



Isoterm Adsorpsi Arang Kulit Jengkol Sebagai Adsorben CO₂

Muhammad Fadhil Rahman¹, Adjar Pratoto^{2*}, Dendi Adi Saputra³, Akio Kodama⁴

^{1,2,3}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas,
Padang, Sumatera Barat 25163, Indonesia

⁴Institute for Frontier Science Initiative, Universitas Kanazawa, Kakumachi,
Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Jepang

¹fadil.rahman86@gmail.com, ^{2*}adjar.pratoto@eng.unand.ac.id, ³dendias@eng.unand.ac.id, ⁴akodama@se.kanazawa-u.ac.jp

Abstract

The concentration of carbon dioxide (CO₂) gas in the atmosphere continues to increase every year, mainly due to human activities such as burning fossil fuels for energy, industrial processes, and transportation. The development of CO₂ gas reduction research continues to be carried out, one of which is the adsorption process using adsorbents. The research was carried out by looking at the effect of variations in activating agent and activation temperature on adsorbents as CO₂ adsorbents and how N₂ and pore size distribution influence CO₂ adsorption. The active carbon adsorbent used comes from jengkol peel which is carbonized via the pyrolysis method. Adsorbents are made by varying the type of activating material (KOH, Urea, and KOH+urea) and activation temperature (600°C, 700°C, and 800°C). The active ingredient KOH+urea has better absorption capacity than other variations, but not too high. N₂ gas does not really affect the CO₂ adsorption process because it has a low N₂ adsorption isotherm, so it is not worrying if the CO₂ adsorption process also contains N₂ in the air. Based on measurements with Belsorp-Max II, the data obtained is only specific surface area data, this is due to the small surface pores of the adsorbent. The temperature of 800°C has a better specific surface area than other variations, this is also by the higher CO₂ adsorption capacity. So it is concluded that the pore surface area influences the ability to absorb CO₂. Based on the data obtained, jengkol peel charcoal is not suitable as a CO₂ adsorbent because it has a low pore surface area and adsorption isotherm.

Keywords: CO₂, adsorption, jengkol skin, activating agent, activation temperature.

Abstrak

Konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) di atmosfer terus meningkat setiap tahunnya, terutama disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil untuk energi, proses industri, dan transportasi. Perkembangan penelitian reduksi gas CO₂ terus dilakukan, salah satunya dengan proses adsorpsi menggunakan adsorben. Penelitian dilakukan dengan melihat pengaruh variasi zat pengaktif dan suhu aktivasi pada adsorben sebagai penyerap CO₂ dan bagaimana pengaruh N₂ serta distribusi ukuran pori terhadap adsorpsi CO₂. Adsorben karbon aktif yang digunakan berasal dari kulit jengkol yang dikarbonisasi melalui metode pirolisis. Adsorben dibuat dengan memvariasikan jenis bahan pengaktif (KOH, Urea, dan KOH + urea) dan suhu aktivasi (600°C, 700°C, dan 800°C). Bahan pengaktif KOH + urea memiliki kemampuan penyerapan yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya, namun tidak terlalu tinggi. Gas N₂ tidak terlalu mempengaruhi proses adsorpsi CO₂ karena memiliki adsorpsi isoterm N₂ yang rendah, jadi tidak mengkhawatirkan jika proses adsorpsi CO₂ juga terdapat N₂ di udara. Berdasarkan pengukuran dengan Belsorp-Max II, data yang didapatkan hanya data luas permukaan spesifik, hal ini dikarenakan kecilnya permukaan pori yang dimiliki adsorben. Temperatur 800°C memiliki luas permukaan spesifik yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya, hal ini sesuai juga dengan kemampuan adsorpsi CO₂ yang lebih tinggi. Sehingga disimpulkan bahwa luas permukaan pori mempengaruhi kemampuan penyerapan CO₂. Berdasarkan data yang didapatkan, arang kulit jengkol tidak cocok dijadikan sebagai adsorben CO₂ karena memiliki luas permukaan pori dan adsorpsi isoterm yang rendah.

Kata kunci: CO₂, adsorpsi, kulit jengkol, bahan pengaktif, suhu aktivasi.

1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah emisi CO₂ merupakan dampak negatif dari penggunaan energi yang berlebihan berdampak negatif berupa peningkatan jumlah emisi. Emisi CO₂ yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan dan perubahan iklim yang ekstrim [1]. Peristiwa yang dirasakan saat ini adalah pergeseran siklus musim dan peningkatan panas bumi. Penelitian dan pengembangan penelitian untuk mengurangi emisi gas CO₂ terus dilakukan. Salah satunya adalah pengembangan teknologi penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon (CCUS). Teknologi ini memiliki kapasitas penangkapan CO₂ sekitar 40 juta ton per tahun. Salah satu penerapan teknologi CCUS adalah proses adsorpsi. Adsorpsi merupakan proses penyerapan molekul adsorbat atau emisi gas CO₂ pada permukaan adsorben [2].

