

# **PENENTUAN TETAPAN KECEPATAN DAN SUHU REAKSI UNTUK MEMILIH PROSES PEMBUATAN BUTADIEN (DETERMINATION OF REACTION RATE CONSTANT AND TEMPERATURE FOR SELECTING BUTADIENE PROCESSES)**

**Heri Budi Wibowo, Luthfia Hajar Abdillah**  
Peneliti Bidang Propelan, Pustekroket, Lapan  
e-mail: heribw@gmail.com

## **ABSTRACT**

Effort to control butadiene production is important because it is the main raw material of butadiene synthetic rubber and elastomer production that imported in large quantities. Butadiene can also be used as primary raw material for the manufacture of HTPB (Hydroxy Terminated Polybutadiene), a binder propellant which has a fairly high strategic value. Reaction rate constant of butadiene reaction is determined using Gibbs energy equilibrium. Operational reaction temperature is determined using the temperature at zero Gibbs energy of reaction (spontantly reaction). The method of butadiene synthesis is the method that has been applied at commercial production of butadiene. Based on the analysis and discussion, it could be concluded that the reaction rate constant can be determined based on the thermodynamic value of Gibbs energy formation. Manufacture of butadiene with basic material butane, Liquid Petroleum Gas (LPG) is faster than the process with the basic material of ethanol, however, is more sensitive to temperature changes. The reaction temperature generally can be carried out at 500-600°C. Simulation results reaction rate constant (k) as a function of temperature for each type of the following processes: Haundry Process:  $0.629 \exp(-2178/T)$ , Phillips Process:  $2,536 \exp(-4714/T)$ , Zeon Process:  $0.987 \exp(-3346/T)$ .

Keywords: *Butadiene, Butane, Ethanol, Propellant binder*

## **ABSTRAK**

Upaya penguasaan produksi butadien menjadi penting karena butadien merupakan bahan baku utama produksi karet sintesis maupun elastomer yang diimpor dalam jumlah sangat besar. Butadien juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku utama pembuatan *Hydroxy Terminated Polybutadiene* (HTPB), suatu binder propelan yang memiliki nilai strategis cukup tinggi. Penelitian bertujuan menganalisis metode proses pembuatan butadien yang paling efisien melalui penentuan suhu reaksi dan tetapan kecepatan reaksinya. Penelitian dilakukan dengan menentukan tetapan kecepatan reaksi pembuatan butadien menggunakan prinsip kesetimbangan energi Gibbs. Penentuan suhu reaksi operasional digunakan prinsip suhu pada nilai energi Gibbs adalah nol (terjadi reaksi spontan). Metode proses yang disediakan adalah metode proses yang telah ada dan digunakan untuk produksi butadien di dunia. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, maka diperoleh kesimpulan bahwa tetapan kecepatan reaksi dapat ditentukan berdasarkan besaran-besaran termodinamikanya berbasis energi Gibbs pembentukan. Pembuatan butadien dengan bahan dasar butana, *Liquid Petroleum Gas* (LPG) lebih cepat daripada proses dengan bahan dasar etanol, namun lebih sensitif terhadap perubahan suhu. Suhu reaksi secara umum dapat dijalankan pada suhu 500 – 600°C. Tetapan kecepatan reaksi (k) sebagai fungsi suhu hasil simulasi untuk masing-masing tipe proses adalah sebagai berikut : Proses Haundry :  $0,629 \exp(-2178/T)$ , Proses Phillips :  $2,53672 \exp(-4714/T)$  , Proses Zeon :  $0,9871 \exp(-3346/T)$ .

Kata kunci: *Butadien, Butana, Etanol, Binder propelan*

## 1 PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara yang sedang berkembang pada saat ini berusaha untuk memenuhi kebutuhan berbagai bahan kimia untuk melancarkan proses industrialisasi. Bahan tersebut dapat berupa bahan baku, bahan setengah jadi maupun bahan pembantu untuk industri. Pada kenyataannya sampai saat ini banyak sekali bahan kimia yang belum dapat dipenuhi sendiri dan harus mengimpor dari negara lain. Salah satu bahan baku industri yang belum tercukupi di Indonesia adalah butadien (Wibowo, 2009).

