



MODIFIKASI PERALATAN PEMBAKARAN BATUBARA PERINGKAT RENDAH UNTUK KARAKTERISASI EMISI GAS METANA

MODIFICATION OF LOW RATING COAL COMBUSTION EQUIPMENT FOR CHARACTERIZATION OF METANE GAS EMISSIONS

M. Yusuf¹, Bochori², A. Al Hadi³

¹⁻³Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

¹⁻³Jl. Raya Palembang Prabumulih KM.32 Indralaya, Sumatera Selatan, Indonesia

e-mail: *1maulanayusuf@ft.unsri.ac.id, 2bochori@ft.unsri.ac.id, 3alekahladi@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK

Potensi batubara Provinsi Sumatera Selatan hampir 80% didominasi oleh batubara peringkat rendah berupa lignit dan sub-bituminus. Pemanfaatan batubara peringkat rendah harus mempertimbangkan lingkungan terutama polusi udara oleh gas rumah kaca yang terdiri dari gas CO₂ dan CH₄ yang sangat berpengaruh terhadap pemanasan global. Gas CH₄ merupakan gas yang sangat potensial penyebab terjadinya pemanasan global karena dampaknya 80 kali lebih kuat dari gas CO₂. Penelitian ini bertujuan mengembangkan peralatan sederhana pembakaran batubara peringkat rendah dengan cara memodifikasi model yang sudah ada untuk menganalisis emisi gas CH₄ skala laboratorium. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi modifikasi model *coal fixed-bed combustion*, proses pembakaran, pengambilan data, pengujian statistik, analisis data emisi gas CH₄ yang berkaitan dengan temperatur dan waktu pembakaran untuk batubara sub-bituminus dengan perbedaan nilai kalori BA-59 dan BA-63. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peralatan pembakaran batubara yang dirancang dan dibangun dengan memodifikasi model *coal fixed-bed combustion* dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik emisi gas CH₄; pembentukan emisi gas CH₄ akan lebih tinggi pada batubara BA-59 dibandingkan dengan batubara BA-63 masing-masing sebesar 4,8 ppm dan 1,3 ppm; temperatur pembakaran pada batubara kalori lebih rendah akan lebih rendah dibandingkan pada batubara kalori lebih tinggi masing-masing 31°C dan 40°C; dan waktu inkubasi pembentukan emisi gas CH₄ terjadi lebih cepat pada batubara kalori lebih rendah masing-masing 7 menit dan 10 menit sedangkan lama pembakaran batubara batubara kalori yang lebih rendah akan lebih lama dibandingkan batubara kalori yang lebih tinggi masing-masing 72 menit dan 53 menit.

Kata kunci: batubara peringkat rendah, gas rumah kaca, *coal fixed-bed combustion*, inkubasi

ABSTRACT

Nearly 80% of South Sumatra Province's coal potential is dominated by low rank coal in the form of lignite and sub-bituminous. The use of low rank coal must consider the environment, especially air pollution by greenhouse gases consisting of CO₂ and CH₄ gases which are very influential on global warming. CH₄ gas is a gas that has the potential to cause global warming because its impact is 80 times stronger than CO₂ gas. This study aims to develop a simple equipment for burning low rank coal by modifying existing models to analyze CH₄ gas emissions on a laboratory scale. The method used in this research includes modification of the coal fixed-bed combustion model, combustion process, data collection, statistical testing, analysis of CH₄ gas emission data related to temperature and burning time for sub-bituminous coal with differences in the calorific value of BA-59 and BA-63. The results showed that the coal burning equipment designed and built by modifying the coal fixed-bed combustion model can be used to analyze the emission characteristics of CH₄ gas; the formation of CH₄ gas emissions will be higher in BA-59 coal compared to BA-63 coal by 4.8 ppm and 1.3 ppm respectively; the combustion temperature of lower calorie coal will be lower than that of higher calorie coal, respectively 31°C and 40°C; and the incubation time for the formation of CH₄ gas emissions occurs faster in lower calorie coal, respectively 7 minutes and 10 minutes, while the burning time of coal for lower calorie coal will be longer than higher calorie coal, respectively 72 minutes and 53 minutes.

