

BAHAN BAKAR CO-FIRING DARI BATUBARA DAN BIOMASSA TERTOREFAKSI DALAM BENTUK BRIKET (SKALA LABORATORIUM)

Co-Firing Fuel Materials from Coal and Torrefied Biomass in Briquettes (Laboratory Scale)

SUGANAL dan GANDHI K. HUDAYA

Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara
Jalan Jenderal Sudirman 623 Bandung 40211
Telp. (022) 6030483, Fax. (022) 6003373
e-mail: suganal.1957@esdm.go.id

ABSTRAK

Energi berasal dari biomassa berperan cukup strategis dan menduduki urutan ke 3 pasokan energi primer nasional, yaitu sebesar 20,06 % atau 307.346.838 BOE. Urutan pertama dan kedua masih dipasok oleh minyak bumi dan batubara yang berupa energi fosil tidak terbarukan. Sementara itu produksi batubara cukup besar namun belum diimbangi oleh pemanfaatan di dalam negeri yang baru sebesar 20 % dari kapasitas produksinya. Industri secara global sebagai konsumen energi yang besar telah mulai memanfaatkan batubara dan biomassa melalui sistem pembakaran *co-firing* sebagai upaya pemanfaatan sistem energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pemanfaatan biomassa bersama batubara acapkali memerlukan peningkatan kualitas biomassa tersebut di antaranya melalui sistem torefaksi. Dalam rangka optimasi pemanfaatan kombinasi batubara–biomassa untuk industri nasional telah diidentifikasi komposisi dan jenis biomassa dalam bentuk briket batubara–biomassa torefaksi yang memenuhi kriteria bahan bakar industri. Hasil kegiatan menunjukkan bahwa 70 % batubara, 25 % batang singkong torefaksi dan 5 % tepung tapioka sebagai bahan pengikat merupakan komposisi adonan briket ideal ditinjau dari nilai kalor dan kadar abu sebagai bahan bakar untuk pembangkitan energi termal dengan harapan akan berdampak pada pengurangan emisi terutama CO₂ sekaligus merupakan upaya pemanfaatan sumber energi terbarukan dan mengurangi energi fosil tidak terbarukan.

Kata kunci: batubara, biomassa, torefaksi, komposisi adonan briket.

ABSTRACT

The energy role from biomass is strategic and serves as the third rank of primary energy supply in Indonesia namely around 20.06% or 307.346.838 BOE. The first and second ranks are still dominated by petroleum and coal in the form of fossil energy or a non-renewable one. Meanwhile, the coal production is large but it is not balanced with the domestic use that is only 20% from its production capacity. Globally as a major energy consumer, the industry is exploiting the coal and the biomass through a co-firing combustion system as an effort of utilizing a sustainable and environmentally friendly energy system. The use of biomass with coal often requires improving the quality of biomass through a torrefaction system. In order to optimize the use of the biomass-coal combination, composition and type of biomass in the form of coal-biomass briquettes have been identified such the briquettes has met the criteria for industrial fuels. The results show that 70% of coal, 25% torrefied cassava stems and 5% cassava starch as a binder are the ideal compositions as raw materials of torrefied biomass-coal briquettes for industrial thermal energy generation in term of reducing CO₂ emissions impact as well as benefiting the renewable energy.

Keywords: coal, biomass, torrefaction, composition of the mixture of briquet.

PENDAHULUAN

Energi merupakan penggerak utama roda perekonomian nasional. Konsumsinya terus meningkat mengikuti permintaan berbagai sektor pembangunan khususnya listrik, industri dan transportasi. Kebutuhan energi saat ini dipenuhi oleh sumberdaya energi fosil baik minyak bumi, gas dan batubara. Sebagai energi tak terbarukan keberadaan sumberdaya energi fosil suatu saat akan habis.

Peran batubara dalam sistem pasokan energi nasional akan ditingkatkan namun penggunaan batubara sebagai pembangkit energi memiliki suatu kendala, yaitu dihasilkannya emisi gas rumah kaca (GRK) sebagai penyebab utama pemanasan global yang sedang marak diperdebatkan. Salah satu cara mengurangi emisi GRK adalah dengan pembakaran *co-firing* batubara-biomassa.

Posisi geografisnya di katulistiwa menjadikan Indonesia sebagai negara agraris yang tidak mengenal musim sehingga mempunyai potensi sangat besar dalam hal energi biomassa. Data menunjukkan bahwa potensi produksi biomassa Pulau Jawa yang terdiri dari limbah padi, jagung, singkong, kayu dan kelapa dengan total potensi lebih dari 114.800 GWh merupakan andalan nasional (Hermawati *dkk.*, 2013). Sementara itu, sampai 2016, energi biomassa menduduki urutan ke 3 pasokan energi primer nasional, yaitu 20,06 % atau 307.346.838 BOE. Urutan pertama dan kedua masih dipasok oleh minyak bumi dan batubara (Ministry of Energy and Mineral Resources of Republic Indonesia, 2017). Jenis pasokan energi nasional lainnya adalah batubara dengan potensi cadangan sebesar 29.911.360.000 ton. Cadangan terbesar berada di Sumatera Selatan sejumlah 10.934.090.000 ton (Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2018). Meskipun cadangan batubara Indonesia sebanyak lebih dari 29,9 milyar ton namun hanya 2,2 % dari cadangan dunia (BP, 2017). Pada sisi lain, batubara merupakan energi fosil yang bersifat *nonrenewable* sehingga pemanfaatannya harus penuh perhitungan seoptimal mungkin. Bahwasanya Indonesia memiliki cadangan energi biomassa yang relatif besar perlu dioptimalkan pemanfaatannya sebagai pasokan energi yang bersifat terbarukan.

Biomassa adalah semua material biologis berasal dari tanaman atau hewan yang bisa digunakan untuk menghasilkan panas dan/atau tenaga, bahan bakar (termasuk bahan bakar transportasi), atau pengganti produk dan material berbasis fosil (Department for Environment; Food and Rural Affairs, 2007). Pengertian lain biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan dari proses fotosintesis. Wujud nyata biomassa antara lain tanaman, pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, limbah hutan termasuk juga kotoran ternak. Biomassa dapat digunakan sebagai sumber energi. Materialnya mengandung unsur karbon yang dapat menghasilkan panas saat dioksidasi. Apabila digunakan sebagai sumber energi, biomassa mempunyai beberapa keunggulan atau kelebihan di antaranya dapat diperbarui (*renewable*) sehingga dapat digolongkan energi yang berkesinambungan (*suistainable*) (Hermawati *dkk.*, 2013).

Bahan bakar fosil seperti batubara, gas alam dan minyak bumi masih merupakan sumber energi global yang dominan, meskipun berupa sumber energi yang tidak terbarukan dan berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Sepuluh tahun lalu, pada 2008, sumber energi tersebut menduduki pasokan mencapai 81% total pasokan energi primer global (Mehmood, Reddy dan Rosen, 2012). Energi fosil tersebut masih akan sulit tergantikan dalam waktu dekat dan diperkirakan akan bertahan setidaknya 119 tahun. Pembangkit listrik berbahan bakar batubara masih menduduki 41% produksi listrik global dan diperkirakan mencapai 44% pada tahun 2030.

Upaya pengurangan pasokan bahan bakar fosil dan pencegahan peningkatan emisi gas rumah kaca mendorong ketertarikan yang mendunia pada sistem energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, antara lain melalui pemanfaatan energi biomassa. Sehubungan dengan kandungan energi pada biomassa umumnya relatif rendah maka kombinasi bahan bakar biomassa dan batubara menjadi salah satu penyelesaian untuk mempertahankan kandungan energi yang optimal. Kombinasi bahan bakar tersebut dapat melalui cara pembakaran sistem *co-firing*.

Co-firing, juga dikenal sebagai *co-combustion*, adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar berbeda dalam perangkat pembakaran

yang sama, seringkali dioperasikan dalam ketel pembangkit uap. Dalam pengertian sederhana, pembakaran *co-firing* dari batubara dengan biomassa dapat dipandang sebagai bagian dari sistem yang melengkapi perangkat *boiler* berbahan bakar batubara (Wijayapala dan Mudunkotuwa, 2016).

Co-firing secara umum dapat dinyatakan sebagai suatu proses pembakaran dua material bahan bakar berbeda yang dioperasikan secara bersamaan. Keuntungan operasi pembakaran sistem *co-firing* adalah terjadinya pengurangan emisi gas CO₂, SO_x dan NO_x pada bahan bakar fosil. Hal demikian menjadikan sistem *co-firing* diminati pada pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara (Winaya, Susila dan Agung, 2010). Ditinjau dari operasi pembakarannya, sedikitnya terdapat 2 cara *co-firing* yaitu *direct co-firing* dan *indirect co-firing*. Dari ke-2 cara pembakaran tersebut, *direct co-firing* adalah yang paling murah, dengan cara membakar biomassa dan batubara secara bersamaan. *Indirect co-firing* didahului oleh gasifikasi biomassa. Gas yang dihasilkan diumpungkan bersama batubara dalam ruang pembakaran. Karena biomassa menyerap jumlah CO₂ yang sama seperti yang dipancarkan selama pembakarannya, maka *co-firing* biomassa tidak berkontribusi pada efek rumah kaca. Sebagian besar bahan bakar biomassa memiliki kandungan belerang dan nitrogen lebih rendah daripada batubara, jadi banyak kasus emisi NO_x dan SO_x dapat dikurangi dengan *co-firing* biomassa. Untuk alasan ini, *co-firing* biomassa dengan batubara telah mendapat perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir (Mehmood, Reddy dan Rosen, 2012).

