

Biogas memiliki komposisi utama berupa 50 – 70% CH<sub>4</sub> dan 30 – 49% CO<sub>2</sub>. Keberadaan CO<sub>2</sub> mengakibatkan nilai kalor dari biogas menjadi rendah. Nilai kalor yang rendah akan mengakibatkan efisiensi pembakaran bahan bakar menjadi kurang baik. Oleh karena itu perlu dilakukan pemisahan CO<sub>2</sub> dari kandungan biogas. Biogas yang dimurnikan akan menjadi biometana berkualitas tinggi dan dapat digunakan untuk berbagai penggunaan yang lebih luas. Dari beberapa metode pemisahan gas yang ada, pada penelitian ini akan dilakukan proses pemisahan dengan berbasis adsorpsi. Material yang akan digunakan untuk proses pemisahan adalah material berbasis karbon, atau yang disebut dengan *Carbon Molecular Sieve* (CMS). Salah satu biomassa di Indonesia yang berpotensi dikembangkan menjadi CMS adalah cangkang kelapa sawit (CKS). Namun dikarenakan karbon dari cangkang kelapa sawit belum memberikan hasil pemisahan yang cukup baik, sehingga perlu dilakukan modifikasi lebih lanjut. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh *pre-treatment* serta modifikasi dengan impregnasi oksida logam terhadap karakteristik permukaan karbon, persebaran dispersi logam serta terhadap *sieving effect* pada pemisahan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mendapatkan model matematis yang dapat menggambarkan peristiwa pemisahan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dengan CMS yang dikembangkan.

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap diantaranya pada tahap pertama dilakukan *pre-treatment* pada karbon cangkang kelapa sawit (CMS-CKS). *Pre-treatment* berupa oksidasi menggunakan larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ozonasi basah dengan aquadest serta larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Pre-treatment* dilakukan untuk menambah gugus fungsional oksigen pada permukaan CMS yang bertujuan untuk menurunkan sifat hidrofobitasnya sehingga diharapkan dapat meningkatkan persebaran oksida logam. Tahap kedua dilakukan impregnasi menggunakan oksida logam (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, Ca) yang bertujuan untuk meningkatkan afinitas dari CO<sub>2</sub>. Selanjutnya dilakukan karakterisasi fisika dan kimia dari material CMS menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA), *X-Ray Diffraction analysis* (XRD), Analisis adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub>, *SEM-EDX mapping analysis*, dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) *analysis*. Tahap selanjutnya adalah karakterisasi afinitas dan kinetika dari CMS yang dihasilkan. Karakterisasi afinitas dilakukan dengan uji kesetimbangan adsorpsi pada tekanan atmosferis dan tekanan tinggi pada suhu 30°C. Karakterisasi kinetika dari CMS dilakukan pada suhu dan tekanan atmosferis yang ditunjukkan dengan kurva *breakthrough* dari campuran gas CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>.

Hasil karakterisasi CMS menunjukkan bahwa *pre-treatment* dengan oksidasi menggunakan larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ozonasi basah dengan aquadest dan ozonasi basah dengan larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mampu meningkatkan gugus fungsional oksigen dari CMS-CKS mula-mula. Penambahan gugus oksigen tertinggi dihasilkan dari proses ozonasi basah dengan aquadest. Ketiga proses *pre-treatment* tersebut juga mampu meningkatkan dispersi logam pada permukaan CMS. Sedangkan modifikasi CMS dengan impregnasi dengan oksida logam mampu meningkatkan *sieving effect* pada pemisahan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> sebesar 38 – 148 % dibandingkan dengan CMS-CKS mula-mula. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan rasio difusivitas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dari 8,6 menjadi 11,9 – 21,5. Hasil pemisahan terbaik ditunjukkan oleh CMS dengan ozonasi/aquadest yang terimpregnasi oksida besi dengan rasio difusivitas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> sebesar 21,5. Model matematis yang diajukan mampu menggambarkan peristiwa pemisahan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dengan CMS yang dikembangkan.

**Kata Kunci:** adsorpsi, *carbon molecular sieve*, cangkang kelapa sawit, impregnasi oksida logam, pemisahan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>

## ABSTRACT

*Biogas primarily consists of 50 - 70% methane (CH<sub>4</sub>) and 30 - 49% carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). CO<sub>2</sub> reduces the calorific value of biogas. A low calorific value will lead to a decrease in fuel combustion efficiency. Hence, it is imperative to extract CO<sub>2</sub> from the biogas composition. After undergoing purification, biogas will be transformed into biomethane of exceptional quality, which can be utilized for a broader array of applications. This research will implement an adsorption-based separation process from a variety of existing gas separation methods. This research will implement an adsorption-based separation process from a variety of existing gas separation methods. The chosen substance for the separation process is a carbon-based material known as Carbon Molecular Sieve (CMS). Oil palm shells (CKS) are a type of biomass in Indonesia that has the potential to be utilized as a source of CMS. However, due to the inadequate separation results obtained from carbon derived from oil palm shells, it is necessary to make additional modifications. Hence, the aim of this study is to investigate the impact of pre-treatment and modification using metal oxide impregnation on the surface properties of carbon, the distribution of metal dispersion, and the sieving effect for separating of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>. Furthermore, this research endeavors to acquire a mathematical model capable of describing the process of separating CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> using the developed CMS.*

*The research was carried out in multiple stages, with the initial stage involving pre-treatment of palm kernel shell carbon (CMS-CKS). Prior to treatment, oxidation is conducted using of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution, followed by wet ozonation using distilled water and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution. Pre-treatment is conducted to introduce oxygen functional groups onto the surface of CMS in order to decrease its hydrophobic nature, thereby enhancing the dispersion of metal oxides. The second step involves impregnation with metal oxides (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, Ca) to enhance the affinity of CO<sub>2</sub>. Furthermore, the CMS material was characterized to Thermogravimetric Analysis (TGA), X-Ray Diffraction analysis (XRD), N<sub>2</sub> adsorption-desorption analysis, SEM-EDX mapping analysis, and Fourier Transform Infrared (FTIR) analysis to determine its physical and chemical properties. Subsequently, it is necessary to assess the affinity and kinetics of the CMS produced. The affinity characterization was conducted through an adsorption equilibrium test, both at atmospheric pressure and high pressure, with a temperature of 30°C. The kinetic analysis of CMS was conducted under room conditions, as evidenced by the breakthrough curve of the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> gas mixture.*

*The CMS characterization indicated that pre-treatment with oxidation using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution, wet ozonation with distilled water, and wet ozonation with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution effectively enhanced the oxygen functional groups of the initial CMS-CKS. The wet ozonation process with distilled water yielded the greatest increase in oxygen groups. The three pre-treatment processes also enhanced the metal dispersion on the CMS surface. By impregnating metal oxides into the CMS, the sieving effect for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation was enhanced by 38 - 148% compared to the pristine CMS-CKS. The increase in the CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> diffusivity ratio is demonstrated by the values ranging from 8.6 to 11.9 - 21.5. CMS demonstrated the most effective separation outcome using ozonated/aquadest impregnated iron oxide, with a CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> diffusivity ratio of 21.5. The proposed mathematical model accurately characterizes the process of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation using the developed CMS.*

**Keywords:** adsorption, carbon molecular sieve, palm kernel shell, metal oxide impregnation, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation