

STUDI AWAL PEMANFAATAN CO₂ UNTUK PEMBENTUKAN NATRIUM KARBONAT : KAJIAN KINETIKA REAKSI

Ari Selastian Saputra¹, Muhammad Adhil Syach Prof. Dr. Eng. Reni Desmiarti, S.T, M.T²
Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta
Jl.Gajah Mada No.19 Gunung Pangilun, Padang
ariselastian0@gmail.com

Abstract.

The use of fossil fuels has increased drastically since the Industrial Revolution and has increased CO₂ emissions into the atmosphere. Carbon capture utilization (CCU) technology has recently received a lot of attention to convert captured CO₂, as a renewable carbon feedstock, into products and store it permanently. In this study, the manufacture of Na₂CO₃ using a carbonator reactor as a CO₂ absorber into NaOH solution. The method used is the carbonation method. This study studied the optimum conditions for the formation of sodium carbonate from CO₂ and NaOH by reviewing the reaction kinetics (reaction rate constants and activation energy). Making Na₂CO₃ is done by varying the concentration of NaOH (20%, 30%, 50%, 60%, 70%) and reaction temperature (30°C, 40°C, 50°C, 60°C). Fixed variable reactor volume 250 ml and reaction time for 30 minutes. The results of this study indicate that the higher the concentration of NaOH and the temperature, the greater the value of the reaction rate, the greater the activation energy, the slower the reaction rate because the minimum energy for the reaction to occur is greater. In the XRF analysis of sodium carbonate, this research includes light (glass industry) and dense (detergent) types at temperatures of 40°C and 60°C.

PENDAHULUAN

Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas yang paling berpengaruh terhadap pemanasan global (Gangopadhyay et al., 2008). Penggunaan bahan bakar fosil telah meningkat secara drastis sejak Revolusi Industri dan meningkatkan emisi CO₂ ke atmosfer. Karbon dioksida yang dihasilkan dari pembakaran fosil untuk pembangkit tenaga dan produksi panas dikatakan hampir 35- 40% dari jumlah CO₂ yang dibuang di seluruh dunia (Jafar, 2017). Oleh karena itu, dunia saat ini menghadapi perubahan iklim dan banyak negara telah berusaha keras untuk mengurangi emisi CO₂ (Heitmann dan Khalilian, 2011). Untuk mengurangi emisi atmosfer CO₂, Brown (2000) mengusulkan konsep EGS (*Enhanced Geothermal Systems*) baru yang akan menggunakan CO₂ sebagai pengganti air sebagai fluida transmisi panas dan dapat memiliki sifat geokimia yang menguntungkan, karena serapan CO₂ oleh mineral batuan akan berlangsung cukup cepat (Fouillac, 2004).

Teknologi *carbon capture utilization* (CCU) baru-baru ini menerima banyak perhatian untuk mengubah emisi CO₂ sebagai bahan baku karbon yang dapat diperbarui, menjadi produk dan menyimpannya secara permanen. Faktanya, CCU

memperlakukan emisi CO₂ sebagai sumber daya terbarukan untuk melengkapi atau mengganti bahan baku petrokimia konvensional (Styring, 2011). Terlepas dari keuntungan signifikan yang ditawarkan oleh CCU dibandingkan dengan CCS (*carbon capture and storage*), dapat mengubah emisi CO₂ dan menggunakannya dalam reaksi kimia terutama karena sifat CO₂ itu sendiri yang stabil secara termodinamika (Krishnamurthy, 2017).

Penyerapan CO₂ di industri kebanyakan menggunakan kolom absorber. Pada proses ini CO₂ yang berada dalam gas proses diambil oleh larutan penyerap. Larutan penyerap CO₂ yang digunakan adalah larutan Benfield. Larutan Benfield ini terdiri dari kalium karbonat, dietanolamin dan lain lain. Komponen yang akan menyerap CO₂ adalah kalium karbonat. Kalium karbonat ini memiliki kelemahan yaitu laju reaksi yang lambat. Dan juga penyerapan CO₂ banyak dilakukan dengan larutan NaOH dikarenakan laju reaksi dan kapasitas absorpsi CO₂ lebih tinggi dibandingkan dengan kalium karbonat (Stolaroff et al., 2008). Selain itu, NaOH lebih berlimpah, lebih murah, dan lebih dikenal daripada kalium karbonat.

CO₂ dapat bereaksi dengan larutan NaOH membentuk Na₂CO₃. Faktor faktor yang

mempengaruhi laju reaksi adalah konsentrasi reaktan, temperatur, luas permukaan dan katalis.

Kordylewsk (2013) menjelaskan, pembuatan Na_2CO_3 menggunakan alat Dreschel washer sebagai penyerap CO_2 ke dalam larutan NaOH . Metoda yang digunakan adalah metoda karbonasi. Penyerapan CO_2 yang diperoleh menggunakan 50% NaOH dan 15% CO_2 sehingga menghasilkan Na_2CO_3 1,8 %. Dengan meninjau penelitian sebelumnya hanya berfokus pada

penyerapan gas CO_2 dan NaOH . Selain itu, pada penelitian tersebut menghasilkan jumlah Na_2CO_3 yang sedikit. Sehingga pada penelitian ini mempelajari kondisi optimum pembentukan natrium karbonat dari CO_2 dan NaOH dengan meninjau kinetika reaksi (konstanta laju reaksi dan energi aktivasi). Data konstanta konstanta laju reaksi dan enegi aktivasi diperlukan untuk perancangan reaktor

Metoda Penelitian

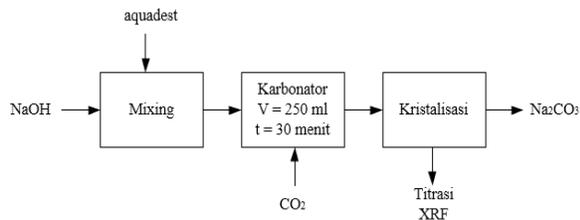
2.1 Material

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut : 1 set reaktor karbonator, gelas piala, cawan penguap, oven, neraca analitik, magnetic stirrer, batang pengaduk, erlenmeyer, buret, labu ukur, pipet takar, pipet gondok, bola hisap, standar dan klem ,spatula, pipet tetes. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut : NaOH , aquadest, gas CO_2 .

2.2 Method

2.2.1. Pembuatan natrium karbonat

Berikut blok diagram pembuatan Natrium Karbonat dapat di lihat pada Gambar 3.1



Gambar 2. 1 Blok Diagram Pembuatan Natrium Karbonat

Variasi { NaOH } : 20%, 30%, 50%, 60%, 70%

Variasi T : 30°C, 40°C, 50°C, 60°C

2.2.2. Pengukuran kadar natrium karbonat

Pertama dicuplik sampel pada waktu (t = 3, 5, 8, 13,25 menit) sebanyak 20 ml. Kemudian ditambahkan aquadest sebanyak 100 ml dan ditambahkan 3 tetes indikator PP. Larutan tersebut dititrasi dengan HCl 0,1 N. Dihentikan titrasi TAT pink seulas, catat volume penitaran. Kemudian larutan yang sudah di titrasi tadi ditambahkan 3 tetes indikator methyl orange dan di titrasi hingga TAT sindur methyl, catat volume penitaran. Dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\% \text{Na}_2\text{CO}_3 = \frac{(v_1 - v_2) \times \text{BENa}_2\text{CO}_3 \times \text{NHCl}}{\text{Volume Sampel}} \times 100\%$$

Keterangan :

- V1 = volume penitaran pertama
- V2 = volume penitaran kedua
- BENa_2CO_3 = berat ekuivalen Na_2CO_3
- NHCl = normalitas HCl

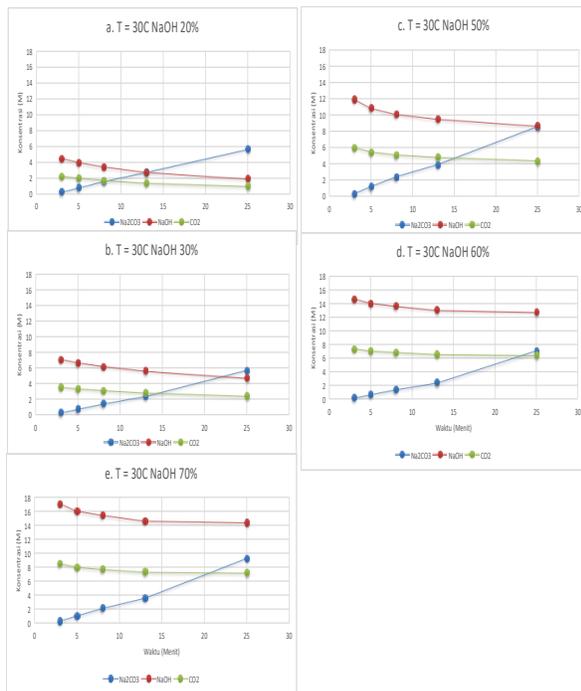
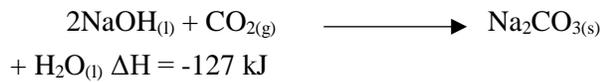
2.2.3. Analisa Xrf