Kegunaan penting dari butadien adalah untuk industri karet sintesis, untuk bahan elastomer, bahan *Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Rubber* (ABS), serta yang penting adalah bahan baku pembuatan HTPB untuk bahan baku propelan roket yang memiliki nilai strategis tinggi sehingga sangat sulit diperoleh. Butadien menjadi sangat dibutuhkan pada masa sekarang, karena harga karet alam mahal, sehingga butadien sebagai pengganti karet alam dalam pembuatan karet sintesis maupun pada industri ban (Wibowo, 2009). Kebutuhan akan butadien di Indonesia terus meningkat. Perkiraan kebutuhan butadien di Indonesia tahun 2010 adalah 20 juta ton per tahun. Oleh karena itu, kebutuhan penguasaan teknologi pembuatan produksi butadien menjadi penting.

Tersedia beberapa metode untuk membuat butadien dengan mekanisme yang berbeda-beda. Di dalam penguasaan teknologi proses produksi, maka dibutuhkan pengetahuan awal kondisi reaksi dan kinetiknya (kecepatan reaksi). Data kinetik pembuatan butadien belum tersedia di literatur, sehingga diperlukan penelitian eksploratif untuk mendapatkan parameter tersebut. Namun hal tersebut membutuhkan waktu yang lama. Oleh karena itu, parameter kondisi reaksi dapat didekati dengan simulasi menggunakan teori termodinamika dan

termokimia berbasis struktur molekul senyawa yang bereaksi dan senyawa produknya (Coulson dan Ricardson, 1983); (Kirk dan Othmer, 1982); (Levenspiel, 1976); (McKetta, 1983); (Perry's dan Green, 1999). Besaran-besaran yang dapat diperoleh adalah tetapan kecepatan reaksi, suhu dan tekanan operasi. Besaran-besaran tersebut dapat diperoleh dengan cepat.

Apabila data parameter perancangan diperoleh, maka perancangan produksi butadien skala pilot dapat dirancang dengan baik menggunakan teknologi yang akan digunakan. Dengan demikian upaya perancangan produksi butadien dapat lebih cepat terealisasi di Indonesia (Kirk dan Othmer, 1982); (Levenspiel, 1976). Tujuan pembahasan ini adalah untuk menentukan parameter yang dibutuhkan untuk merencanakan kondisi operasi untuk tiap proses pembuatan butadien yang tersedia (tetapan kecepatan reaksi dan suhu reaksi), sehingga dapat dipilih proses pembuatan butadien yang terbaik.

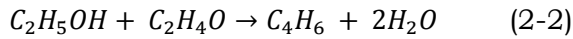
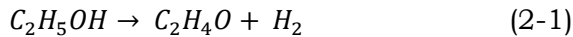
## 2 TEORI

Butadien merupakan senyawa hidrokarbon dengan rumus  $C_4H_6$ , berupa gas pada suhu kamar dan tekanan atmosferis. Butadien memiliki dua ikatan rangkap dengan struktur  $CH=CH-CH=CH_2$ . Dalam pembuatan butadien ada beberapa macam proses di antaranya (Aries dan Newton, 1955); (Faith dan Clark, 1975); (McKetta dan Cunningham, 1983); (Reid dan Prauswitz, 1987) :

### **Proses Haundry Catadiene**

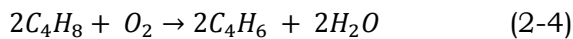
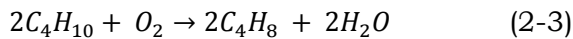
Pembuatan butadien dari dehidrogenasi etil alkohol digunakan 2 tahap reaksi, yaitu reaksi dehidrogenasi dengan tekanan 1,3 atm dan suhu sekitar 325 °C menghasilkan asetaldehid. Katalisator yang dapat digunakan adalah katalis 72,4% MgO, 18,4% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4,6% CuO dan 4,6% K<sub>2</sub>O. Reaksi tahap kedua dengan reaksi etanol dengan

asetaldehid yang diperoleh pada reaksi tahap pertama menghasilkan butadien (Wallas, 1995); (Wibowo, 2009).



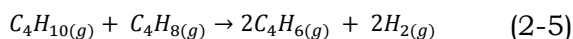
### Proses Philips

Proses Philips menggunakan bahan baku butana dengan melalui dua tahap reaksi. Reaksi oksidasi butana menjadi butena, dilanjutkan dengan reaksi oksidasi butena menjadi butadien (Wallas, 1995); (Wibowo, 2009).