Secara umum, karakteristik biomassa mempunyai kadar air dan zat terbang tinggi, kadar karbon padat dan nilai kalor relatif rendah, namun kadar abu sangat rendah yaitu kurang dari 5% (Surono, 2010; Rismayani dan Sjaifudin, 2011; Sui dkk., 2013). Nilai kalor biomassa daun kiara payung sebagai kelompok daun berkisar 4.000 kkal/kg, sedangkan rumput gajah sebesar 4.191 kkal/kg dan batang singkong lebih tinggi yaitu 4.400 kkal/kg (Prakobboon dan Vahdati, 2013; dos Santos dkk., 2015). Batubara umumnya mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dari material biomassa. Sebagai contoh batubara Air Laya, Sumatera Selatan

mempunyai nilai kalor 5.300 kkal/kg (Daulay, 2017). Perbedaan spesifikasi tersebut dapat terjadi karena perbedaan kandungan unsur-unsur dalam biomassa dan batubara seperti yang dilaporkan oleh Speight (2013) pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi unsur kimia pada biomassa dan batubara

No.	Material	Komposisi unsur (% berat)		
		C	H	O
1	Kayu/biomassa	49	7	44
2	Gambut	60	6	34
3	Batubara lignit	70	5	25
4	Batubara subbituminus	75	5	20
5	Batubara bituminus	85	5	10
6	Batubara antrasit	94	3	3

Sumber : Speight (2013)

Untuk meningkatkan nilai kalor dan mengurangi kadar air maka biomassa sering ditingkatkan mutunya melalui proses torefaksi yang pada hakekatnya merupakan proses pirolisis pada suhu rendah (200-300 °C). Biomassa berupa bonggol jagung yang dilakukan proses torefaksi pada temperatur 300 °C mempunyai spesifikasi air lembab 0,495 %, abu 4,650 %, zat terbang 19,905 %, karbon padat 74,950 % dan nilai kalor cukup tinggi yaitu 7.038 kkal/kg (Surono, 2010). Penerapan sistem proses torefaksi untuk pertama kali direalisasikan sebagai bagian dari proses preparasi gasifikasi biomassa. Hasil torefaksi berupa material yang telah cukup tinggi kadar karbon padatnya dan dapat berfungsi sebagai bahan baku gasifikasi yang ideal. Saat sekarang upaya torefaksi biomassa cukup banyak dikerjakan kembali sebagai bagian dari peningkatan mutu (*upgrading*) biomassa untuk mendapatkan bahan energi non fosil (Syamsiro, 2016).

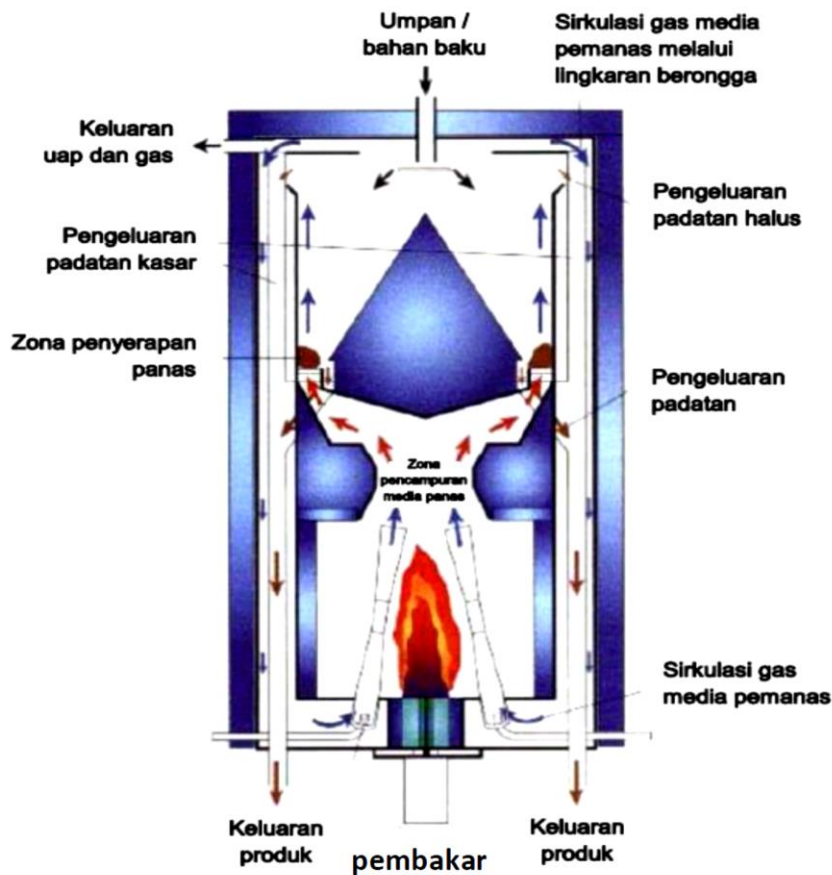
Realisasi proses torefaksi biomassa dapat dilakukan dalam suatu reaktor berbentuk silinder tegak dengan sistem pemanasan langsung seperti reaktor torefaksi torbed pada Gambar 1 (Crnogaca, 2017). Proses torefaksi tersebut menggunakan perpindahan panas dengan injeksi gas media pemanas berkecepatan tinggi dari bagian bawah reaktor (50 m/detik hingga 80 m/detik), melalui sudu diam bersudut dan gas tersebut bergerak ke atas dan memindahkan biomassa secara

vertikal dan horizontal dan dengan cepat memanaskan partikel biomassa. Perpindahan panas secara intensif memungkinkan pengoperasian reaktor berlangsung pada suhu yang sangat tinggi (berlangsung sampai suhu 380°C).