Proses adsorpsi menggunakan bahan adsorben padat yang dapat digunakan untuk menangkap CO₂, antara lain bahan karbon berpori [3], karbon aktif [4], zeolit [5], kerangka logam organik (MOFs) [6], dan bahan nanomaterial [7]. Namun produksi beberapa bahan tersebut memerlukan energi dalam jumlah besar dan proses sintesis yang rumit [8]. Akibatnya, beberapa adsorben belum layak untuk aplikasi industri. Di sisi lain, biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan dengan fungsi karbon tetap (biochar dan karbon aktif) [9].

Penelitian ini merupakan upaya penerapan teknologi CCUS pada proses adsorben dalam mengurangi emisi gas CO₂ untuk mencegah pemanasan global. Salah satu kriteria dalam pembuatan adsorben adalah mempunyai luas permukaan yang tinggi dan kandungan selulosa yang tinggi. Ukuran pori berhubungan dengan luas permukaan. Semakin kecil ukuran diameter pori dan semakin banyak pori-pori adsorben maka luas permukaannya semakin tinggi sehingga jumlah molekul yang teradsorpsi juga akan semakin banyak.

Salah satu turunan biomassa yang bisa dijadikan sebagai kandidat adsorben adalah kulit jengkol. Produksi jengkol di Indonesia tahun 2009 mencapai 62.475 ton/tahun. Dari jumlah tersebut dapat dihasilkan limbah kulit jengkol sekitar 49.087,5 ton/tahun [10]. Pemanfaatan kulit jengkol yang belum maksimal menyebabkan pencemaran lingkungan akibat limbah yang ditimbulkan. Penilitan kulit jengkol sebagai adsorben merupakan suatu upaya *win-win solution*, dimana upaya pengurangan limbah dapat dilakukan serta pengurangan keberadaan CO₂ di atmosfer bumi juga bisa dilakukan.

Kulit jengkol mengandung beberapa senyawa-senyawa aktif seperti alkaloid, flavonoid, glikosida antraknon, tannin, triterpenoid/steroid, dan saponin yang dimanfaatkan sebagai bioherbisida dan

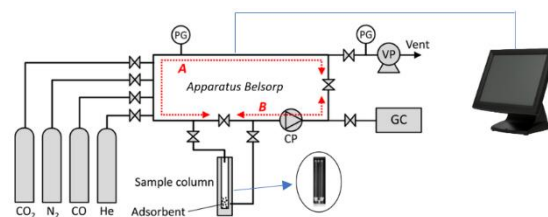
biolarvasida. Selain kandungan diatas kulit jengkol juga memiliki unsur karbon (C) sebesar 44,02% yang diyakini unsur paling penting dapat dijadikannya kulit jengkol sebagai adsorben [11]

Kulit jengkol nantinya akan dijadikan arang aktif dengan variasi bahan pengaktif (KOH, urea, dan KOH+Urea) dan suhu aktivasi (600°C, 700°C, dan 800°C). Penelitian ini dilakukan untuk melihat potensi arang kulit jengkol sebagai adsorben CO₂. Distribusi ukuran pori arang kulit jengkol juga diamati untuk membandingkannya dengan hasil kapasitas adsorben. Pengukuran adsorpsi isotherm N₂ juga dilakukan, untuk melihat potensi gas dalam mempengaruhi proses penyerapan CO₂.

2. Metode

2.1 Sampel dan instalasi pengujian

Kulit jengkol (*Pithecollobium Jiringa*) yang diperoleh dari limbah pasar yang berlokasi di Padang, Sumatera Barat, Indonesia dipilih sebagai bahan baku. Kulit jengkol dibersihkan dengan air suling untuk menghilangkan debu dan kotoran anorganik. Sampel yang telah dibersihkan dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam. Kalium hidroksida (KOH ≤ 100%) dibeli dari PT Smart Lab Indonesia dan urea (CH₄N₂O ≤ 99%) dibeli dari Pudak Scientific. Sebelum pengujian, sampel akan dibersihkan dan dinetralkan dengan air suling dan asam klorida (HCl 15%) yang dibeli dari Pusat Laboratorium Rofa. Produksi adsorben melibatkan karbonisasi pirolisis, aktivasi kimia dan aktivasi fisik, menggunakan tungku. Pengukuran adsorpsi isotherm adsorben dilakukan dengan menggunakan Belsorp-mini II. Gambar 1 menunjukkan skema peralatan percobaan ini.



Keterangan: PG = Pengukur Tekanan
VP = Pompa Vakum
CP = Pompa Sirkulasi
GC = Kromatografi gas

Gambar 1. Skema alat

2.2 Karbonisasi dan Aktivasi Adsorben

Karbon aktif (AC) dibuat dengan metode pirolisis. Kulit jengkol yang sudah dibersihkan ditempatkan dalam wadah untuk dikarbonisasi. Nitrogen ditambahkan ke dalam tungkus selama 5 menit dengan laju aliran 80 ml/menit untuk menghilangkan oksigen dari sistem agar tidak terjadi pembakaran. Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 500°C