### Proses Nippon Zeon

Proses ini hampir sama dengan proses *philips* namun hanya berbeda pada umpan yang masuk, yaitu berupa campuran butana dan butena. Karakteristik utama proses *nippon zeon*, penggunaan gas buang sebagai umpan reaktor. Reaksi dapat terjadi pada suhu 500 - 621 °C dan tekanan 0,2 atm. Katalis yang digunakan adalah *chromina alumina*, campuran  $Al_2O_3$  dan  $Cr_2O_3$  (Wallas, 1995); (Wibowo, 2009).



### Teori reaksi kimia

Reaksi kimia menurut teori tumbukan adalah merupakan suatu tumbukan antar molekul yang bereaksi sehingga terjadi produk reaksi kimia. Tumbukan antar molekul akan terjadi reaksi jika memenuhi jumlah energi yang dibutuhkan yang disebut dengan energi aktivasi. Menurut Arrhenius, terjadinya reaksi kimia ditentukan oleh frekuensi tumbukan yang diperlukan dan energi aktivasi yang diperlukan untuk terjadinya reaksi kimia (Aries dan Newton, 1955); (Brownell dan Young, 1979); (Peters dan Timmehaus, 1980). Apabila reaksi kimia  $A + B \rightarrow$  produk,

maka kecepatan reaksi kimia adalah perubahan berkurangnya konsentrasi A atau B terhadap waktu. Besarnya kecepatan reaksi adalah fungsi tetapan kecepatan reaksi dengan konsentrasi reaktannya. Nilai tetapan kecepatan reaksi merupakan fungsi faktor frekuensi A dan energi aktivasi seperti ditunjukkan oleh persamaan (2-6).



$$dC_A/dt = kC_A C_B \quad (2-7)$$

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (2-8)$$

Menurut teori Lecathelier, reaksi kimia pada dasarnya adalah suatu reaksi kesetimbangan, artinya kecepatan reaksi arah ke kanan ( $k_1$ ) dan ke kiri ( $k_{-1}$ ) sama besar. Reaksi kimia bergeser ke kiri atau ke kanan tergantung pada suhu reaksi dan pengambilan hasil reaksi. Tetapan kecepatan reaksi kimia (K) pada dasarnya adalah rasio tetapan kecepatan reaksi ke kanan dibagi dengan kecepatan reaksi ke kiri.



$$K = k_1/k_{-1} \quad (2-10)$$

Untuk mengetahui tetapan kesetimbangan, maka berdasarkan teori termodinamika dikatakan bahwa tetapan kesetimbangan berhubungan dengan kecepatan gerak molekul. Secara termodinamika, kecepatan gerak molekul untuk bereaksi kimia disebut dengan energi Gibbs ( $\Delta G$ ). Besarnya energi Gibbs menunjukkan besarnya gerakan molekul untuk bereaksi. Semakin besar energi Gibbs maka reaksi kimia membutuhkan energi tambahan karena gerak molekul yang lambat. Reaksi kimia terjadi secara spontan jika energi Gibbs adalah kurang dari atau sama dengan nol. Jika energi Gibbs positif maka untuk terjadinya reaksi kimia diperlukan energi tambahan dari luar (reaksi endotermis) (Aries dan

Newton, 1955); (Brownell dan Young, 1979).

Besarnya energi Gibbs merupakan fungsi dari entalpi ( $\Delta H$ ) dan entropi ( $\Delta S$ ) pada suhu ( $T$ ) yang ditetapkan seperti ditunjukkan pada persamaan (2-11) (Aries dan Newton, 1955); (Brownell dan Young, 1979); (Kirk dan Othmer, 1982). Nilai entropi suatu larutan didekati dengan fungsi kesetimbangan dan suhu campuran seperti ditunjukkan pada persamaan (2-12).