Keuntungan metode ini adalah: waktu tinggal reaksi pendek (<100 detik), perpindahan panas berlangsung cepat, tidak terdapat bagian reaktor yang bergerak, kemampuannya untuk memantau produk cukup tepat, tingkat konsumsi energi rendah. Namun terdapat kekurangan, antara lain: kapasitas terbatas, suhu tinggi menyebabkan peningkatan hilangnya zat terbang yang pada hakekatnya merupakan energi.

Bahan baku dari bahan bakar *co-firing* batubara dengan biomassa tertorefaksi untuk

keperluan industri sering memerlukan aglomerasi atau penggumpalan atau pembriketan agar memudahkan perpindahan bahan tersebut dan menghindari kepulan (beterbangan) material halus dan ringan dari bahan tersebut. Dalam aglomerasi bahan-bahan tersebut di atas, proses pembriketan dengan bahan pengikat (*binder*) merupakan proses yang sangat umum dikerjakan. Proses pembriketan minimal meliputi 4 (empat) tahap operasi, yaitu penggerusan (penyeragaman ukuran butiran bahan), pencampuran bahan pengikat, pembriketan dan pengeringan produk briket. Bahan pengikat yang digunakan umumnya berupa serbuk tanah liat kering berukuran -60 mesh sebanyak 10 % berat atau molase sebanyak 8 % atau tepung tapioka sebanyak 3 % berat dalam bentuk *gel* (Suganal, 2017).



Sumber : Crnogaca (2017)

Gambar 1. Skema reaktor torefaksi biomassa

Saat ini penggunaan terbesar batubara Indonesia masih sebagai bahan bakar industri besar dan pembangkit listrik. Apabila briket batubara-biomassa tertorefaksi diupayakan sebagai bahan bakar pada kedua industri tersebut maka spesifikasi briket batubara-biomassa tertorefaksi tersebut minimal memenuhi kriteria spesifikasi batubara untuk industri besar dan PLTU. Secara umum spesifikasi batubara untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah : kandungan air lembab 23 %, abu 7,8 %, zat terbang 30,3 %, nilai kalor 5.242 kkal/kg, namun demikian masih mendapat toleransi sampai kadar air lembab 28,30 %, abu 12,80%, zat terbang 15,10% dan nilai kalor 4.225 kkal/kg. Sementara untuk industri besar pabrik semen menghendaki kadar air lembab 12 %, abu 6 %, zat terbang 36-42 %, nilai kalor > 6.000 kkal/kg (Lestari, Asy'ari dan Hidayatullah, 2016).

Pada hakekatnya Indonesia tidak memiliki cadangan batubara yang besar karena hanya 2,2 % dari cadangan dunia, namun tingkat produksi relatif besar pula yaitu sekitar 450 juta ton per tahun. Dengan tingkat produksi tersebut maka diperkirakan umur cadangan penggunaan batubara hanya dapat bertahan sekitar 60 tahun (BP, 2017; Ministry of Energy and Mineral Resources, 2017; Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2018). Sementara sumber energi biomassa yang bersifat *renewable* juga cukup besar, maka pemanfaatan kombinasi dua sumber energi batubara dan biomassa melalui sistem pembakaran *co-firing* sangat penting untuk diterapkan pada industri sebagai pengguna energi yang cukup besar, yaitu 25 % dari konsumsi energi nasional pada tahun 2016 (BP, 2017).

METODOLOGI

Percontoh batubara diambil langsung dari Wahau, Kalimantan Timur di lokasi perusahaan tambang batubara tersebut. Percontoh biomassa yang dipilih adalah daun kiara payung, rumput gajah dan batang singkong berasal dari Kabupaten Bandung. Daun kiara payung dan rumput gajah dilakukan torefaksi pada suhu 400 °C, selama 1 jam, sedangkan batang pohon singkong ditorefaksi pada 600 °C selama 1 jam. Operasi torefaksi biomassa berlangsung dalam suatu *retort* (silinder tertutup dari bahan *stainless steel*) yang