Keywords : low rank coal, green house gases, *coal fixed-bed combustion*, incubation

PENDAHULUAN

Sumberdaya alam terutama batubara merupakan salah satu komoditi yang masih menjadi andalan untuk mendorong pertumbuhan ekonomi dalam mendukung pembangunan di Indonesia [1]. Batubara sebagai sumberdaya energi yang tidak dapat diperbaharui (*non renewable resources*) masih sangat menjanjikan di masa yang akan datang dan harus dimanfaatkan secara optimal dan berkelanjutan dengan memperhatikan dampak lingkungan yang ditimbulkannya [2,3,4]. Permintaan batubara yang semakin meningkat baik sebagai bahan bakar industri maupun pembangkit listrik akan memberikan peluang yang besar bagi para pengusaha untuk melakukan kegiatan usaha pertambangan [5,6].

Potensi batubara peringkat rendah di Sumatera Selatan mencapai 25% dari total Cadangan Nasional memberikan peluang besar berkembangnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Mulut Tambang. Potensi batubara Provinsi Sumatera Selatan yang sangat besar tersebut hampir 80% didominasi oleh batubara peringkat rendah (*low rank coal*) berupa lignit dan sub-bituminus [7]. Pemanfaatan batubara peringkat rendah sebagai sumber energi harus mempertimbangkan lingkungan terutama polusi udara oleh gas rumah kaca [8,9].

Pemanfaatan batubara peringkat rendah sebagai bahan bakar untuk kegiatan industri dan PLTU disamping sangat menguntungkan karena harganya murah dan sesuai dengan *setting boiler* yang digunakan juga memberikan dampak lingkungan yang signifikan [10,11,12]. Gas yang ditimbulkan pada pembakaran batubara peringkat rendah berupa gas rumah kaca yang terdiri dari gas CO₂ dan CH₄ yang sangat berpengaruh terhadap pemanasan global (*global warming*). Gas CH₄ merupakan gas yang sangat potensial penyebab terjadinya pemanasan global karena dampaknya 80 kali lebih kuat dari gas CO₂ [13]. Batubara peringkat rendah yang digunakan sebagai bahan bakar sering disebut bahan bakar polutif [14]. Batubara peringkat rendah mempunyai sifat fisika dan kimia sangat tinggi, seperti: kadar air, kadar abu, dan zat terbang jika dibakar akan terjadi pembakaran tidak sempurna yang membentuk gas CH₄ dan CO₂ secara intensif [15,16].

Teknologi pembakaran batubara sangat ditentukan oleh peringkat batubara, nilai kalori, dan peralatan yang digunakan [17]. Sistem pembakaran batubara peringkat rendah dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu: (1) *coal fixed-bed combustion*, (2) *coal particle suspension combustion*, dan (3) *coal fluidized-bed combustion*. Pengembangan teknologi *coal fixed-bed combustion* dipertimbangkan karena dapat diaplikasikan dalam skala laboratorium, murah, dan dapat mengukur emisi gas CH₄. Emisi gas CH₄ tidak dapat diukur secara langsung di udara karena berat jenisnya lebih ringan dari berat jenis udara sehingga diperlukan teknologi peralatan pembakaran batubara [18].