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ + T\Delta S^\circ \quad (2-11)$$

Pada keadaan standar yaitu kondisi larutan ideal (encer), maka jarak antar molekul cukup jauh dan teratur sehingga nilai  $\Delta S^\circ=0$ , sehingga nilai  $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ$ . Perubahan energi Gibbs setara dengan perubahan kesetimbangan kimia pada suhu  $T$ , yang dirumuskan dengan persamaan (2-12). Energi Gibbs pada kondisi standar gas ideal dihitung dengan menggunakan persamaan (2-13).

$$\Delta G = \Delta G^\circ + nRT \ln K \quad (2-12)$$

$$\Delta G^\circ = -nRT \ln K \quad (2-13)$$

### 3 METODOLOGI

Untuk mendapatkan nilai suhu reaksi dan energi Gibbs serta tetapan kecepatan reaksi, maka dipilih tiga mekanisme reaksi yang biasa digunakan untuk pembuatan butadien. Mekanisme yang digunakan adalah proses Philips, proses Houndry Catadiene dan proses Nippon Zeon. Proses ini dipilih karena menggunakan bahan baku yang banyak tersedia di Indonesia, yaitu gas butana dari *Liquid Petroleum Gas* (LPG) dan etanol.

Berdasarkan mekanisme reaksi yang diperoleh dan hukum-hukum termodinamika dapat diperoleh besaran-besaran termodinamika seperti entalpi, entropi, energi Gibbs, Tekanan dan suhu jenuhnya, serta tetapan kesetimbangan. Kemudian berdasarkan hukum atau teori kinetika dan hukum Arrhenius,

maka tetapan kecepatan reaksi dapat dihitung, termasuk pola hubungan tetapan kecepatan reaksi terhadap suhu reaksi. Untuk mendapatkan suhu reaksi ketika reaksi spontan terjadi, maka dibuat suatu simulasi secara numerik sampai dengan energi Gibbs reaksi adalah nol.

Sebagai bahan simulasi, maka dihitung nilai  $\Delta G$  dengan persamaan (2-12). Nilai  $\Delta H$  diperoleh dari data entalpi pembentukan senyawa dari tabel sifat-sifat kimia senyawa. Kemudian berdasarkan nilai  $\Delta H$  tersebut ditentukan nilai tetapan kesetimbangan setiap waktu. Berdasarkan tetapan kesetimbangan tersebut setiap waktu, maka tetapan kecepatan reaksi dapat dihitung berdasarkan persamaan Arrhenius.

### 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk perhitungan awal nilai energi Gibbs, maka diperlukan data entalpi pembentukan senyawa yang ada, baik senyawa pereaksi maupun hasil reaksi. Nilai entalpi pembentukan senyawa pada suhu 20°C ditampilkan pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1: NILAI ENTALPI PEMBENTUKAN SENYAWA

No.	Senyawa	$\Delta H_f^\circ$ (J/kmol)
1	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-540000
2	O <sub>2</sub>	0
3	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	109240000
4	H <sub>2</sub> O	-241814000
5	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-125790000
6	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	-234950000
7	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	-166200000

Perhitungan energi Gibbs dan parameter reaksi untuk masing-masing proses adalah sebagai berikut :

#### Proses Haundry Catadiene

Reaksi yang berlangsung mengikuti persamaan (2-1) dan (2-2). Reaksi akan dipilih reaksi (2-2) karena prosesnya hanya satu tahap dan dapat mewakili reaksi (2-1) dan (2-2). Nilai entalpi pembentukan suatu reaksi kimia

adalah entalpi pembentukan senyawa produk dikurangi dengan total entalpi senyawa-senyawa pereaksi. Dengan menggunakan persamaan reaksi (2-2), maka dengan menggunakan basis perhitungan mol adalah 1 (satu) mol pereaksi, maka jumlah mol (n) dari masing-masing senyawa mula-mula, selama reaksi dan sisanya ditunjukkan pada Tabel 4-2.

Pada saat keadaan standar, maka nilai entropi adalah nol sehingga nilai  $\Delta G^\circ = \Delta H_f^\circ$ . Nilai entalpi pembentukan dari butadien merupakan energi selisih entalpi senyawa produk dikurangi entalpi senyawa pereaksi.

Pada kondisi standar, energi Gibbs pada keadaan standar adalah fungsi suhu dan tetapan kesetimbangan dengan persamaan (2-1). Nilai tetapan keseimbangan pada kondisi standar adalah  $K = 0,7703$ . Selanjutnya nilai energi Gibbs reaksi pembentukan butadien mengikuti persamaan (2-12). Hasilnya,  $\Delta G^\circ = \sum n \Delta H_f^\circ \text{ produk} - \sum n \Delta H_f^\circ \text{ pereaksi} = 26762 \text{ J/mol}$ .

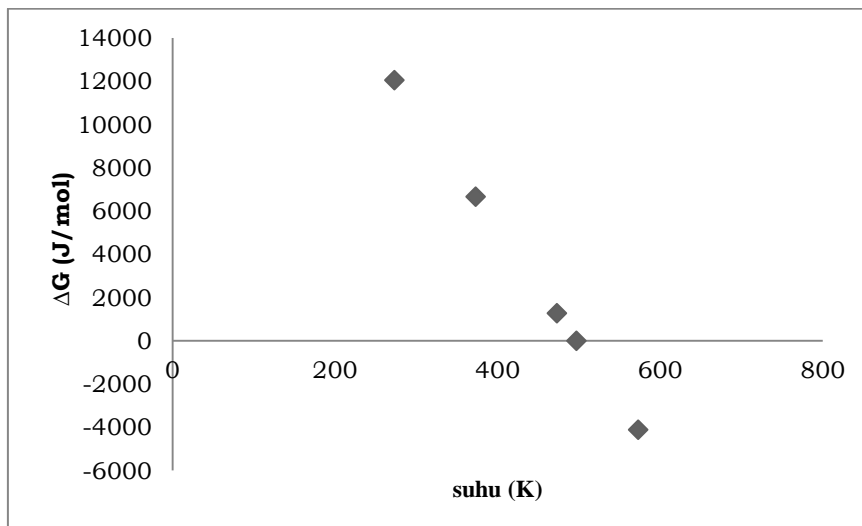
Karena nilai energi Gibbs merupakan fungsi suhu, maka nilai energi Gibbs sebagai fungsi suhu dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4-2: JUMLAH MOL (N) DARI TIAP SENYAWA SELAMA REAKSI

Konsentrasi	$C_2H_5OH + C_2H_4O \rightarrow C_4H_6 + 2H_2O$			
Mula-mula	1	1		
Berlangsung	1	1	1	2
Sisa	0	0	1	2

Tabel 4-3: NILAI  $\Delta G$  SEBAGAI FUNGSI SUHU

T (K)	$\Delta G$ (J/mol)
273	12051,88
373	6663,5584
473	1275,24
496.6667	0
573	-4113,09



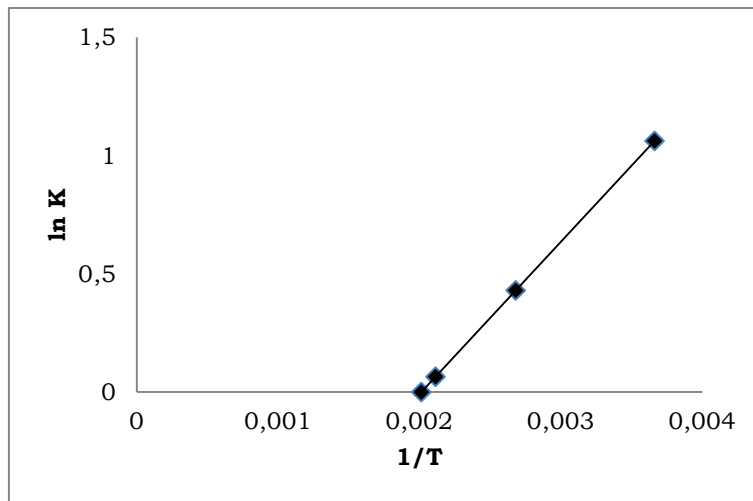
Gambar 4-1: Profil nilai  $\Delta G$  terhadap suhu reaksi

Ternyata nilai  $\Delta G$  pada suhu kamar bernilai positif, sehingga reaksi pembentukan butadien merupakan reaksi endotermis, reaksi tidak dapat terjadi secara spontan. Reaksi spontan terjadi pada suhu 500 K. Dengan memperhatikan gambar hubungan  $\Delta G$  fungsi suhu pada Gambar 4-1, maka suhu ideal untuk reaksi pembentukan butadien adalah 550 – 600 K. Apabila tetapan kesetimbangan merupakan tetapan kecepatan reaksi dengan anggapan reaksi bergeser ke kanan seluruhnya, maka nilai tetapan kecepatan reaksi yang dibutuhkan untuk parameter perancangan, diperoleh dari persamaan Arrhenius  $k = A \exp(-E/RT)$ . Dengan