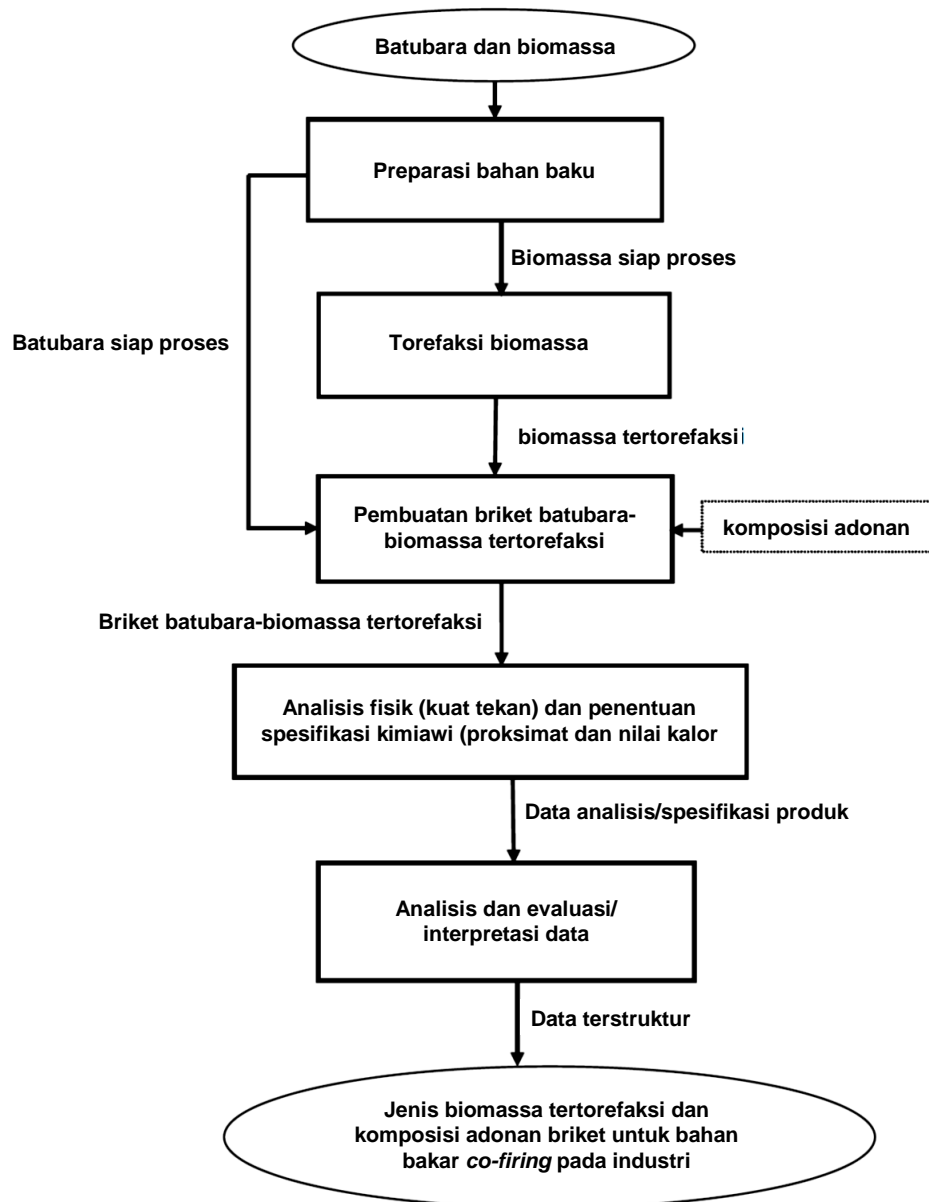
ditempatkan pada tungku listrik. Pembriketan batubara-biomassa tertorefaksi dilakukan dengan komposisi adonan dari serbuk batubara berukuran -8 mesh dan serbuk biomassa tertorefaksi berukuran -8 mesh seperti tercantum pada Tabel 2. Adonan yang terbentuk segera dicetak dengan alat briket manual berbentuk silinder dengan dimensi briket berdiameter konstan 3,8 cm, tinggi berkisar antara 5 – 8 cm, dan berat konstan sebesar 50 gram per butir. Tekanan pembriketan 200 kgf/cm². Langkah penelitian tercantum pada Gambar 2, sedangkan wujud biomassa terlihat pada Gambar 3.

Tabel 2. Komposisi adonan briket batubara – biomassa tertorefaksi

No	Adonan briket	Komposisi adonan, % berat		
		Batubara	Biomassa tertorefaksi	Tepung tapioka
1	Adonan I	85	10	5
2	Adonan II	80	15	5
3	Adonan III	75	20	5
4	Adonan IV	70	25	5
5	Adonan V	50	45	5
6	Adonan VI	35	60	5
7	Adonan VII	20	75	5

Penentuan kualitas adonan yang dipilih disesuaikan dengan persyaratan minimal batubara sebagai bahan bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan/atau bahan bakar industri besar antara lain pabrik semen. Persyaratan batubara pada PLTU Suralaya dipilih sebagai penentuan kriteria batubara untuk PLTU mengingat PLTU Suralaya adalah pengguna batubara terbesar di Indonesia (Lestari, Asy'ari dan Hidayatullah, 2016).