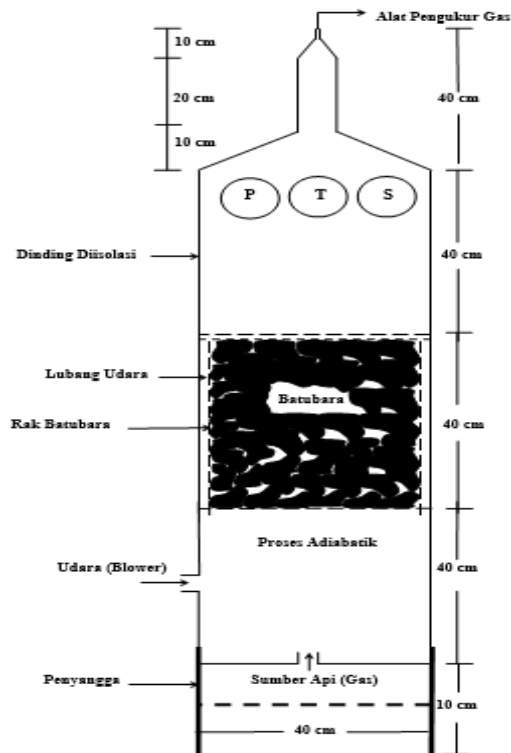
Pembakaran menggunakan *coal fixed-bed combustion* merupakan teknologi awal dikembangkannya model pembakaran batubara peringkat rendah [19]. Batubara peringkat rendah diletakkan pada keranjang di dalam ruang dengan keranjang tetap. Peralatan tersebut mempunyai lubang udara dan ruang pembakaran batubara. Batubara peringkat rendah yang digunakan adalah sub-bituminus dengan ukuran butir 1-5 cm yang diletakkan pada tengah peralatan (*chamber*). Sistem pembakaran batubara peringkat rendah menggunakan sumber api di bawah dan sumber api di atas *chamber*. Sumber api di bawah *chamber*, gas yang terjadi dikeluarkan dari atas dan abu dikeluarkan dari bawah. Temperatur pembakaran dapat terjadi pada suhu rendah. Penelitian ini menggunakan variabel bebas berupa temperatur pembakaran dalam °C dan waktu pembakaran dalam detik sedangkan variabel terikat berupa emisi gas CH₄ sebagai dalam ppm. Data hasil pengukuran akan dapat menganalisis karakteristik emisi gas CH₄ pada batubara peringkat rendah.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan peralatan sederhana pembakaran batubara peringkat rendah dengan cara memodifikasi model yang sudah ada untuk menganalisis emisi gas CH₄ skala laboratorium. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tahapan perancangan dan pembangunan model peralatan, proses pembakaran batubara peringkat rendah, pengambilan data, pengujian statistik, analisis data emisi gas CH₄ yang berkaitan dengan temperatur dan waktu pembakaran. Perancangan dan pembangunan peralatan pembakaran batubara menggunakan teknologi *coal fixed-bed combustion* [20,21].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian skala laboratorium yang digunakan meliputi tahapan sebagai berikut: perancangan dan pembangunan modifikasi model peralatan, proses pembakaran, pengambilan dan pengujian statistik data, dan analisis data emisi gas CH₄ batubara peringkat rendah.

Perancangan dan pembangunan model peralatan pembakaran batubara memodifikasi model *coal fixed-bed combustion* yang telah dikembangkan oleh para ahli terdahulu [22]. Modifikasi yang dilakukan dimaksudkan agar peralatan pembakaran batubara peringkat rendah tersebut dapat dirancang dan dibangun berdasarkan prinsip yang dapat dipertanggungjawabkan, biaya murah, dapat diaplikasikan dalam skala laboratorium. Skematik peralatan pembakaran batubara model *coal fixed-bed combustion* yang dimodifikasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Gambar 1 memperlihatkan modifikasi peralatan pembakar batubara peringkat rendah yang digunakan untuk mengukur emisi gas CH₄ yang terbuat dari stainless steel.



Gambar 1. Rancangan modifikasi model pembakaran batubara *coal fixed-bed combustion*

Pertimbangan *stainless steel* dengan tebal 6 mm sebagai bahan untuk pembakaran batubara peringkat rendah dan pengukur emisi gas CH_4 adalah bahwa bahan tersebut tahan panas, tahan karat, dan mudah dicari di pasaran [23]. Peralatan pembakaran batubara peringkat rendah dan pengukur gas CH_4 yang dimodifikasi dimaksudkan untuk pengambilan data langsung yang sangat berhubungan dengan temperatur (T) dan waktu (t) pembakaran batubara peringkat rendah [24,25].

Peralatan pembakaran batubara peringkat rendah dan pengukur emisi gas CH_4 dibagi menjadi tiga bagian, yaitu: bagian bawah sirkulasi oksigen, sumber api dan abu batubara, bagian tengah tempat keranjang batubara, dan bagian atas adalah ruang kosong untuk mengumpulkan dan mengukur emisi gas [26]. Emisi gas CH_4 yang terperangkap dari pembakaran batubara akan keluar permukaan melalui lubang kecil ukuran diameter 5 mm karena adanya perbedaan tekanan dalam perangkat gas tersebut. Emisi gas CH_4 dapat diukur menggunakan *multigas detector* pada T dan t tertentu berupa konsentrasi gas CH_4 dalam % LEL (*low explosive limit*) dan dikonversi menjadi ppm atau satuan gas lainnya [27].