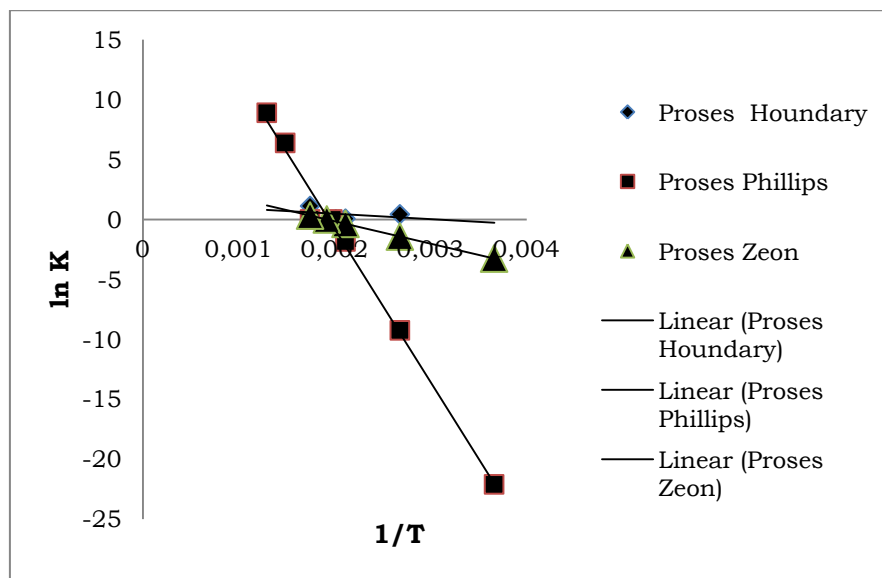
menggunakan ekstrapolasi grafik  $\ln k$  vs  $-1/T$ , maka nilai A dan E diperoleh. Hasilnya diwujudkan dalam persamaan berikut:

$$K = 0,629 \exp(-2178/T) \quad (4-1)$$

Dengan menggunakan cara yang sama, maka setiap proses dapat dihitung dan disarikan dalam bentuk grafik hubungan  $\ln K$  terhadap  $1/T$  sebagai berikut (Gambar 4-3). Ternyata secara keseluruhan grafik hubungan menunjukkan garis lurus/linier, sehingga mengikuti persamaan (2-10) atau tipe persamaan Arrhenius.



Gambar 4-2: Kurva hubungan  $\ln K$  terhadap  $1/T$



Gambar 4-3: Nilai  $\ln K$  vs  $1/T$  untuk berbagai proses

Berdasarkan hasil tersebut, maka nilai tetapan kecepatan reaksi pembentukan butadien tiap-tiap proses adalah sebagai berikut, Proses Haundry :  $k = 0,629 \exp(-2178/T)$ , Proses Phillips :  $k = 2,53672 \exp(-4714/T)$ , Proses Zeon :  $k = 0,9871 \exp(-3346/T)$ .

Nilai tersebut menunjukkan bahwa kecepatan reaksi secara umum proses Phillips lebih besar dibanding dengan kecepatan reaksi proses Haundry maupun proses Zeon. Perubahan suhu sangat sensitif terhadap proses phillips karena akan memberikan perubahan kecepatan reaksi yang sangat besar. Apabila melihat suhu reaksi spontan yang terjadi yaitu pada suhu 521°C pada proses Zeon, suhu 506°C pada proses Phillips dan suhu 496°C pada proses Haundry, maka seluruh proses terjadi pada suhu yang hampir sama, yaitu pada suhu sekitar 500°C. Dengan demikian, semua proses membutuhkan energi awal pemanasan yang cukup besar. Namun bila dilihat dari sensitifitas suhu terhadap kecepatan reaksi, apabila dianggap tidak terdapat dekomposisi selama reaksi berlangsung, maka reaksi Phillips terlalu sensitif terhadap suhu, sehingga pilihan yang baik adalah proses Haundry atau proses Zeon.