Analisis kualitas bahan baku berupa batubara dan biomassa tertorefaksi meliputi analisis proksimat dan nilai kalori. Metode analisis untuk bahan baku menggunakan standar ASTM. Briket batubara-biomassa tertorefaksi yang diperoleh dilakukan penentuan spesifikasinya melalui perhitungan neraca massa dan energi (proksimat dan nilai kalor). Sifat fisik briket yang dianalisis adalah kuat tekan sebagai parameter kualitas fisik menggunakan standar ASTM. Salah satu identifikasi sifat fisik briket batubara di Afrika Selatan juga menggunakan analisis kuat tekan (Venter dan Naude, 2015).



Gambar 2. Bagan alir kegiatan penelitian



Daun kiara payung (*Filicium decipiens*)



Rumput gajah (*Pennisetum purpureum*)



Batang singkong (*Manihot utilissima Pohl*)

Gambar 3. Biomassa untuk penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Bahan Baku

Nilai kalori biomassa tertorefaksi daun kiara payung dan rumput gajah mengalami kenaikan menjadi 6.021 kkal/kg (adb) dan 5.483 kkal/kg(adb). Biomassa jenis daun atau rumput dengan densitas relatif rendah dapat mencapai kenaikan nilai kalori cukup tinggi antara 1.500 – 2.000 kkal/kg pada suhu pemanasan 400 °C selama 1 jam proses torefaksi. Untuk biomassa yang relatif lebih padat dan keras seperti batang singkong kenaikan nilai kalor setelah proses torefaksi pada 600 °C selama 1 jam mendapatkan nilai kalor sangat tinggi dari semula hanya 4.400 kkal/kg menjadi 7.354 kkal/kg. Peningkatan nilai kalor sebagai salah satu tujuan torefaksi biomassa untuk adonan briket batubara–biomassa terlihat pada Tabel 3. Pada Tabel 3 tercantum pula nilai kalor tepung tapioka yang akan sedikit berpengaruh pada nilai kalor briket batubara-biomassa.

Wibowo *dkk.* (2017) melakukan torefaksi rumput gajah pada suhu 300 °C juga berhasil menaikkan nilai kalor sampai 5.468 kkal/kg. Di samping rumput gajah, dicoba pula torefaksi biji nyamplung pada 500 °C namun hanya mendapatkan nilai kalor 6.258 kkal/kg. Tingginya nilai kalor pada torefaksi batang singkong terjadi karena temperatur proses torefaksi yang tinggi dan waktu yang lama sekitar 1 jam. Waktu tinggal torefaksi selama 1 jam telah digunakan sebagai waktu tinggal proses pada torefaksi di Uni Eropa (Maciejewska *dkk.*, 2006). Namun waktu torefaksi yang relatif lama tersebut dapat menimbulkan kadar abu menaik karena dapat terjadi kemungkinan pembakaran sebagian karbon padatnya apabila terdapat kelebihan udara.

Hasil analisis bahan baku briket batubara-biomassa tertorefaksi yang meliputi proksimat dan nilai kalor dilakukan dengan standar ASTM dan ISO tercantum pada Tabel 4.

Kandungan abu pada daun kiara payung, rumput gajah dan batang singkong relatif tinggi yaitu 16,5 - 20,8 % dibandingkan dengan kadar abu awalnya yang berkisar 4,65 %. Karakter tersebut mirip dengan torefaksi rumput gajah pada 300°C yang dilakukan di Sukabumi yang menghasilkan arang dengan kadar abu 17,5 %. Torefaksi biomassa akan melepaskan sebagian kandungan zat terbang. Sisa zat terbang pada torefaksi daun kiara payung, rumput gajah dan batang singkong 46,25; 34,10 dan 54,41 % secara umum relatif masih tinggi jika dibandingkan kegiatan sejenis dengan hasil kadar zat terbang 26,92 % (Wibowo *dkk.*, 2017). Namun kadar zat terbang pada hasil torefaksi pada Tabel 4 tersebut masih dapat ditoleransi mengingat tujuan torefaksi bukan untuk mendapatkan bahan bakar tanpa asap (*smokeless fuel*) yang mensyaratkan kadar zat terbang rendah sampai 15% (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, 2006).

Torefaksi batang singkong pada suhu 600 °C selama 1 jam lebih efektif untuk target pencapaian nilai kalor yang tinggi (> 7.000 kkal/kg) dan kadar abu relatif sedang jika dibandingkan dengan torefaksi pada biji nyamplung atau bonggol jagung (Surono, 2010; Wibowo *dkk.*, 2017). Meskipun kadar abu lebih besar dari 10 % namun biomassa tertorefaksi ini akan dicampur dengan batubara yang kadar abunya sangat rendah yaitu 2,58 % sehingga akan diperoleh bahan bakar *co-firing* dengan abu rendah dan kalori tinggi. Perubahan nilai kalor dan abu pada pencampuran batubara dan biomassa tertorefaksi bersifat linier sehingga perubahan komposisi juga selaras dengan perubahan nilai kalor dan kadar abunya.