dengan laju pemanasan antara 10°C/menit selama 2 jam dengan tetap mengalirkan nitrogen dengan aliran 80 ml/menit. Biochar yang dihasilkan dikeluarkan dari tungku dan dibiarkan dingin hingga suhu kamar. Kemudian diaktivasi dengan berbagai bahan pengaktif (KOH, Urea, dan KOH+urea) sehingga menghasilkan karbon berpori. Sedangkan suhu aktivasi diatur pada 600°C, 700°C, dan 800°C. Pada prosedur aktivasi, KOH, urea, dan KOH +urea dicampur dengan biochar sehingga menghasilkan karbon berpori dengan perbandingan massa 1:2 (massa adsorben: KOH), kemudian diaduk dan dibiarkan semalaman pada suhu 60°C. Sampel kemudian dipirolisis dalam tungku selama satu jam pada berbagai suhu aktivasi 600°C, 700°C, dan 800°C sambil disuplai dengan aliran nitrogen 50 ml/menit. Sampel dikeluarkan dari tungku setelah didinginkan hingga suhu kamar, direndam dalam larutan HCl 15%, kemudian dicuci berulang kali dengan air suling hingga larutan pencuci menjadi netral. Setelah itu dikeringkan selama 24 jam pada suhu 80°C di dalam oven. Sampel karbon aktif kemudian disimpan pada botol kaca.

2.3. Karakterisasi

2.3.1 Adsorpsi Isoterm CO₂

Kapasitas adsorpsi CO₂ (adsorpsi isoterm) sampel diukur menggunakan Belsorp-mini II (BEL Japan, Inc) dengan suhu adsorpsi 298 K dan 353 K. Pengukuran dilakukan pada tekanan 101,3 kPa (1 bar) dengan dua kali pengulangan untuk lebih memastikan hasil pengukuran. Sebelum pengukuran adsorpsi, sampel didegassing pada suhu 150°C selama 18 jam menggunakan Belprep-vac II untuk menghilangkan gas yang tidak diinginkan dari sampel (vakum). Pengukuran berat sampel juga dilakukan sebelum pengukuran menggunakan timbangan digital. Setelah ditimbang sampel dipasang pada alat pengukuran adsorpsi isoterm CO₂. Data yang didapatkan diproses dengan menggunakan microsoft excel sekaligus pembuatan grafik. Penyajian grafik menggunakan data rata-rata dari dua proses pengukuran yang berulang.

2.3.2 Adsorpsi Isoterm N₂

Kapasitas adsorpsi N₂ (isoterm sorpsi) sampel diukur dengan metoda yang sama dengan metoda pengukuran adsorpsi isoterm CO₂. Perbedaan antara proses pengukuran adsorpsi isoterm CO₂ dan N₂, hanya pada gas yang dialirkan pada sampel. Saat pengukuran adsorpsi isoterm CO₂ gas yang dialirkan CO₂, sedangkan saat pengukuran adsorpsi isoterm N₂ gas yang dialirkan juga N₂.

2.3.3 Distribusi Ukuran Pori

Pengukuran distribusi ukuran pori dan luas permukaan spesifik dilakukan karena kapasitas suatu adsorpsi dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori dan luas permukaan spesifik suatu adsorben. Pengukuran

distribusi ukuran pori terlebih dahulu dilakukan analisis adsorpsi-desorpsi gas pada adsorben. Analisis dilakukan dengan menggunakan Belsorp-max II (BEL Japan, Inc., Kanazawa, Japan) at 77 K dan gas yang digunakan yaitu N₂. Pemilihan N₂ dikarenakan gas ini mudah diukur volume yang diserapnya dan gas ini tidak bereaksi dengan bahan adsorben. Sebelum analisis adsorpsi-desorpsi, adsorben arang kulit jengkol terlebih dahulu ditimbang dengan menggunakan timbangan digital. Proses pre-treatment dilakukan pada adsorben dengan menggunakan Belprep-vac II, untuk menghilangkan gas yang tidak diinginkan sehingga analisa dilakukan dalam keadaan vakum. Proses pre-treatment dilakukan selama 18 jam pada temperatur 150°C. Selanjutnya dilakukan analisa adsorpsi desorpsi pada adsorben tersebut. Hasil analisa ini akan menghasilkan grafik yang menunjukkan jumlah gas yang teradsorpsi oleh adsorben pada tekanan relatif tertentu. Data keluaran proses fisisorpsi nitrogen ke dalam pori-pori karbon aktif inilah yang digunakan untuk mengetahui luas permukaan pori, volume adsorpsi optimum dan diameter pori adsorben. Metode BJH (Barret-Joyner-Halenda) merupakan suatu metode yang digunakan untuk mendapatkan distribusi ukuran pori suatu bahan berpori. Metode BJH dengan memanfaatkan transformasi fourier dari adsorpsi isotherm nitrogen pada berbagai tekanan relatif (P/P₀) dengan menggunakan algoritma matematis yang menghubungkan data adsorpsi isotherm dengan distribusi ukuran pori. Dari metode inilah didapatkan data distribusi ukuran pori yang diolah dengan menggunakan microsoft excel sehingga menghasilkan suatu grafik.