Peralatan lain yang digunakan adalah alat pengukur temperatur (*thermocouple*) dan waktu pembakaran (*stopwatch*). Peralatan tersebut sangat penting digunakan dalam rangka untuk melihat hubungan antara emisi gas CH_4 terhadap T dan t. Proses pembakaran batubara

peringkat rendah menggunakan modifikasi peralatan yang telah dirancang seperti Gambar 1. Gambar 2 merupakan peralatan yang digunakan untuk pembakaran batubara peringkat rendah dalam rangka menganalisis karakteristik emisi gas CH_4 .



Gambar 2. Peralatan pembakaran batubara yang dimodifikasi

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah batubara peringkat rendah berupa sub-bituminus dengan nilai kalori 5.900 kkal/kg dan 6.300 kkal/kg (adb) dengan ukuran 1-5 mm [28]. Sampel tersebut juga dilakukan uji proksimat, ultimat, dan nilai kalor dalam rangka mengetahui sifat fisika dan kimianya.

Peralatan pembakaran batubara dan pengukur emisi gas CH_4 berbentuk kubus dengan ukuran setiap ruang masing-masing 50 cm x 50 cm x 50 cm dan bagian paling atas berupa lubang kecil untuk pengeluaran dan pengukuran gas. Penentuan ukuran tersebut untuk memudahkan pengontrolan pengukuran emisi gas CH_4 .

Peralatan pembakar batubara dan pengukur emisi gas CH_4 mempertimbangkan konduksi (*conduction*) panas di mana dalam pembakaran batubara tidak ada panas yang keluar maupun panas yang masuk atau proses semi adiabatik [29]. Konduksi adalah proses perpindahan panas dari temperatur tinggi ke temperatur rendah melalui media yang tetap. Pertimbangan tersebut sesuai dengan fenomena pembakaran batubara dimana tidak ada panas yang diserap maupun yang keluar.

Sampel batubara diambil di PT Bukit Asam Unit Dermaga Kertapati Palembang dan uji skala laboratorium dilaksanakan di Prodi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Jenis data yang diperlukan berupa batubara peringkat rendah sub-bituminus dengan nilai kalori 5.900 kkal/kg dan 6.300 kkal/kg, uji proksimat, ultimat, dan nilai kalori. Sedangkan data emisi gas CH₄, temperatur, dan waktu pembakaran dilakukan pengujian di laboratorium Prodi Teknik Pertambangan.

Data primer tersebut masuk ke dalam data rasio karena memiliki sifat data nominal, ordinal, dan interval yang memiliki nilai dimulai dari titik nol mutlak. Teknik pengambilan sampel dilakukan dengan mengambil sampel batubara secara acak (*random sampling*) yang terdapat pada *stockpile* batubara di Unit Dermaga Kertapati Palembang untuk masing-masing batubara peringkat rendah dengan nilai kalori 5.900 kkal/kg dan 6.300 kkal/kg. Pengambilan sampel batubara tersebut diambil sebanyak lima (5) kali sehingga berat sampel yang diperoleh mencapai 50 kg.

Sampel batubara yang sudah dipilih masing-masing sebanyak 50 kg dibagi empat bagian (*quartering*) dan selanjutnya digabung menjadi dua bagian untuk pembakaran batubara dan untuk uji proksimat, ultimat, dan nilai kalori. Pengambilan sampel emisi gas CH₄ pada pembakaran batubara dilakukan untuk melihat besarnya konsentrasi emisi gas tersebut langsung pada proses pembakaran batubara. Pembakaran batubara dilakukan dalam rangka mempelajari karakteristik emisi gas CH₄. Prosedur pengambilan sampel pembakaran batubara dilakukan sebagai berikut:

- Menyiapkan batubara ukuran rata-rata 1-5 mm yang sudah dilakukan *quartering* sebanyak 25 kg untuk masing-masing batubara kalori 5.900 kkal/kg (BA-59) dan kalori 6.300 kkal/kg (BA-63);
- Menyiapkan peralatan pembakar batubara dan pengukur emisi gas CH₄;
- Timbang batubara sesuai dengan keranjang yang telah disiapkan dengan volume 8.192 cm³ dan catat beratnya dalam kg;
- Masukkan batubara yang ada dalam keranjang tersebut ke dalam peralatan pembakar batubara dan pengukur emisi gas CH₄;
- Catat kondisi awal dalam peralatan pembakar batubara dan pengukur emisi gas CH₄ terutama temperatur dalam (T₀), temperatur luar (T₁), dan kecepatan pembakaran (v);
- Nyalakan kompor gas untuk membakar batubara dan bersamaan dengan itu nyalakan peralatan ukur temperatur (*thermocouple*), waktu (*stopwatch*), *multigas detector*, dan cacat emisi gas CH₄ pada temperatur (T) dan waktu (t) setiap 1 menit;
- Hentikan pengukuran jika kondisi oksigen sudah kembali menuju kondisi awal dimana oksigen mendekati 20,8 °C dan emisi gas CH₄ menjadi nol;

- Lakukan pengukuran untuk batubara kalori 5.900 kkal/kg (BA-59) dan nilai kalori 6.300 kkal/kg (BA-63).

Pengambilan sampel emisi gas CH₄, uji proksimat, uji ultimat, dan nilai kalori dilakukan untuk mempelajari karakteristik sampel batubara untuk masing-masing kalori 5.900 kkal/kg (BA-59) dan kalori 6.300 kkal/kg (BA-63). Prosedur pengambilan sampel tersebut dilakukan sebagai berikut: sampel yang telah dibagi dua dari *quartering* sebanyak 25 kg dibawa ke laboratorium yang terdapat di PT Bukit Asam (Persero), Tbk Tanjung Enim yang sudah terakreditasi untuk dilakukan analisis proksimat, ultimat, dan nilai kalori. Tahapan kegiatan dan prosedur yang digunakan mengikuti aturan yang telah baku terutama aturan SNI.

Pengolahan dan analisis data emisi gas CH₄ menggunakan tabulasi dan grafik yang diolah menggunakan uji statistika. Pengolahan data dilakukan dalam rangka uji normalitas untuk melihat apakah data tersebut dapat digunakan untuk proses analisis emisi gas CH₄. Metode analisis dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu metode analisis emisi gas CH₄ rata-rata dan kumulatif (statistika deskriptif) serta metode analisis emisi gas CH₄ berdasarkan korelasi dan regresi (statistika inferensial). Analisis emisi gas CH₄ rata-rata dan kumulatif digunakan untuk melihat gambaran besarnya emisi gas tersebut pada berbagai batubara peringkat rendah dengan nilai kalori 5.900 kkal/kg (BA-59) dan kalori 6.300 kkal/kg (BA-63). Analisis korelasi dan regresi digunakan untuk melihat hubungan antara emisi gas CH₄ terhadap T dan t pada batubara kalori 5.900 kkal/kg (BA-59) dan kalori 6.300 kkal/kg (BA-63).

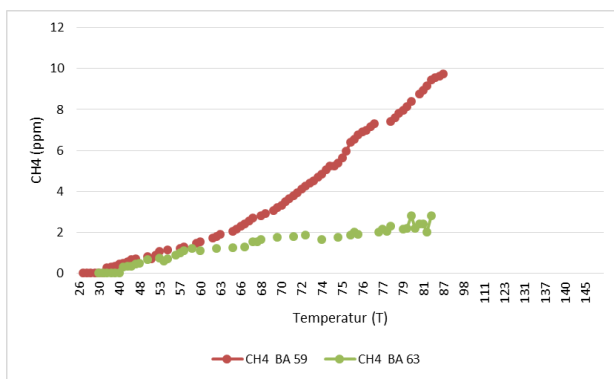
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh temperatur pembakaran (T) terhadap emisi gas CH₄

Pembentukan emisi gas CH₄ terjadi mulai dari temperatur yang rendah pada masa inkubasi sampai temperatur maksimum dimana emisi gas yang terjadi akan lebih tinggi. Batubara kalori lebih tinggi menunjukkan nilai emisi gas CH₄ yang rendah. Data emisi gas CH₄ rata-rata hasil pembakaran menunjukkan bahwa batubara BA-59 sebesar 4,8 ppm lebih tinggi dibandingkan dengan batubara BA-63 sebesar 1,3 ppm. Sedangkan emisi gas CH₄ kumulatif batubara BA-59 sebesar 345,8 ppm lebih besar dari batubara BA-63 sebesar 67,9 ppm.