Tabel 3. Nilai kalor bahan adonan

No.	Jenis bahan	Nilai kalori, kkal/kg adb				Keterangan
		Daun kiara payung	Rumput gajah	Batang singkong	Tepung Tapioka	
1	Biomass non torefaksi	4.000	4.191	4.400	-	Sumber pustaka 1)
2	Biomassa tertorefaksi	6.021	5.483	7.354	-	Hasil analisis
3	Bahan pengikat	-	-	-	3.628	Sumber pustaka 2)

Sumber pustaka 1): Prakobboon dan Vahdati, (2013); dos Santos *dkk.* (2015)

Sumber pustaka 2): Oladunmoye *dkk.* (2014)

Tabel 4. Spesifikasi bahan baku briket batubara - biomassa tertorefaksi

No.	Parameter	Bahan Baku Briket				Metode analisa
		Biomassa Tertorefaksi			Batubara (non torefaksi)	
		Daun kiara payung	Rumput gajah	Batang singkong		
1	Air lembab, % adb	4,17	6,01	6,87	12,34	ASTM D.3302
2	Abu, % adb	16,50	20,80	17,85	2,58	ASTM D.3174
3	Zat terbang, % adb	46,25	39,08	34,10	48,36	ISO 562
4	Karbon padat, % adb	33,08	34,11	41,18	36,72	ASTM D.3172
5	Nilai kalori, kkal/kg adb	6.021	5.483	7. 354	5.819	ASTM D.720

Karakteristik Briket Batubara-Biomassa Tertorefaksi

a. Briket batubara-daun kiara payung tertorefaksi

Untuk setiap komposisi briket batubara-daun kiara payung tertorefaksi yang terbentuk, dilakukan perhitungan neraca massa dan kalori sehingga diperoleh karakter campuran kedua material tersebut. Untuk karakter fisik dilakukan analisis kuat tekan. Hasil perhitungan dan analisis kuat tekan tercantum pada Tabel 5, Gambar 4 dan Gambar 5.

Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin banyak komposisi biomassa (daun kiara payung tertorefaksi), semakin kecil kandungan air lembab. Hal ini terjadi karena kadar air lembab daun kiara payung tertorefaksi lebih kecil dari kadar air lembab batubara. Oleh karena itu, terlihat semakin banyak komposisi batubara, semakin tinggi kadar air lembab pada briket tersebut. Perubahan nilai parameter proksimat (kandungan air lembab, abu, zat terbang dan karbon padat) dan nilai kalor pada pencampuran batubara dan biomassa tertorefaksi bersifat linier sehingga perubahan komposisi juga selaras dengan perubahan nilai proksimat dan nilai kalor tersebut. Hal tersebut terlihat dari hasil perhitungan yang tercantum pada Tabel 5, Gambar 4 dan Gambar 5.

Dengan tingginya kadar abu pada daun kiara payung tertorefaksi maka kadar abu briket juga cenderung menaik selaras dengan naiknya komposisi daun kiara payung dalam adonan briket. Pada adonan VII, parameter kadar abu mencapai 12,89 %. Kadar abu yang lebih tinggi dialami pula pada pembuatan briket torefaksi batubara dan bonggol jagung

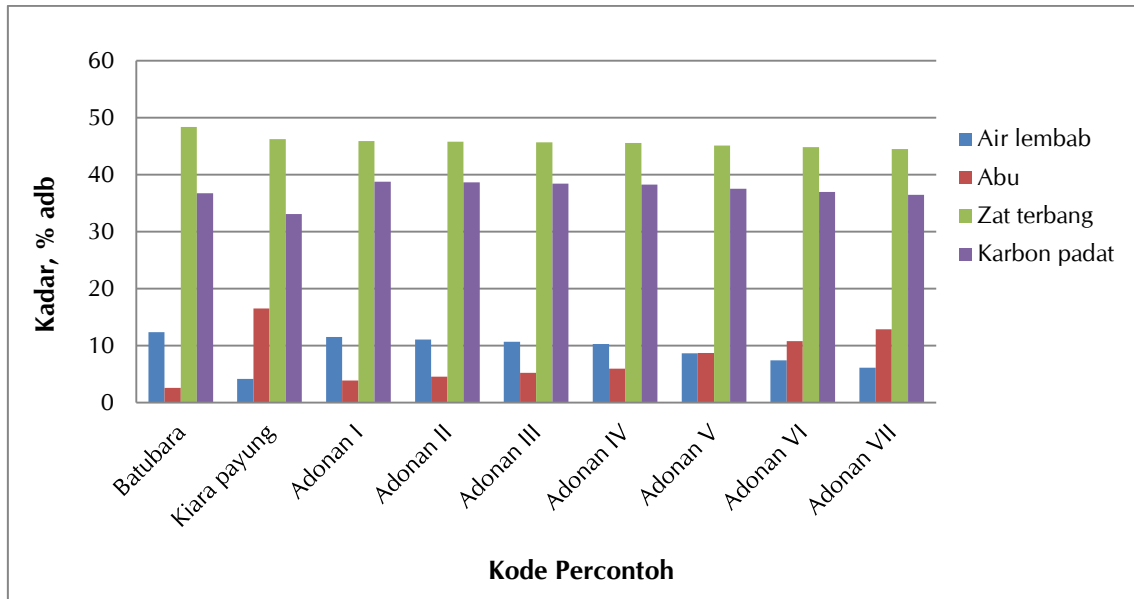
maupun kulit pisang, bahkan mencapai 32,21 % (Faizal, 2017). Keberadaan abu yang tinggi harus dihindari karena akan menurunkan nilai kalor serta menyebabkan terjadinya kesulitan dalam penanganan pasca pembakaran.

