihasilkan dari inisiator menyerang ikatan π dari molekul monomer. (*Polymer Chemistry and Synthesis*)

Pada tahap ini *Poly TetraMethylene Ether Glycol* (PTMEG) akan membentuk radikal bebas dengan bantuan inisiator yaitu Dicyclohexylamine dimana ikatan π pada PTMEG akan diputus sehingga membentuk radikal bebas. berikut skema inisiasi:



Persamaan kecepatan reaksi inisiasirantai radikal keseluruhan adalah

$$r_i = \left(\frac{dRM\cdot}{dt} \right) = 2fk_d[I]$$

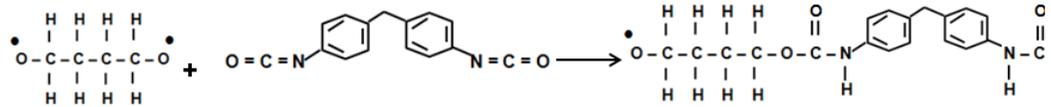
Dimana f adalah efisiensi inisator, yakni fraksi dari radikal terbentuk yang berhasil memulai proses inisiasi membentuk rantai. (Endang, 2010)

Nilai $k_d = 1,06 \times 10^{-3}$ (*Polymer Handbook*)

2. Propagasi

Reaksi propagasi melibatkan pertumbuhan rantai polimer secara berurutan dan cepat dengan cara penambahan unit monomer ke pusat aktif (radikal bebas). Tahap kedua setelah inisiasi ini dilakukan dengan monomer menyerang radikal bebas (pusat aktif). (*Polymer Chemistry and Synthesis*). waktu yang dibutuhkan untuk setiap penambahan monomer biasanya dalam urutan *milliseconds*, sehingga beberapa penambahan ribu monomer dapat terjadi dalam beberapa detik sebelum penghentian terjadi. (Beuermann, 2004)

Pada tahap ini *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI) akan menyerang PTMEG radikal bebas (pusat aktif) sehingga akan membentuk rantai polimer



Pertumbuhan polimer dari M menjadi rantai radikal yang lebih panjang dengan penambahan monomer. Reaksi dinyatakan dengan persamaan (Endang, 2010):



Diasumsikan bahwa reaktivitas radikal tidak tergantung pada panjang rantai, sehingga semua tahap propagasi dapat dikarakterisasi dengan menggunakan konstanta laju reaksi yang sama, yaitu k_p . Sehingga laju reaksi propagasi overall dapat dinyatakan dengan (Endang, 2010)

$$-r_p = k_p \cdot [M] [RM]$$

Dimana $[M]$: konsentrasi monomer

$[RM]$: konsentrasi radikal rantai dengan ukuran RM yang lebih besar

$$k_p: 1,21 \times 10^2$$

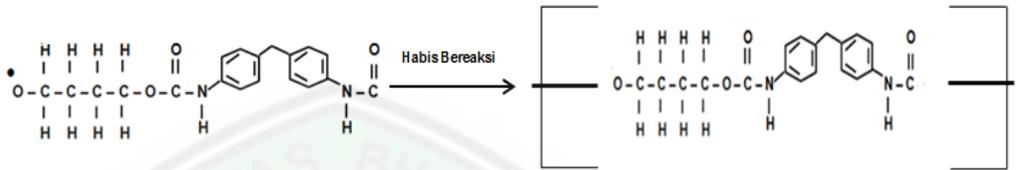
(*Polymer Handbook*)

3. Terminasi

Merupakan tahap penghentian reaksi, dimana 2 rantai monomer aktif akan saling bergabung satu sama lain kemudian berubah menjadi non aktif. Ada 2 mekanisme umum untuk mengakhiri pusat aktif rantai yang sedang bertambah. Kedua proses melibatkan proses penggabungan bimolekular dari rantai polimer. Yang pertama adalah penghentian dengan kombinasi. Kombinasi melibatkan penggabungan 2 rantai untuk membentuk molekul polimer tunggal. Yang kedua adalah mekanisme yang biasa disebut disproporsional. Dalam proses ini atom hidrogen dipisahkan dari salah satu raitanya. Secara umum kedua jenis mekanisme

terminasi ditemui dalam polimerisasi adisi, tergantung pada jenis monomer yang terlibat. (McKeen, 2008).

Pada proses ini digunakan mekanisme penghentian dengan kombinasi penggabungan 2 rantai untuk membentuk molekul polimer tunggal, dimana PTMEG akan bereaksi dengan MDI dan akan berhenti ketika salah satu reaktan sudah habis bereaksi.