Temperatur pembakaran pada batubara BA-59 dan BA-63 juga berbeda-beda. Temperatur pembentukan emisi gas CH₄ pada pembakaran batubara kalori lebih rendah akan lebih rendah dibandingkan batubara kalori lebih tinggi. Penyebab utamanya adalah bahwa batubara kalori lebih rendah mempunyai kadar air yang lebih tinggi

dibandingkan dengan batubara kalori lebih tinggi [30]. Panas yang terjadi digunakan untuk meningkatkan suhu pada batubara kalori rendah sehingga lebih cepat membentuk unsur H₂ dan CO karena pengaruh kadar air yang lebih tinggi. Proses ini menyebabkan pada batubara kalori lebih rendah akan lebih cepat dalam pembentukan emisi gas CH₄. Gambar 3 menunjukkan bahwa terbentuknya emisi gas CH₄ pada batubara BA-59 terjadi pada masa inkubasi pada saat temperatur mencapai 31oC sedangkan pada batubara BA-63 terjadi pada temperatur 40oC. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa batubara kalori rendah lebih cepat dalam pembentukan emisi gas CH₄ dibandingkan dengan batubara kalori lebih tinggi.



Gambar 3. Pengaruh T terhadap Emisi Gas CH₄

Pembentukan emisi gas CH₄ yang lebih cepat tersebut karena terjadi pemanasan kadar air sehingga dengan cepat membentuk H₂ dan CO pada kondisi oksigen O₂ yang masih mendekati normal dengan reaksi sebagai berikut:



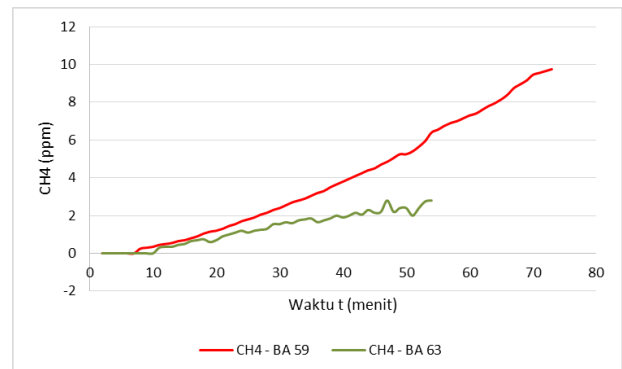
Reaksi (1), (2), dan (3) dapat membentuk emisi gas CH₄ pada pembakaran batubara.

Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi gas metana batubara

Pembakaran batubara kalori lebih rendah akan lebih lama dibandingkan dengan batubara kalori lebih tinggi. Penyebab lamanya waktu pembakaran batubara tersebut adalah karena panas yang dihasilkan akan digunakan untuk memanaskan kadar air yang ada pada batubara tersebut [31].

Emisi gas CH₄ yang terbentuk akan lebih besar dibandingkan dengan batubara kalori yang lebih tinggi. Gambar 4 menunjukkan masa inkubasi batubara BA-59 mencapai 7 menit sedangkan batubara BA-63 mencapai 10 menit. Waktu pembakaran yang terjadi dalam

pembentukan emisi gas CH₄ pada batubara BA-59 lebih cepat karena pembentukan H₂ dan CO lebih cepat seperti persamaan (1), (2), dan (3). Masa akhir pembakaran batubara BA-59 lebih lama dibandingkan batubara BA-63 yang sangat dipengaruhi kadar air yang tinggi. Gambar 4 menunjukkan bahwa waktu pembakaran batubara BA-59 sebesar 72 menit dan batubara BA-63 sebesar 53 menit.



Gambar 4. Pengaruh t terhadap Emisi Gas CH₄

KESIMPULAN

Hasil dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

Peralatan pembakaran batubara yang dirancang dan dibangun dengan memodifikasi model *coal fixed-bed combustion* dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik emisi gas CH₄. Pembentukan emisi gas CH₄ akan lebih tinggi pada batubara BA-59 dibandingkan dengan batubara BA-63 masing-masing sebesar 4,8 ppm dan 1,3 ppm.

Temperatur pembentukan emisi gas CH₄ pada batubara kalori yang lebih rendah terjadi pada masa inkubasi lebih cepat dibandingkan pada batubara kalori yang lebih tinggi. Data temperatur inkubasi BA-59 mencapai 31°C sedangkan batubara BA-63 mencapai 40°C. Waktu inkubasi pembentukan emisi gas CH₄ terjadi lebih cepat pada batubara kalori lebih rendah sedangkan lama pembakaran batubara kalori yang lebih rendah akan lebih lama dibandingkan batubara kalori yang lebih tinggi. Data waktu inkubasi batubara BA-59 mencapai 7 menit dan batubara BA-63 mencapai 10 menit. Sedangkan lama pembakaran batubara BA-59 mencapai 72 menit dan batubara BA-63 mencapai 53 menit.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Anggraeni, P., (2017). The Contribution of Natural Resources on Economic Welfare In Indonesia, *Jurnal Perencanaan Pembangunan*, 1(3), 210-223.
 [2] Ahuja, D., Tatsutani, M., (2009). Sustainable energy for developing countries, *S.A.P.I.E.N.S*, 2 (n°1), 1-16.



- [3] Ang, TZ., Salem, M., kamarol, M., Das, HS., Nazari, MA., Prabakaran, M., (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions, *Energy Strategy Reviews*, 43(100939), 1-27.
- [4] Amin, M., Shah, HH., Fareed, AG., Khan, WU., Chung, E., Zia, A., Farooqi, ZUR., Lee, C., (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 33112-33134.
- [5] Hudaya, GK., Madiutomo, N., (2019). The Availability Of Indonesian Coal To Meet The 2050 Demand, *Indonesian Mining Journal*, 22(2), 107-128.
- [6] Brodny, J., Tutak, M., (2022). Challenges of the polish coal mining industry on its way to innovative and sustainable development, *Journal of Cleaner Production*, 375 (134061), 1-23.
- [7] Harahap, QW., Ginting, P., Distincta, H., Russhidi, M., Burmansyah, E., (2021). *Batu Bara Kualitas Rendah Berpotensi Menghambat Pembangunan Rendah Karbon Sumatera Selatan*, Jakarta : AEER
- [8] Suarna, E., (2011). Perkembangan Teknologi Batubara Bersih Berwawasan Lingkungan, *J.Tek. Ling.*, 12(1), 25 – 34.
- [9] Budi, RFS., Suparman, (2013). Perhitungan Faktor Emisi CO₂ PLTU Batubara dan PLTN, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 15(1), 1-8.
- [10] Wibowo, SA., Windarta, J., (2020). Pemanfaatan Batubara Kalori Rendah Pada PLTU untuk *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(3), 100-110.
- [11] Latif, SNA., Chiong, MS., Rajoo, S., Takada, A., Chun, YY., Tahara, K., Ikegami, Y., (2021). The Trend and Status of Energy Resources and Greenhouse Gas Emissions in the Malaysia Power Generation Mix, *Energies*, 14(2200), 1-26.
- [12] Yusuf, M., Ibrahim, E., Saleh, E., Ridho, MR., Iskandar, I., (2016). The Relationship between the Decline of Oxygen and the Increase of Methane Gas (CH₄) Emissions on the Environment Health of the Plant, *International Journal of Collaborative Research on Internal Medicine & Public Health*, 8(7), 457-464.
- [13] Mar, KA., Unger, C., Walderdorff, L., Butler, T., (2022). Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health, *Environmental Science and Policy*, 134, 127-136.
- [14] Zhang, Y., Meliefste, K., Hu, W., Li, J., Xu, J., Ning, B., Yang, K., Chen, Y., Liu, D., Wong, J., Rahman, M., Rothman, N., Huang, Y., Cassee, F., Vermeulen, R., Lan, Q., Downward, GS., (2021). Household air pollution from, and fuel efficiency of, different coal types following local cooking practices in Xuanwei, China, *Environmental Pollution*, 290(117949), 1-9.
- [15] Engle, MA., Radke, LF., Heffern, EL., O'Kaeefe, JMK., Hower, JC., Smeltzer, CD., Hower, JM., Olea, RA., Eatwell, RJ., Blake DR., Emsbo-Mattingly, SD., Stout, SA., Queen, G., Aggen, KL., Kolker, A., Prakash, A., Henke, KR., Stracher, GB., Schroeder, PA., Román-Colón, Y., Schure, AT., (2012). Gas emissions, minerals, and tars associated with three coal fires, Powder River Basin, USA, *Science of the Total Environment*, 420, 146-159.
- [16] Rahman, R., Widodo, S., Azikin, B., Tahir, D., (2019). Chemical composition and physical characteristics of coal and mangrove wood as alternative fuel, *Journal of Physics: Conference Series*, 1341(052008), 1-10.
- [17] Lee, S., Yoo, J., Umar, DF., (2021). Low-rank coal and poly fatty acid distillate characterization as a preparation of coal upgrading palm oil technology, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 882 (012038), 1-11.
- [18] Mama, A., Seid, A., (2019). Review on Methane Emission from Dairy Farms and Its Impact on Global Warming, *Austin J Vet Sci & Anim Husb*, 6(1), 01-06.
- [19] Buczyński, R., (2011). *Investigation of Fixed-Bed Combustion Process in Small Scale Boilers*, Thesis, Faculty of Energy and Environmental Engineering Faculty of Energy and Management Institute of Thermal Technology, Poland.
- [20] Deng, R., Wang, L., Zhang, R., Luo, Y., (2022). Numerical Modeling of Fixed-Bed Cocombustion Processes through the Multiple Thermally Thick Particle Model, *ACS Omega*, 7, 39938-39949.
- [21] Armand, CT., Akong, O., Bonoma, B., (2019). Numerical Study of Burning of Biomass in Fixed Bed, *Energy and Power Engineering*, 11, 35-57.
- [22] Dai, F., Zhang, S., Luo, Yuanpei, Wang, K., Liu, Y., Ji, X., (2023). Recent Progress on Hydrogen-Rich Syngas Production from Coal Gasification, *Processes*, 11(1765), 1-39.
- [23] Yusuf, M., (2023). The Role of Organic Sulfur in the Formation of Methane Emissions on the Spontaneous Combustion of Coal, *Journal of Ecological Engineering*, 24(4), 192-201.
- [24] Wang, H., Zhang, W., Xin, H., Wang, D., Di, C., Liu, L., (2021). *Energies*, 14(2944), 1-17.