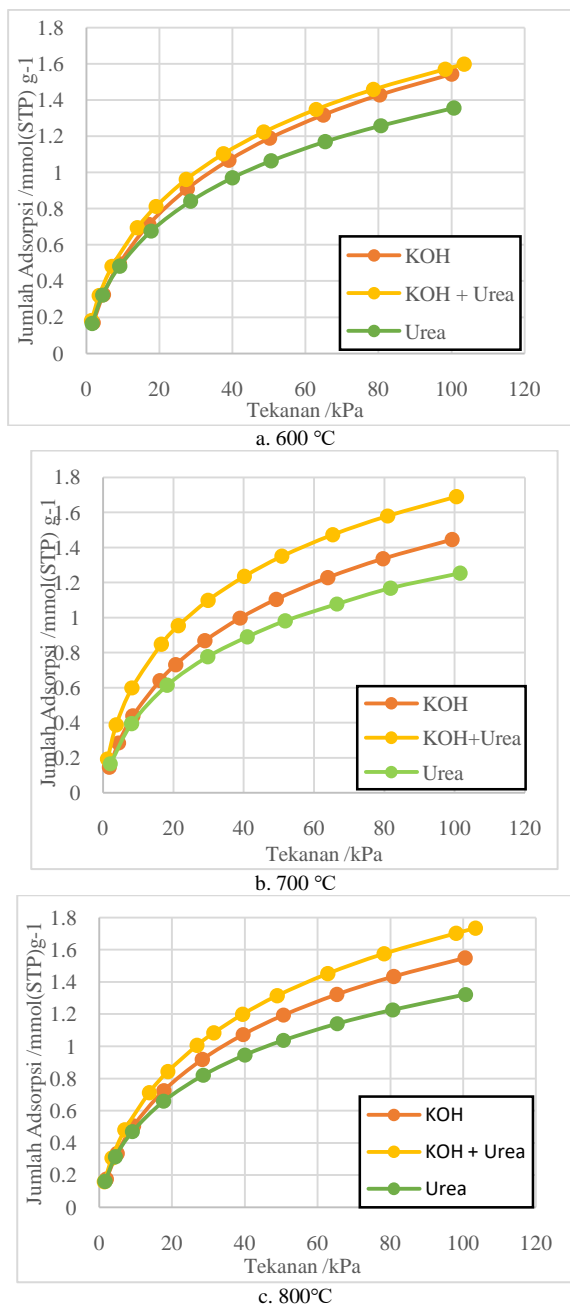
3. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh jenis bahan pengaktif dan suhu aktivasi terhadap adsorpsi isoterm CO₂, serta melihat pengaruh adsorpsi isoterm N₂ yang berpotensi menghalangi proses adsorpsi CO₂ dan hubungan luas permukaan adsorben terhadap adsorpsi isoterm CO₂ arang kulit jengkol sebagai adsorben CO₂ akan dikaji pada pembahasan ini. Pada umumnya, semakin luas permukaan atau semakin besar distribusi ukuran pori karbon aktif maka adsorpsi isoterm CO₂ karbon aktif tersebut akan semakin tinggi. Ukuran pori berhubungan dengan luas permukaan, semakin kecil ukuran pori adsorben dan jumlah pori semakin banyak maka luas permukaan penyerapan CO₂ semakin tinggi [14].

3.1. Adsorpsi Isoterm CO₂

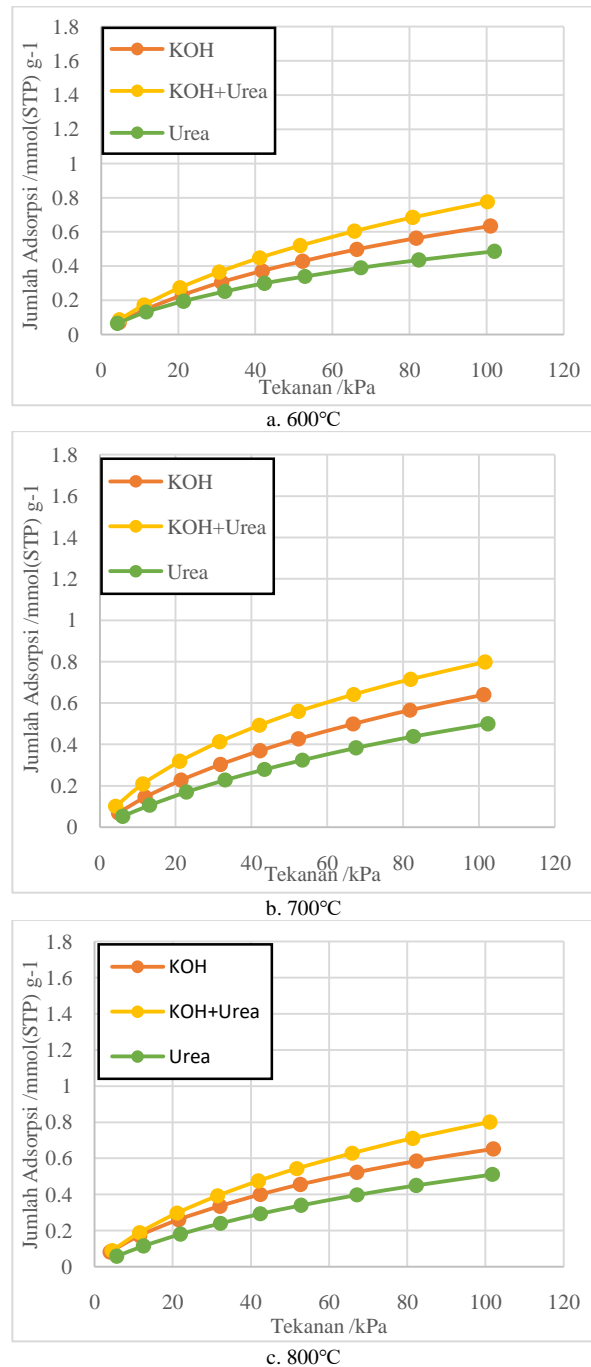
Kapasitas adsorpsi CO₂ ditentukan pada dua suhu yang berbeda yaitu 298 K dan 353 K pada tekanan 101,3 kPa. Adsorpsi isoterm CO₂ eksperimental ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Dapat dilihat bahwa serapan CO₂ pada 298 K lebih baik dibandingkan pada 353K. Hal ini disebabkan sifat

eksoterm dari adsorpsi fisik CO₂ pada adsorben. Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa sampel adsorben yang memiliki luas permukaan dan volume mikropori yang lebih besar akan memiliki kinerja serapan CO₂ yang lebih tinggi juga. Dari Gambar 2 dan Gambar 3 temperatur aktivasi mempengaruhi kemampuan kinerja serapan CO₂, temperatur aktivasi 800°C merupakan variasi temperatur aktivasi dengan kapasitas adsorpsi tertinggi diikuti dengan temperatur aktivasi 700°C dan 600°C. Hal ini terjadi karena material kulit jengkol yang sedikit keras sehingga membutuhkan temperatur yang tinggi untuk sempurna menjadi arang aktif.



Gambar 2. Jumlah adsorpsi CO₂ pada 298 K

Dari segi bahan pengaktif juga mempengaruhi kemampuan kinerja serapan CO₂. Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa sampel adsorben yang memiliki luas permukaan dan volume mikropori yang lebih besar akan memiliki kinerja serapan CO₂ yang lebih tinggi juga. Bahan pengaktif KOH+urea merupakan variasi bahan pengaktif dengan kapasitas adsorpsi tertinggi diikuti bahan pengaktif KOH dan urea.



Gambar 3. Jumlah adsorpsi CO₂ pada 353 K

Pemilihan bahan pengaktif KOH+urea sebagai salah satu variasi bahan pengaktif bertujuan untuk dilakukan N-doping agar kapasitas adsorpsi

meningkat. Secara teori, faktor-faktor yang mempengaruhi penyerapan CO₂, yaitu struktur mikropori dan doping heteroatom, khususnya mikropori ultra (<0,7 nm) dan spesies N, telah dijelaskan dalam beberapa literatur [15]–[17]. Ultra-mikropori menyediakan ruang akomodasi yang cocok untuk molekul CO₂, yang kemudian dibatasi ke ultra-mikropori oleh gaya Van der Waals. N-doping meningkatkan polaritas dan alkalinitas permukaan AC, sehingga menginduksi gaya interaksi kimia yang lemah antara molekul asam CO₂ dan permukaan adsorben [18], [19].

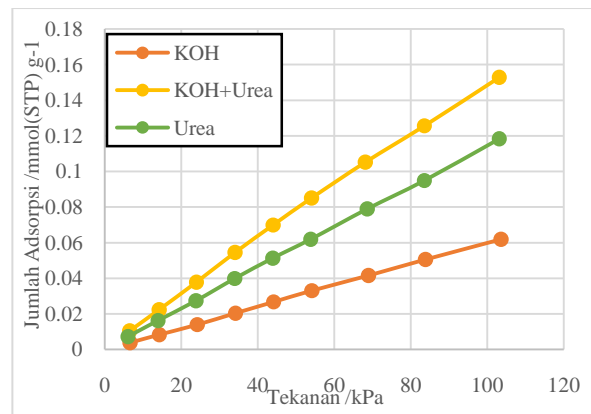
Pada penelitian ini hasil yang didapatkan sudah sesuai dengan yang diharapkan pada N-doping, namun hasil adsorpsi isotherm yang didapatkan masih rendah jika dibandingkan dengan penelitian bahan pengaktif dari biomassa lainnya [15]–[17]. Sehingga dari hasil ini arang aktif kulit jengkol kurang cocok dijadikan sebagai adsorben dalam menyerap CO₂ walaupun keberadaannya cukup melimpah dan menjadi limbah.

Namun pada penelitian ini hasil yang didapatkan kurang sesuai dengan yang diinginkan. Hal ini diduga disebabkan oleh metode N-doping yang kurang efektif (metode pencampuran antara KOH dan urea ternyata kurang efektif dilakukan dan lebih efektif jika di aktivasi terlebih dahulu dengan KOH lalu dengan N-doping) dan kurang efektifnya jenis N-doping yang digunakan juga mempengaruhi proses N-doping (karena urea yang biasa digunakan disini lebih biasa digunakan untuk pupuk). Hal ini dapat menjadi saran untuk penelitian karbon aktif kedepannya, agar hasil yang didapatkan menjadi optimal.