Maka laju reaksi terminasi keseluruhan adalah (Endang, 2010):

$$-r_t = \left(\frac{dM}{dt}\right) = 2 k_t [M]^2$$

Dimana:

Nilai $k_t = 0,27$ (*Polymer Handbook*)

$[M]$ = konsentrasi polimer yang terbentuk secara stabil

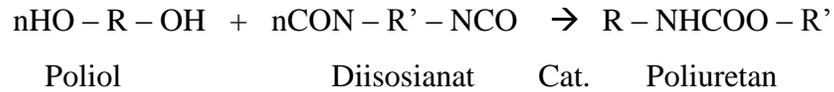
Pada keadaan awal kecepatan inisiasi lebih besar daripada kecepatan reaksi terminasi. Namun semakin lama banyak rantai polimer aktif yang terbentuk mengakibatkan kecepatan reaksi terminasi semakin besar. (Endang, 2010)

1.8.4 Tinjauan Termodinamika

Tinjauan secara Termodinamika digunakan untuk mengetahui sifat reaksi tersebut, membutuhkan panas (endotermis) atau melepaskan panas (eksotermis), dan juga untuk mengetahui arah reaksi, apakah reaksi tersebut berjalan searah (irreversible) atau berbalik (reversible). Penentuan panas reaksi berjalan secara eksotermis/endotermis dapat dihitung dengan

perhitungan panas pembentukan standar (ΔH°_f) pada $P = 1 \text{ atm}$ dan $T = 298 \text{ }^{\circ}\text{K}$.

Reaksi yang terjadi:



1. Sifat Reaksi (ΔH°_{R298})

Harga ΔH°_f 298 reaksi dan ΔG 298 reaksi masing masing komponen dapat dilihat dari tabel berikut:

Tabel 4 Data ΔH°_f 298 K Komponen

| Komponen | ΔH°_f 298 K (kJ/mol) |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Methylene Diphenyl Diisocyanate | -55,8 |
| Polytetramethylene Ether Glycol | -184,18 |
| Polyurethane | -302,6981 |

(Yaws,1996)

$$\Delta H^{\circ}_{f298} = (\Delta H^{\circ}_f \text{ Produk}) - (n \cdot \Delta H^{\circ}_f \text{ Reaktan})$$

$$\Delta H^{\circ}_{f298} = -302,6981 - (-55,8 + -184,18)$$

$$\Delta H^{\circ}_{f298} = -62,7181 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f298} = -14,98 \text{ kkal/mol}$$

Maka, nilai ΔH°_{f298} sama dengan nilai ΔH°_{R298}

Nilai ΔH°_{R298} reaksi tersebut bernilai negatif sehingga reaksi bersifat eksotermis dan melepaskan panas sebesar 14,98 kkal/mol.

2. Energi Bebas Gibbs

Energi Bebas Gibbs (ΔG) digunakan untuk menentukan apakah reaksi dapat berjalan, spontan, atau tidak dapat berjalan. Jika nilai ΔG° adalah negatif maka reaksi dapat berjalan, jika bernilai positif maka reaksi tidak dapat berjalan, sedangkan jika ΔG° adalah nol maka reaksi bersifat spontan. Berikut adalah perhitungan nilai ΔG° .

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Dimana

$$\Delta H = 16,794 \text{ KJ/kmol.K}$$

$$\Delta S = 17,1216 \text{ KJ/kmol.K}$$

$$T = 328 \text{ K}$$

(*Polymer Handbook*)

Sehingga,

$$\begin{aligned}\Delta G &= \Delta H - T\Delta S \\ &= -0,07824 \text{ Kkal/kmol}\end{aligned}$$

Nilai ΔG° bernilai negative yang berarti reaksi tersebut dapat berjalan.

3. Konstanta Kesetimbangan (K)

Perhitungan harga Konstanta Kesetimbangan (K) dapat ditinjau dari rumus sebagai berikut :

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

Atau

$$K = \exp^{-\Delta G/RT}$$

Dimana : (S. K Dogra & S. Dogra, 1990)

ΔG° = Energi bebas Gibbs standar, kkal/mol)

R = Tetapan gas ideal, (1,987 kkal/mol. K)

T = Temperatur, K

K = Konstanta Kesetimbangan

Dari persamaan diatas dapat dihitung konstanta kesetimbangan pada $T_{\text{referensi}} = 298 \text{ K}$ adalah sebagai berikut.

$$K_{298} = \exp \left[-\frac{\Delta G}{RT} \right]$$

$$K_{298} = \exp \left[-\frac{-0,07824}{1,987 \times 298} \right]$$

$$K_{298} = \exp[0,0001321]$$

$$K_{298} = 1,000132$$

Reaksi dijalankan pada temperatur $55 \text{ }^\circ\text{C}$, sehingga harga konstanta kesetimbangan K pada temperatur $55 \text{ }^\circ\text{C}$ (328 K) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{K_{\text{operasi}}}{K_{298}} = \exp -\frac{\Delta H^\circ_{298}}{R} \left[\frac{1}{T_{\text{operasi}}} - \frac{1}{T_{298}} \right]$$

$$\frac{K_{\text{operasi}}}{1,000132} = \exp -\frac{-14,98}{1,987} \left[\frac{1}{328} - \frac{1}{298} \right]$$

$$K_{\text{operasi}} = 1,28586 \quad K > 1$$

Dari perhitungan diatas harga $K > 1$ menunjukkan bahwa reaksi bersifat irreversible (searah), yaitu bergeser ke arah kanan atau ke arah pembentukan produk

1.8.5 Tinjauan Kinetika

1. Menentukan waktu tinggal di reaktor

Diketahui dari buku *castabel polyurethane elastomers* bahwa di dalam reaktor membutuhkan waktu tinggal sekitar 1 jam untuk membentuk *polyurethane*.

2. Menentukan Laju Reaksi

a. Laju Reaksi Inisiasi

Persamaan kecepatan reaksi inisiasi rantai adalah

$$r_i = \left(\frac{dRM\cdot}{dt} \right) = 2fk_d[I]$$

Dimana f adalah efisiensi inisator, yakni fraksi dari radikal terbentuk yang berhasil memulai proses inisiasi membentuk rantai. (Endang, 2010)

Nilai $k_d = 1,06 \times 10^{-3}$ (*Polymer Handbook*)

f = 0,8 (konversi)

[I] = 5,09 kmol/m³.jam (konsentrasi dari DCA (inisiator))

Sehingga laju reaksinya adalah

$r_i = 0,00858$ kmol/m³.jam (untuk pembentukan radikal bebas)

b. Laju Reaksi Propagasi

Sehingga laju reaksi propagasi overall dapat dinyatakan dengan (Endang, 2010)

$$-r_p = k_p \cdot [M] [RM\cdot]$$

Dimana [M]: konsentrasi monomer

[RM.] konsentrasi radikal rantai dengan ukuran RM yang lebih besar

$$k_p: 1,21 \times 10^2$$

(*Polymer Handbook*)

Sehingga laju reaksi propagasi,

$$-r_p = k_p \cdot [M] [RM\cdot]$$

$$= 9,833 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{jam}$$

c. Laju Reaksi Terminasi

Maka laju reaksi terminasi adalah (Endang, 2010):

$$-r_t = \left(\frac{dM}{dt} \right) = 2 k_t [M]^2$$

Dimana:

Nilai $k_t = 0,27$ (*Polymer Handbook*)

[M] = konsentrasi polimer yang terbentuk secara stabil

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 -r_t &= \left(\frac{dM}{dt}\right) = 2 k_t [M]^2 \\
 &= 0,438 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{jam}
 \end{aligned}$$

Laju reaksi polimerisasi keseluruhan (Endang, 2010)

$$\begin{aligned}
 -\frac{d[M]}{dt} &= k_p [M] \left(\frac{fk_d[I]}{2k_t}\right)^{1/2} \\
 &= 6,2499 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{jam}
 \end{aligned}$$