- [25] Arisanti, R., Yusuf, M., Faizal, M., (2018). Study of the Effect of Proximate, Ultimate, and Calorific Value Analysis on Methane Gas Emission (CH₄) on Combustion of Coal for Sustainable Environment, *Science and Technology Indonesia*, 3, 100-106.
- [26] Kazagic, A., Hodzic, N., Metovic, S., (2018). Co-Combustion of Low-Rank Coal with Woody Biomass and Miscanthus: An Experimental Study, *Energies*, 11(601), 1-14.
- [27] Furst, L., Feliciano, M., Frare, L., Igrejas, G., (2021). A Portable Device for Methane Measurement Using a Low-Cost Semiconductor Sensor: Development, Calibration and Environmental Applications, *Sensors*, 21(7456), 1-15.
- [28] Sardi, S., Uno, I., Pasila, F., Altway, A., Mahfud, M., (2023). Low rank coal for fuel production via microwave-assisted pyrolysis: A review, *FirePhysChem*, 3, 106-120.
- [29] Akhlas, J., Baesso, S., Bertucco, A., Ruggeri, F., (2015). Coal gasification by indirect heating in a single moving bed reactor: Process development & simulation, *AIMS Energy*, 3(4), 635-665.
- [30] Arisanti, R., Yusuf, M., Faisal, M., (2017). Study of The Effect of Coal Quality Parameters on Gas Methane (CH₄) Emission in Coal Fire for Sustainable Environment, *Indones. J. Env. Man. Sus*, 1(1), 19-22.
- [31] Asof, M., Arita, S., Andalia, W., (2023). Characteristics of Char from Low-Rank Coal Gasification, *Journal of Ecological Engineering*, 24(4), 78-84.