Sampel natrium karbonat dikeringkan, lalu sampel tersebut digerus dan ditimbang sebanyak 4 gram . Dimasukkan kedalam cuvet dan diujikan selama 15 menit.

Hasil dan Pembahasan

3.1 Profil Pengurangan Massa Reaktan dan Pembentukan Na₂CO₃ Terhadap Waktu pada T = 30°C

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 20%, 30%, 50%, 60%, 70% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit dengan waktu pengambilan sampel 3, 5, 8, 13, 25 menit. Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu ditampilkan pada Gambar 3.1 a-e sebagai berikut :



Gambar 3. 1 Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu pada T 30°C

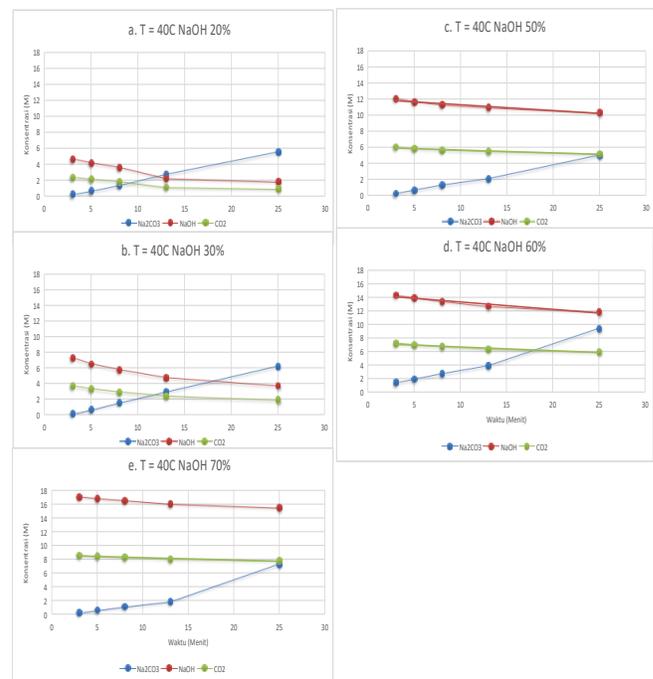
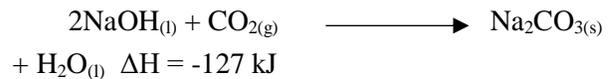
Berdasarkan Gambar 3.1 a - e dapat dilihat bahwa terjadi penurunan jumlah NaOH dan CO₂ yang diikuti dengan meningkatnya nilai Na₂CO₃.

Pada konsentrasi NaOH 20%, 30%, 50%, 60%, dan 70% terjadi peningkatan produk natrium karbonat secara berturut turut 81,25%, 92,49%, 93,40, 96,33%, 96,61%. serta terjadi penurunan CO₂ secara berturut turut 56,41%, 32,36%, 27,13%, 12,61%, 15,58%.

Berdasarkan data yang didapat menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin besar jumlah CO₂ yang terserap dan semakin meningkat produk natrium karbonat yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan semakin banyaknya molekul NaOH yang dikontakkan dengan gas CO₂ maka jumlah produk yang dihasilkan semakin banyak (Kartoharjo, dkk, 2011).

3.2 Profil Pengurangan Massa Reaktan dan Pembentukan Na₂CO₃ Terhadap Waktu pada T = 40°C

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 20%, 30%, 50%, 60%, 70% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit dengan waktu pengambilan sampel 3, 5, 8, 13, 25 menit. Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu ditampilkan pada Gambar 3.2 a-e sebagai berikut :



Gambar 3. 2 Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu pada T 40°C

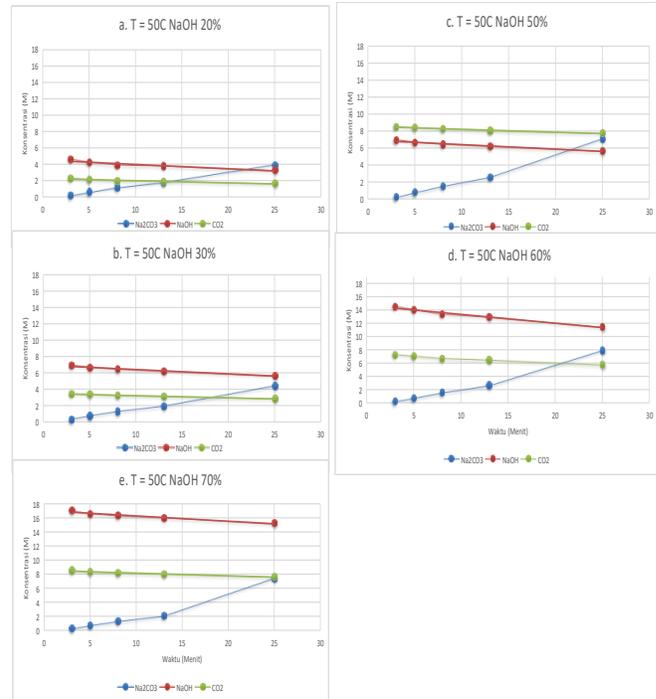
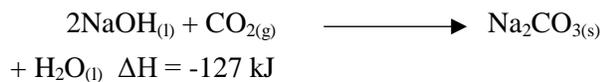
Berdasarkan Gambar 3.2 a-e dapat dilihat bahwa terjadi penurunan jumlah NaOH dan CO₂ yang diikuti dengan meningkatnya nilai Na₂CO₃.

Pada konsentrasi NaOH 20%, 30%, 50%, 60%, dan 70% terjadi peningkatan produk natrium karbonat secara berturut turut 92,82%, 93,64%, 95,03%, 95,86%, , 95,90%. serta terjadi penurunan CO₂ secara berturut turut 60,61%, 48,85%, 14,35%, 17,17%, 9,01%.

Berdasarkan data yang didapat menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin besar jumlah CO₂ yang terserap dan semakin meningkat produk natrium karbonat yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan semakin banyaknya molekul NaOH yang dikontakkan dengan gas CO₂ maka jumlah produk yang dihasilkan semakin banyak (Kartoharjo, dkk, 2011).

3.3 Profil Pengurangan Massa Reaktan dan Pembentukan Na₂CO₃ Terhadap Waktu pada T = 50°C

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 20%, 30%, 50%, 60%,70% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit dengan waktu pengambilan sampel 3, 5, 8, 13, 25 menit. Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu ditampilkan pada Gambar 3.3 a-e sebagai berikut:



Gambar 3. 3 Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu pada T 50°C

Berdasarkan Gambar 3.3 a-e dapat dilihat bahwa terjadi penurunan jumlah NaOH dan CO₂ yang diikuti dengan meningkatnya nilai Na₂CO₃.

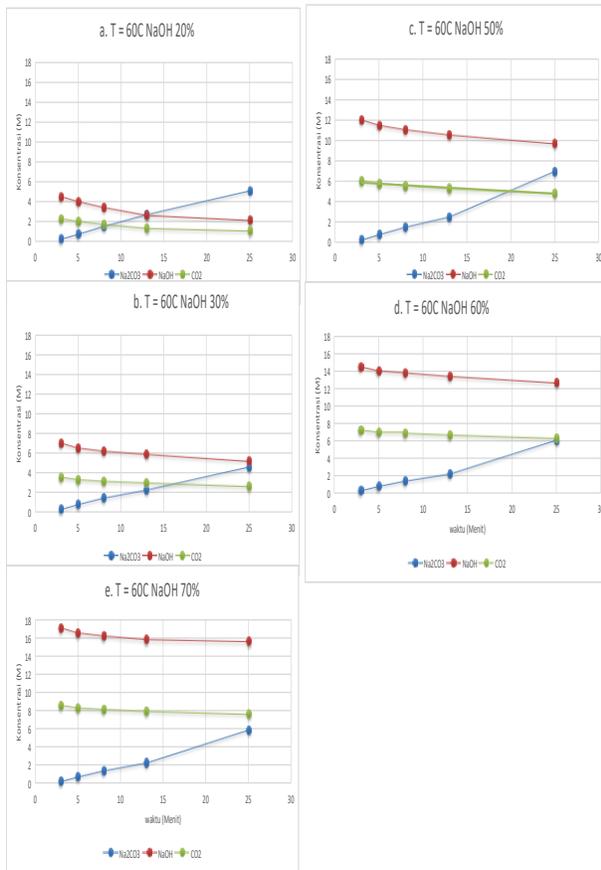
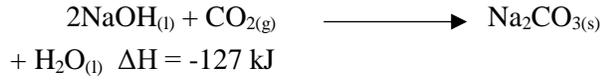
Pada konsentrasi NaOH 20%, 30%, 50%, 60%, dan 70% terjadi peningkatan produk natrium karbonat secara berturut turut 87,57%, 89,99%, 95,31%, 95,84%, 96,12%. serta terjadi penurunan CO₂ secara berturut turut 29,36%, 17,84%, 17,84%, 21,18%, 10,61%.