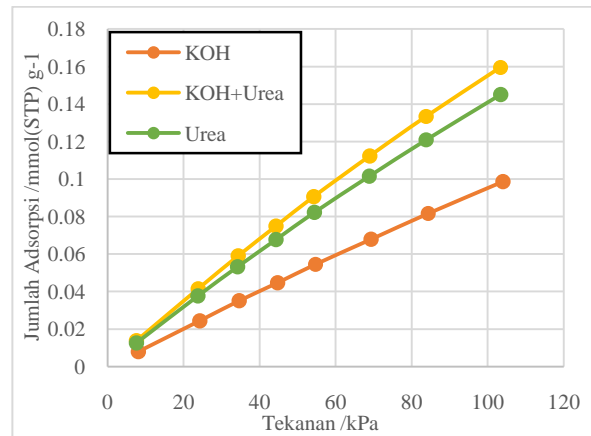
3.2 Adsorpsi Isoterm N₂

Kapasitas adsorpsi N₂ ditentukan pada dua suhu yang berbeda yaitu 298 K dan 353 K pada tekanan 101,3 kPa. Adsorpsi isotherm N₂ eksperimental ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Dapat dilihat bahwa serapan N₂ pada 298 K juga lebih baik dibandingkan pada 353 K, dimana hal ini sama dengan adsorpsi isotherm CO₂. Dari segi pengaruh bahan pengaktif dan suhu aktivasi juga mempengaruhi hasil dan keadaan yang ditampilkan juga hampir sama.

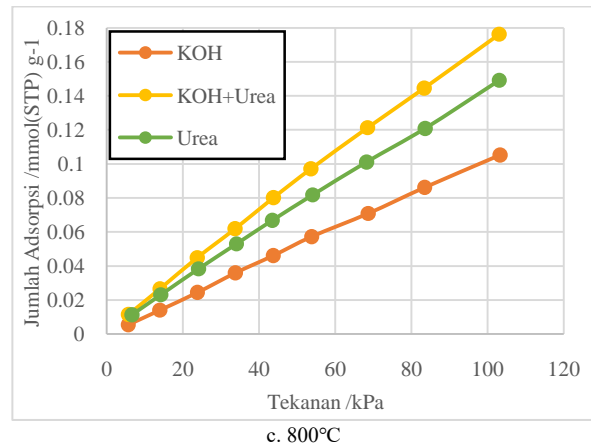
Pengujian adsorpsi isotherm dilakukan untuk melihat pengaruh adanya gas N₂ ketika dilakukan proses adsorpsi CO₂. Dari data yang didapatkan nilai adsorpsi isotherm N₂ jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan adsorpsi isotherm CO₂. Hal ini menggambarkan bahwa keberadaan N₂ tidak akan mempengaruhi proses penyerapan CO₂ jika kedua gas bersamaan dialirkan pada proses penyerapan CO₂. Namun jika gas yang dialirkan CO₂ nya lebih banyak dan N₂ sedikit tentu proses penyerapan CO₂ jauh lebih efektif.



a. 600°C

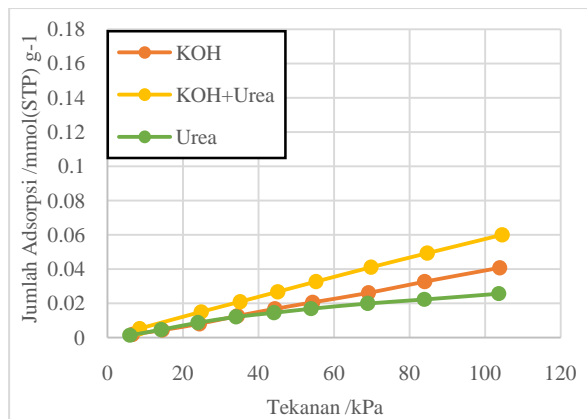


b. 700°C

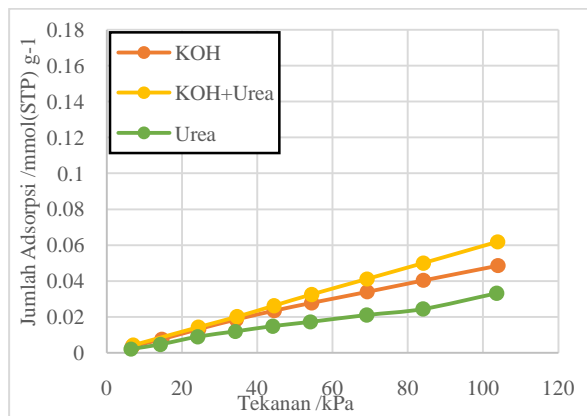


c. 800°C

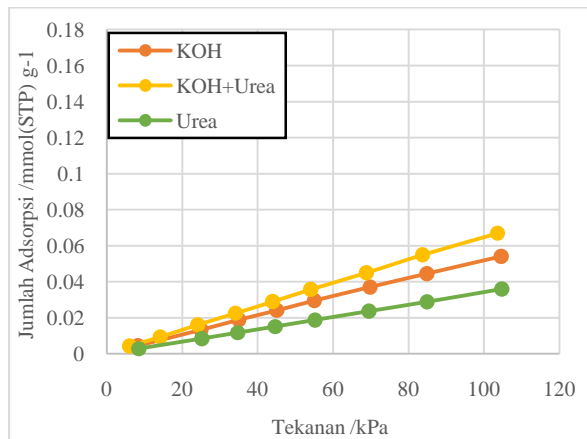
Gambar 4. Jumlah adsorpsi CO₂ pada 298 K