Semua proses pembuatan butadien membutuhkan suhu awal yang tinggi dan bersifat endotermis. Sensitifitas suhu menjadi penting karena peralatan dengan suhu yang tinggi di atas 400°C memerlukan desain yang khusus dan sangat mahal, bisa empat kali dari biaya pada suhu 100°C. Oleh karena itu, diperlukan peralatan proses yang memiliki material yang berbeda. Selain itu, proses pada suhu tinggi akan membutuhkan pemanas yang cukup mahal. Beberapa pemecahan yang mungkin diperlukan adalah dengan menggunakan katalisator sedemikian sehingga reaksi spontan dapat terjadi pada saat suhu reaksi lebih rendah. Fungsi katalisator adalah menurunkan energi aktivasi, yaitu energi yang diperlukan agar tumbukan antar

molekul dapat menjadi molekul lain atau reaksi kimia. Diperlukan kajian lebih lanjut untuk penggunaan katalisator karena tiap katalisator memiliki karakteristik dan pola bekerja yang berbeda-beda sehingga tidak dapat digeneralisasikan. Dengan adanya katalisator yang optimal, maka dimungkinkan diperoleh reaksi spontan pada suhu yang lebih rendah dari 400°C sehingga pabrikasi menjadi lebih murah.

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, maka diperoleh kesimpulan bahwa tetapan kecepatan reaksi dapat ditentukan berdasarkan besaran-besaran termodinamikanya berbasis energi Gibbs pembentukan. Nilai tetapan kecepatan reaksi pembentukan butadien tiap-tiap proses dirumuskan sebagai berikut: Proses Haundry:  $k = 0,629 \exp(-2178/T)$ , Proses Phillips:  $k = 2,53672 \exp(-4714/T)$ , Proses Zeon:  $k = 0,9871 \exp(-3346/T)$ .

Nilai tersebut menunjukkan bahwa kecepatan reaksi secara umum proses Phillips lebih besar dibanding dengan kecepatan reaksi proses Haundry maupun proses Zeon. Dilihat dari sensitifitas suhu terhadap kecepatan reaksi, apabila dianggap tidak terdapat dekomposisi selama reaksi berlangsung, maka reaksi Phillips terlalu sensitif terhadap suhu, sehingga pilihan yang baik adalah proses Haundry atau proses Zeon.

## DAFTAR RUJUKAN

- Aries, R.S., and Newton, R.D., 1955. *Chemical Engineering Cost Estimation*, Mc. Graw Hill Book Company, New York.
- Brownell, L.E., and Young, E.H., 1979. *Process Engineering Design*, 3<sup>rd</sup> Edition, Willey Eastern Ltd. New Delhi.
- Coulson, J.H., and Ricardson, J.F., 1983. *Chemical Engineering Design*, vol 6, Pergason Press Oxford.

- Faith, Keyes, and Clark, 1975. *Industrial Chemical*, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Kirk, R.E. and Othmer, D.F., 1982. *Encyclopedia of Chemical Tecnology*, 3<sup>rd</sup> Edition, vol. 4, Interscienci Publishing Inc., New York.
- Levenspiel, O., 1976, *Chemical Reaction Engineering*, 2<sup>rd</sup> Edition, John wiley and Sons Inc., New York.
- McKetta, J. J. and Cunningham, W. A., 1983. *Enchyclopedia of Chemical Processing and Design*, vol 9, Mc. Graw HillBook.Co, Tokyo.
- Perry's, R.H., and Green, D., 1999. *Perry's Chemical Engginer's Hand Book*, 7<sup>th</sup> Edition, Mc. Graw Hill Book Company inc., New York.
- Peters, M.S., and Timmerhaus, 1980. *Plant design and Economy for Chemical Enggeneer's*, 3<sup>rd</sup> Edition, Mc Graw Hill Book Company Inc., Singapore.
- Reid, R.C., Prauswitz, J.M., 1987. *The Property of gases and Liquids*, 4<sup>th</sup> Edition, Mc. Graw Hill Book company Inc., New York.
- Wallas, S.M., 1995. *Chemical Proses Equipment*, Buterworth Publisher, USA.
- Wibowo, H. B., 2009. *Pembuatan Poliuretan Sebagai Bahan Baku Propelan*, SIPTEKGAN XIII, Bogor.