Berdasarkan data yang didapat menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin besar jumlah CO₂ yang terserap dan semakin meningkat produk natrium karbonat yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan semakin banyaknya molekul NaOH yang dikontakkan dengan gas CO₂ maka jumlah produk yang dihasilkan semakin banyak (Kartoharjo, dkk, 2011).

3.4 Profil Pengurangan Massa Reaktan dan Pembentukan Na₂CO₃ Terhadap Waktu pada T = 60°C

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH

yaitu 20%, 30%, 50%, 60%,70% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit dengan waktu pengambilan sampel 3, 5, 8, 13, 25 menit. Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu ditampilkan pada Gambar 3.4 a-e sebagai berikut:



Gambar 3. 4 Profil NaOH, CO₂ dan Na₂CO₃ terhadap waktu pada T 60°C

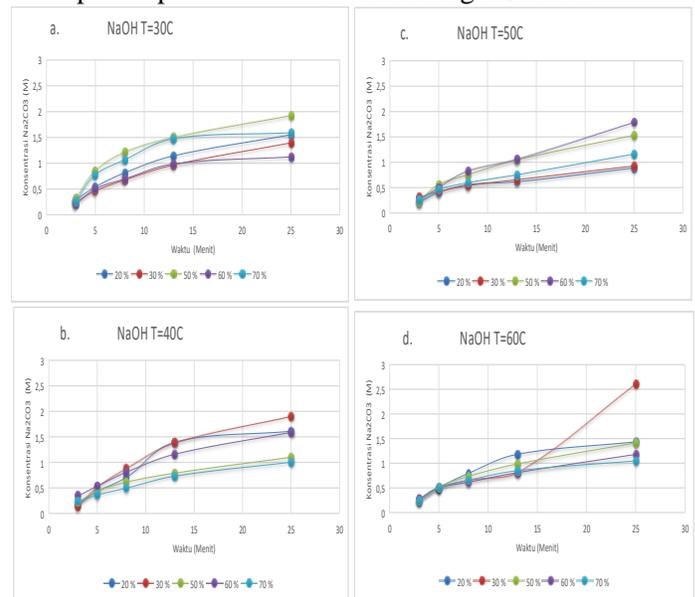
Berdasarkan Gambar 3.4 a dapat dilihat bahwa terjadi penurunan jumlah NaOH dan CO₂ yang diikuti dengan meningkatnya nilai Na₂CO₃.

Pada konsentrasi NaOH 20%, 30%, 50%, 60%, dan 70% terjadi peningkatan produk natrium karbonat secara berturut turut 89,54%, 89,90%, 93,34%, 93,37%, 93,78%. serta terjadi penurunan CO₂ secara berturut turut 52,04%, 25,77%, 19,19%, 12,47%, 11,26%.

Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin besar jumlah CO₂ yang terserap dan semakin meningkat produk natrium karbonat yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan semakin banyaknya molekul NaOH yang dikontakkan dengan gas CO₂ maka jumlah produk yang dihasilkan semakin banyak (Kartoharjo, dkk, 2011).