a. 600°C



b. 700°C

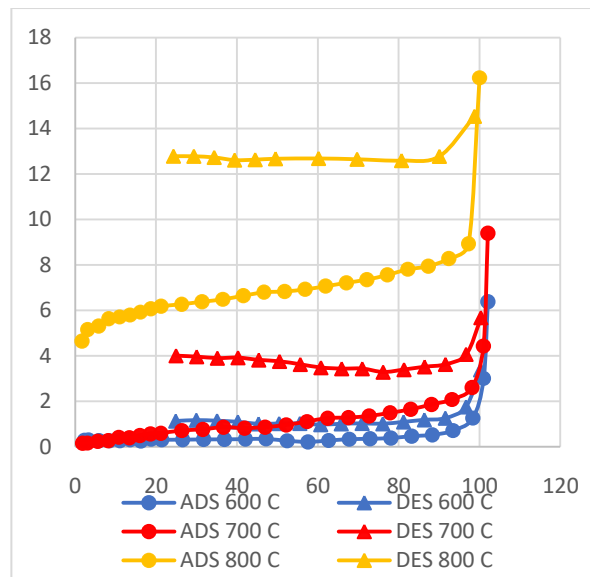


c. 800°C

Gambar 5. Jumlah adsorpsi CO₂ pada 353 K

3.3 Distribusi Ukuran Pori

Secara teori, kapasitas adsorpsi juga dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori dan ukuran luas permukaan spesifik dari sampel adsorben. Pengukuran distribusi dilakukan hanya pada variasi bahan pengaktif KOH, karena pengukuran ini hanya untuk membuktikan apakah luas permukaan pori mempengaruhi kemampuan dalam penyerapan CO₂.



Gambar 6. Adsorpsi desorpsi N₂ dengan bahan pengaktif KOH

Hasil pengukuran luas permukaan pori spesifik dan distribusi ukuran pori berdasarkan hasil pengukuran adsorpsi dan desorpsi N₂ pada Gambar 6. Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan luas permukaan adsorben pada temperatur 800°C lebih besar dibandingkan temperatur lainnya yaitu sebesar 23 m²/g diikuti oleh temperatur 700°C dan 600°C yang masing-masing memiliki luas permukaan sebesar 2,65 m²/g dan 1,2 m²/g. Hasil ini sesuai dengan data yang didapatkan ketika pengukuran adsorpsi isoterm, dimana variasi temperatur 800°C memiliki nilai adsorpsi isoterm yang lebih baik diikuti temperatur 700°C dan 600°C. Sehingga disimpulkan bahwa luas permukaan pori spesifik mempengaruhi kemampuannya dalam menyerap CO₂, semakin besar luas permukaan spesifik maka adsorben tersebut juga akan lebih banyak dalam menyerap CO₂.

Namun, pada pengukuran ini data yang didapatkan hanya luas permukaan pori, sedangkan data volume pori dan grafik distribusi pori tidak terdeteksi oleh alat Belsorp-Max II. Hal ini terjadi karena terlalu kecilnya ukuran pori dari adsorben arang kulit jengkol tersebut. Sehingga alat tidak bisa melakukan pengukuran dengan metode BJH. Hal ini juga menggambarkan bahwa arang kulit jengkol tidak cocok dijadikan sebagai adsorben dalam menyerap CO₂.

4. Kesimpulan

Karbon aktif disiapkan dengan menggunakan metode pirolisis di bawah temperatur aktivasi dan bahan pengaktif yang berbeda menggunakan kulit jengkol sebagai bahan baku. Kondisi optimum pembuatan karbon aktif kulit jengkol ditentukan pada suhu aktivasi 800°C dengan bahan pengaktif KOH+urea. Luas permukaan spesifik yang disiapkan pada kondisi optimum adalah 23 m²/g, sedangkan data volume pori dan grafik distribusi ukuran pori tidak dapat diukur karena memiliki luas permukaan yang sangat kecil

sehingga tidak terdeteksi oleh alat ukur. Keadaan ini berbanding lurus juga dengan kapasitas adsorpsi CO₂ pengukuran. Semakin tinggi kapasitas adsorpsi, luas permukaan spesifik juga semakin tinggi. N₂ tidak memiliki kapasitas penyerapan yang tinggi, sehingga keberadaan N₂ ketika pengukuran adsorpsi CO₂ tidak akan terlalu mempengaruhi. Terlalu kecilnya ukuran pori dan kemampuan penyerapan CO₂ menyatakan bahwa arang aktif kulit jengkol tidak cocok dijadikan sebagai adsorben CO₂.

Ucapan Terimakasih

Kami mengucapkan terimakasih kepada Departemen Teknik Mesin Universitas Andalas yang telah memberikan sebagian dukungan finansial terhadap penelitian ini.