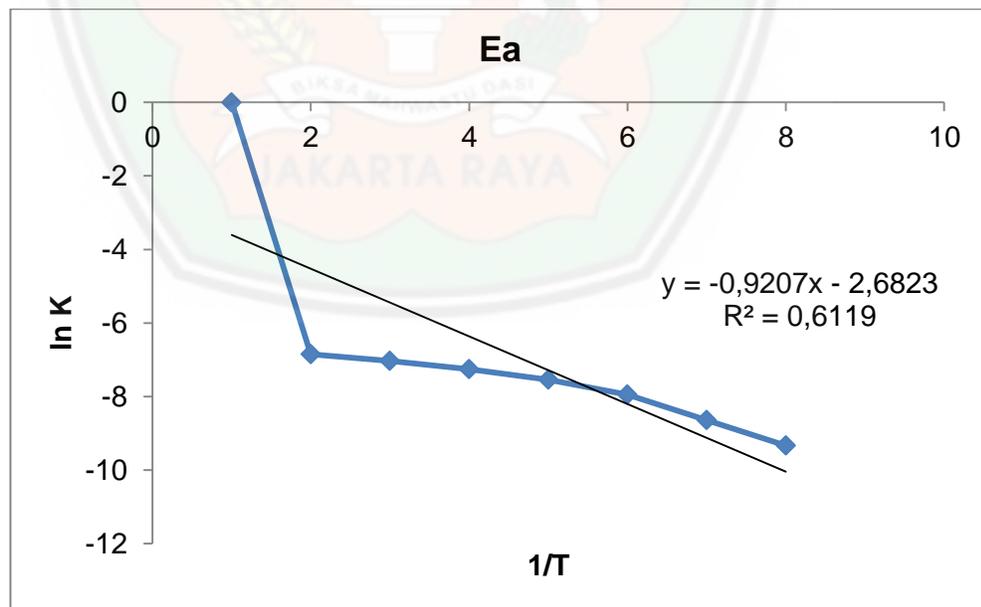
3. Energi Aktivasi

$$k = A \cdot e^{-Ea/RT}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{RT}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{R} \frac{1}{T}$$

$$Y = C + m \cdot X$$



Nilai $m = -0,9207$

$$m = -\frac{Ea}{R}$$

$$-E_a = -7,6546$$

$$E_a = 7,6546$$

Nilai E_a yang dihasilkan kecil, dikarenakan penggunaan katalis yang menyebabkan nilai k besar.

1.9 Spesifikasi Bahan

1.9.1 Spesifikasi Bahan Baku

1.9.1.1 Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI)

Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI) merupakan senyawa aromatic diisocyanate. MDI biasa direaksikan dengan polyol pada pembuatan poliuretan. Lebih dari 61.3% pembuatan poliuretan menggunakan *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI).

Sifat Fisik :

- Rumus molekul : $C_{15}H_{10}N_2O_2$
- Bentuk : cairan (pada suhu ruangan)
- Warna : jernih kekuningan
- Berat Molekul : 250,25
- Kemurnian : 99%
- Titik Didih : $313^{\circ}C$
- Densitas: 1.183 gr/cm^3

Sifat Kimia :

- Reaksi dengan alkohol membentuk urethane



- Reaksi dengan amine membentuk urea



- Reaksi dengan asam karboksilat menjadi amida

1.9.1.2 Poly Tetramethylene Ether Glycol (PTMEG)

PTMEG adalah polieter glikol linier dengan gugus hidroksil di kedua ujungnya. Sebagai poliol, ia bereaksi dengan isosianat (missal: MDI dan TDI). PTMEG dapat dengan mudah membentuk resin dengan sifat yang sangat baik.

Sifat Fisik :

- Rumus Molekul: $H[OCH_2CH_2CH_2]_nOH$
- Bentuk: cairan (pada suhu ruangan)
- Berat Molekul: 1244,82
- Density: 2,621
- Boiling point: $66^{\circ}C$

Sifat Kimia :

- Anhidrasi, polyol bisa kehilangan satu atau dua molekul air dengan adanya panas terutama dengan adanya katalis
- Oksidasi, polyol bisa teroksidasi oleh beberapa oksidator seperti pemanganate, kronat, dan asam nitrat yang menyebabkan degradasi polyol
- Esterifikasi, ester dari polyol dibuat dari reaksi metal datu etil sulfat dengan alkyl atau arakil klorida

1.9.2 Spesifikasi Bahan Pendukung

1.9.2.1 Chain Extender (1,4-Butanediol)

Sifat Fisik

- Rumus Molekul : $C_4H_{10}O_2$
- Berat Molekul : 90,1
- Bentuk : Cairan tidak berwarna
- Titik Didih : $235^{\circ}C$
- Titik Lebur : $20,1^{\circ}C$
- Suhu Nyala : $370^{\circ}C$

Sifat Kimia

- Mudah terbakar
- Dapat larut dalam air, methanol, etanol dan aseton
- Sedikit larut dalam etil eter

1.9.2.2 Katalis (Dicyclohexylamine)

Sifat Fisik :

- Rumus Molekul : $C_6H_{11}(CH_3)_2$
- Berat Molekul : 181,32
- Bentuk : Cairan transparan
- Titik Beku : $-18^{\circ}C$
- Titik Didih : $329^{\circ}C$

Sifat Kimia :

- Beracun
- Mudah terbakar
- Sedikit larut dalam air dan pelarut organik

1.9.3 Spesifikasi Produk (*Polyurethane*)

Sifat Fisik :

- Bentuk: padatan (pelet)
- Rumus Molekul : R_2NHCO_2H
- Warna: kuning jernih
- Density: ± 1500
- Tensile strength: 42,64 Kpa
- Titik lebur : $176^{\circ}C$
- Kemurnian: 99,9%

Sifat Kimia :

- Terbakar sempurna menjadi CO_2
- Tahan terhadap asam dan basa
- Larut dalam pelarut organik