3.5 Pengaruh Konsentrasi NaOH terhadap Pembentukan Natrium Karbonat

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 20%, 30%, 50%, 60%, 70% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit. Pengaruh konsentrasi NaOH terhadap Na₂CO₃ ditampilkan pada Gambar 3.5 a-c sebagai berikut:



Gambar 3. 5 Pengaruh Konsentrasi NaOH terhadap Na₂CO₃

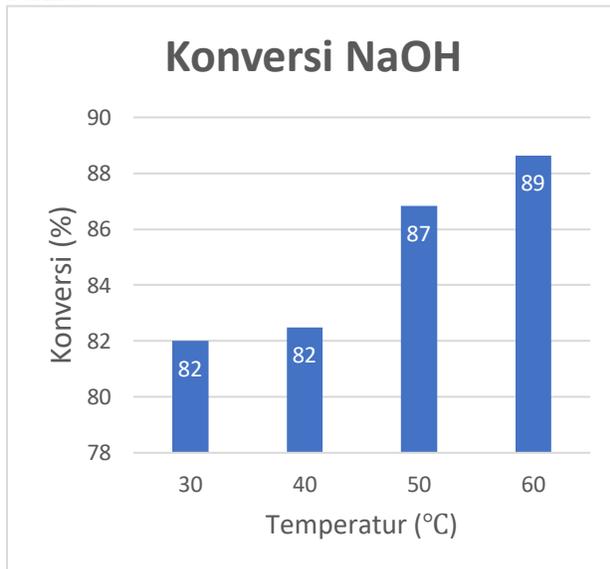
Berdasarkan Gambar 3.5 a-d dapat dilihat bahwa rasio masing-masing konsentrasi NaOH didapatkan perolehan natrium karbonat tertinggi rata-rata pada konsentrasi NaOH 70%. Jika dilihat pada konsentrasi NaOH 20% dan 30%, nilai perolehan natrium karbonat yang di dapatkan semakin rendah. Hal ini sesuai dengan teori (kumaro dan hadiyanto, 2000) yang menyatakan semakin tinggi konsentrasi NaOH maka produk yang dihasilkan akan semakin banyak. Hal ini disebabkan karena semakin banyaknya molekul

NaOH yang dikontakkan dengan CO₂ sehingga menghasilkan produk.

Pada penelitian nava sapitri (2020) tentang pembuatan natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan konsentrasi NaOH 11,6%, 10,6%, 8,3%, dan 5% menyatakan bahwa semakin besar konsentrasi akan menghasilkan endapan yang diperoleh akan semakin meningkat. Hal ini karena semakin tinggi konsentrasi maka semakin banyak molekul natrium hidroksida (NaOH) yang berinteraksi dengan karbon dioksida (CO₂) sehingga akan menghasilkan endapan.

3.6 Pengaruh Temperatur terhadap Konversi Reaksi

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 60% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit. Pengaruh temperature terhadap Na₂CO₃ ditampilkan pada Gambar 3.6 sebagai berikut:



Gambar 3. 6 Pengaruh Temperatur terhadap Na₂CO₃.

Gambar 3.6 memperlihatkan hubungan antara temperatur dengan konversi yang dihasilkan menunjukkan pada temperatur 30, 40, 50, 60°C diperoleh konversi secara berturut turut 82%, 82%, 87%, 89%.

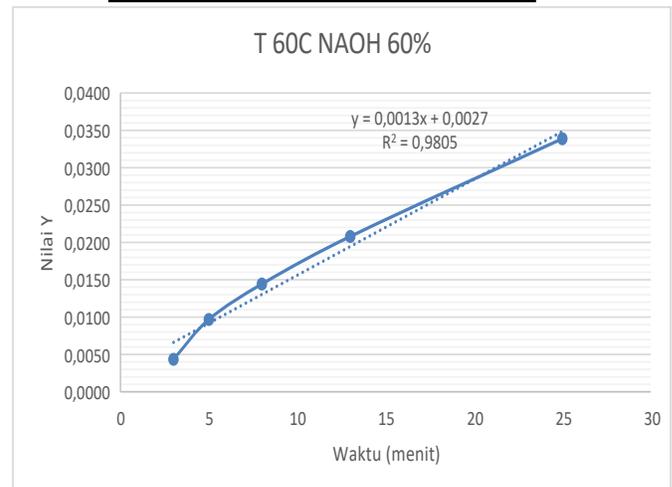
Reaksi pembentukan natrium karbonat merupakan reaksi eksotermik. Maka bila dalam

suatu reaksi eksotermis dilakukan perubahan suhu reaksi, maka kesetimbangan reaksi kimia akan bergeser ke arah reaksi endotermik (ke arah kiri). Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi temperatur maka konversi natrium karbonat belum terjadi penurunan konversi. Hal ini dikarenakan suhu reaksi masih bisa di naikan sehingga mencapai temperatur optimum dari reaksi. sesuai dengan teori Le Chatelier dimana tetapan kesetimbangan kimia berbanding terbalik dengan suhu namun berbanding lurus dengan konversi, atau dengan kata lain konversi berbanding terbalik dengan suhu reaksi (Maisaroh, 2019). Hal tersebut di karenakan suhu optimum dalam pembentukan natrium karbonat belum di dapatkan.

3.7 Laju Reaksi Pembentukan Natrium Karbonat

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 20%, 30%, 50%, 60%,70% didapatkan nilai laju reaksi pembentukan Na₂CO₃ yang mana nilai y berasal dari turunan rumus pembentukan Na₂CO₃ dapat dilihat bab 3 dengan subbab 3.7 dan laju reaksi dapat dilihat pada Gambar 3.7 sebagai berikut:

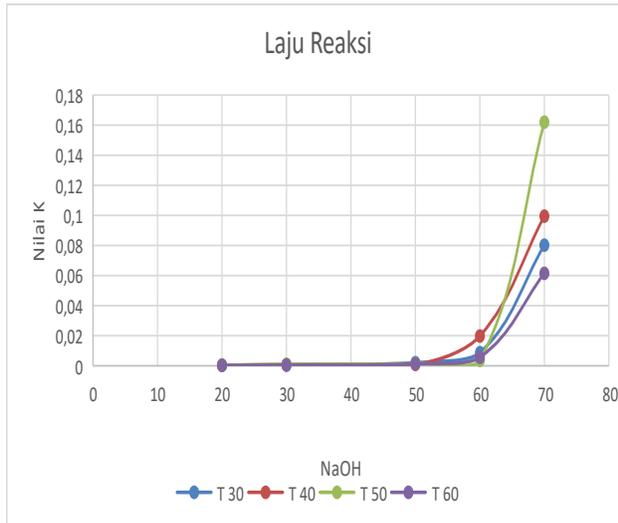
$$\frac{1}{8} \left[\frac{1}{[NaOH]^2} - \frac{1}{[NaOH]_0^2} \right] = kt$$



Gambar 3. 7 Laju Reaksi Pembentukan Na₂CO₃

Berdasarkan Gambar 3.7 dapat dilihat konsentrasi NaOH optimum pada NaOH 60% dengan R 0,9806 dimana nilai K sebenarnya 0,0013 yang diperoleh dari y = ax + b. Hal ini menunjukkan bahwa semakin mendekati 1 nilai R

maka nilai K sebenarnya yang dihasilkan akan semakin akurat.



Gambar 3. 8 Hubungan Laju Reaksi terhadap Temperatur

Berdasarkan Gambar 3.8 dapat dilihat bahwa pada konsentrasi NaOH 20%, 30%, 50%, dan 70% dan pada temperatur 30°C, 40°C, 50°C, 60°C sama sama mengalami kenaikan terhadap nilai K.

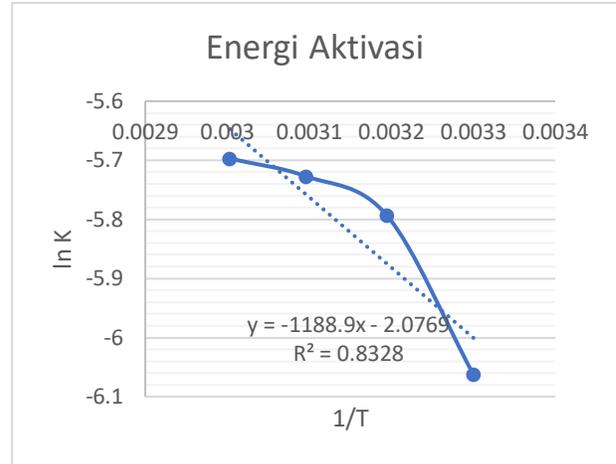
Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi konsentrasi NaOH dan temperatur maka nilai laju reaksinya semakin besar Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa laju reaksi berbanding lurus dengan dengan konsentrasi dari pereaksi. (James Brandy, dkk 2010) .

3.8 Perhitungan Energi Aktivasi

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ turunan rumus dan perhitungan energi aktivasi Na₂CO₃ ditampilkan pada Gambar 3.9 sebagai berikut:

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

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{R} \left[\frac{1}{T} \right]$$



Gambar 3. 9 Perhitungan Energi Aktivasi

Berdasarkan Gambar 3.9 di dapatkan grafik ln k vs 1/T, dan diperoleh grafik berbentuk linier dengan persamaan $y = -1188,9x + 2,0796$. Dari grafik ln k dan 1/T diperoleh $Ea = 9884.43146$ kj/mol.