Daftar Rujukan

- [1] A. A. Azmi and M. A. A. Aziz, Mesoporous adsorbent for CO₂ capture application under mild condition: A review, *J Environ Chem Eng*, vol. 7, no. 2, p. 103022, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103022.
- [2] F. F. Zaemi and R. C. Rohmana, Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) untuk Pembangunan Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan di Industri Migas Indonesia, 2021.
- [3] P. D. Dissanayake, S. You, A. D. Igalavithana, and Y. Xia, Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, no. 119, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109582.
- [4] W. Hao, E. Björkman, M. Lilliestråle, and N. Hedin, Activated carbons prepared from hydrothermally carbonized waste biomass used as adsorbents for CO₂, *Appl Energy*, vol. 112, pp. 526–532, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.028.
- [5] X. Zhang, Y. Huang, H. Gao, X. Luo, Z. Liang, and P. Tontiwachwuthikul, Zeolite catalyst-aided tri-solvent blend amine regeneration: An alternative pathway to reduce the energy consumption in amine-based CO₂ capture process, *Appl Energy*, vol. 240, pp. 827–841, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.089.
- [6] M. Mohamedali, D. Nath, H. Ibrahim, and A. Henni, Review of Recent Developments in CO₂ Capture Using Solid Materials: Metal Organic Frameworks (MOFs), *Greenhouse Gases*, pp. 115–154, Mar. 2016, doi: 10.5772/62275.
- [7] Z. H. Lee, K. T. Lee, S. Bhatia, and A. R. Mohamed, Post-combustion carbon dioxide capture: Evolution towards utilization of nanomaterials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2599–2609, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.077.
- [8] B. Petrovic, M. Gorbounov, and S. Masoudi Soltani, Influence of surface modification on selective CO₂ adsorption: A technical review on mechanisms and methods, *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 312, p. 110751, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.micromeso.2020.110751.
- [9] C. H. Yu, C. H. Huang, and C. S. Tan, A review of CO₂ capture by absorption and adsorption, *Aerosol Air Qual Res*, vol. 12, no. 5, pp. 745–769, Oct. 2012, doi: 10.4209/aaqr.2012.05.0132.
- [10] H. Fauza, I. Ferita, and N. E. Putri, Studi awal penampilan fenotipik plasma nutfah jengkol (*Pithecollobium jiringa*) di Padang, Sumatera Barat, in *Pros Semnas Masy Biodiv Indon*, Padang: Masyarakat Biodiversitas Indonesia, Mar. 2015. doi: 10.13057/psnmbi/m010104.
- [11] S. Pandia and B. Warman, Pemanfaatan Kulit Jengkol Sebagai Adsorben Dalam Penyerapan Logam Cd (II) Pada Limbah Cair Industri Pelapisan Logam, *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 5, no. 4, p. 57, 2016.
- [12] D. Bednarska and M. Koniorczyk, Comparison of various methods applied in porous materials microstructure analysis in regard to hardened cement paste, *MATEC Web of Conferences*, vol. 282, no. 02043, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201928.
- [13] G. Yin, Q. Liu, Z. Liu, and W. Wu, Extension of Kelvin equation to CO₂ adsorption in activated carbon, *Fuel Processing Technology*, vol. 174, pp. 118–122, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.fuproc.2018.02.006.
- [14] R. A. Rasyid, Erdawati, and D. Darwis, Pengaruh Penambahan Biokar Sekam Padi Terhadap Penyerapan Gas CO₂ (Carbon Dioxide) Dan Kuat Tekan Pada Plester Dinding, *JRSKT - Jurnal Riset Sains dan Kimia Terapan*, vol. 8, no. 1, pp. 10–22, Oct. 2019, doi: 10.21009/jrskt.081.02.
- [15] A. Gao, N. Gao, M. Yan, M. Li, and F. Wang, Hierarchical porous carbon activated by CaCO₃ from pigskin collagen for CO₂ and H₂ adsorption, *Micropor. Mat*, vol. 260, pp. 172–179, 2018.
- [16] H. Wei, S. Deng, B. Hu, and Z. Chen, Granular Bamboo-Derived Activated Carbon for High CO₂ Adsorption, *The Dominant Role of Narrow Micropores*, *ChemSusChem*, vol. 5, no. 12, pp. 2354–2360, 2012, doi: 10.1002/cssc.201200570.
- [17] P. Zhang *et al.*, A new choice of polymer precursor for solvent-free method: Preparation of N-enriched porous carbons for highly selective CO₂ capture, *Chemical Engineering Journal*, vol. 355, pp. 963–973, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.08.219.
- [18] A. Rehman and S. J. Park, Tunable nitrogen-doped microporous carbons: Delineating the role of optimum pore size for enhanced CO₂ adsorption, *Chemical Engineering Journal*, vol. 362, pp. 731–742, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.01.063.
- [19] X. Suo, L. Xia, Q. Yang, and Z. Zhang, Synthesis of anion-functionalized mesoporous poly (ionic liquid)s via a microphase separation-hypercrosslinking strategy: highly efficient adsorbents for bioactive molecules, *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 27, pp. 14114–14123, 2017, doi: 10.1039/C7TA01986F.