Semakin kecil nilai ln k maka nilai 1/T rata-rata semakin besar. Ini membuktikan bahwa semakin tinggi temperatur, energi aktivasinya akan semakin kecil dan semakin pendek waktu untuk terjadinya reaksi. Hal ini sesuai dengan teori dimana energi aktivasi berbanding terbalik dengan laju reaksi (widiyanti, 2019).

3.9 Kualitas Produk Natrium Karbonat

Pada proses produksi natrium karbonat dari NaOH dan CO₂ dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu 20%, 30%, 50%, 60%,70% dengan temperatur 30, 40, 50, 60°C Hasil yang didapat setelah dilakukan percobaan selama 30 menit dengan waktu 3, 5, 8, 13, 25 menit. Kualitas Produk Natrium Karbonat ditampilkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Kualitas Produk Natrium Karbonat Hasil Penelitian

KOMPONEN	% mass	Na ₂ CO ₃				
		PA	30° C	40° C	50° C	60° C
Mg	%	0,06 37	0,03 3	0,04 86	0,02 86	0,04 54
Al	%	0,01 32	0,15 7	0,08 99	0,07 68	0,09 02
P	%	0,00 1	0,00 15	0,00 14	0,00 14	0,00 14

Cl	%	ND	0,01 52	0,00 97	0,01 79	0,01 78
K	%	ND	0,05 32	0,01 25	0,08 72	0,03 38
Ca	%	0,00 44	0,01 2	0,00 59	0,01 62	0,01 03
Fe	%	0,00 07	0,00 48	ND	0,00 36	0,00 72
Pb	%	ND	ND	ND	0,00 01	ND
SiO₂	%	0,00 85	0,81 6	0,67 9	1,28	0,59 8

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa Semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin besar jumlah CO₂ yang terserap dan semakin meningkat produk natrium karbonat yang dihasilkan. Semakin tinggi temperatur maka produk yang dihasilkan akan semakin baik. Semakin tinggi konsentrasi NaOH dan temperatur maka nilai laju reaksinya semakin besar. Semakin kecil nilai ln k maka nilai 1/T rata-rata semakin besar. Ini membuktikan bahwa semakin tinggi temperatur, energi aktivasinya akan semakin kecil dan semakin pendek waktu untuk terjadinya reaksi. Natrium karbonat yang dihasilkan dari penelitian ini masuk kedalam spesifikasi natrium karbonat jenis *light* (industri kaca) dan *dense* (industri detergen) dengan temperatur 40°C dan 60°C.

DAFTAR PUSTAKA

- Dang Viet Quang, Dindi Abdallah, dan Mohammad R. M. 2019. *The Utilization of CO₂, Alkaline Solid Waste, and Desalination Reject Brine in Soda Ash Production*. CO₂ Separation, Purification and Conversion to Chemicals and Fuels. 1(10): 153-184. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3296-8_9.
- Fouillac, C., Sanjuan, B., Gentier, S., Czernichowski-Lauriol, I., 2004. *Could sequestration of CO₂ be combined with the*

SO₃	%	0,00 18	0,00 31	0,00 27	0,00 3	0,00 38
Na₂CO₃	%	99,9	98,9	99,1	98,5	99,2

Berdasarkan tabel 3.1 dapat dilihat bahwa natrium karbonat yang dihasilkan dari penelitian ini masuk kedalam spesifikasi natrium karbonat jenis *light* dan *dense* dengan temperatur 40°C dan 60°C.

development of Enhanced Geothermal Systems.

Paper presented at Third Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA.

- Gangopadhyay PK, Lahiri-Dutt K, Saha K. *Application of remote sensing to identify coalfires in the Raniganj Coalbelt, India*. Int J Appl Earth Obs Geoinform 2006;8:188–95.

- Heitmann dan Khalilian. 2011. *Accounting For CO₂ Emissions From International Shipping: Burden Sharing Under Different UNFCCC Allocation Options And Regime Scenarios*. Marine Policy. 35(5): 682-691. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2011.02.009>.

- Krishnamurthy Anyrudh dan Almamoori Ahmed, 2017. *Carbon Capture and Utilization Update*. Energy Technology. 5(6). <https://doi.org/10.1002/ente.201600747>.