Pada Tabel 5 dan Gambar 5, nilai kalor briket dari adonan I sampai dengan V lebih rendah dari nilai kalor umpan berupa daun kiara payung tertorefaksi maupun nilai kalor umpan berupa batubara. Hal tersebut sebagai akibat dari penambahan bahan pengikat berupa tepung tapioka yang kandungan kalornya sangat rendah yaitu hanya sebesar 3.628 kkal/kg seperti tertulis pada Tabel 3 meskipun pada komposisi yang sangat kecil, yaitu hanya 5 %. Pada adonan VI dan VII, besarnya nilai kalor sudah melebihi nilai kalor umpan batubara karena komposisi daun kiara payung tertorefaksi sudah sangat dominan, yaitu mencapai lebih besar dari 60 %. Dengan demikian secara umum penambahan tepung tapioka akan menurunkan nilai kalor adonan briket batubara-biomassa tertorefaksi. Namun nilai kalor briket menaik secara proposional dengan naiknya komposisi biomassa karena nilai kalor biomassa lebih tinggi dari batubara.

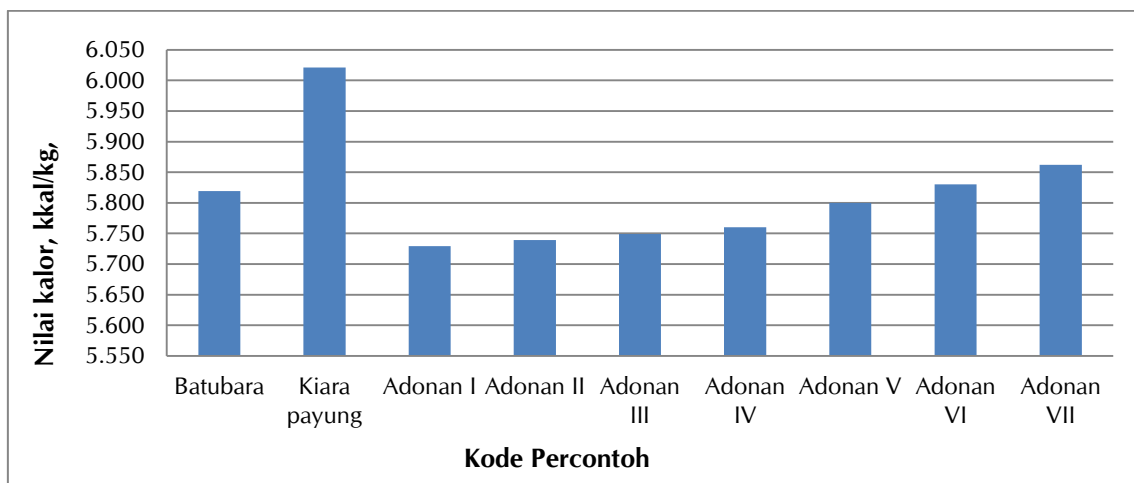
Dari sisi kualitas yang tertera pada hasil perhitungan menunjukkan bahwa briket tersebut cukup memadai sebagai bahan bakar PLTU, kecuali pada komposisi biomassa sebanyak 75 %. Pada komposisi tersebut nilai kadar abu sedikit lebih tinggi dari persyaratan bahan bakar PLTU, yaitu 12,89%, namun nilai kalornya masih tinggi, yaitu 5.861 kkal/kg. Untuk bahan bakar industri besar pabrik semen, parameter abu dan nilai kalor pada adonan I sampai dengan adonan VII belum memenuhi persyaratan (Lestari, Asy'ari dan Hidayatullah, 2016).

Tabel 5. Spesifikasi kimia briket batubara - daun kiara payung tertorefaksi dari hasil perhitungan dan spesifikasi fisik kuat tekan hasil analisis

No.	Komposisi Adonan	Kode sampel	Spesifikasi						Kuat tekan, kg/cm ²	Keterangan
			Air lembab, % adb	Abu, % adb	Zat terbang, % adb	Karbon padat, % adb	Nilai kalori, kkal/kg, adb			
1	- Batubara, 100% - Daun kiara payung tertorefaksi, 0% - Tepung tapioka 0%	Batubara	12,34	2,58	48,36	36,72	5.819	-	Bahan baku, hasil analisis	
2	- Batubara 0% - Daun kiara payung tertorefaksi, 100% - Tepung tapioka 0%	Kiara payung	4,17	16,50	46,25	33,08	6.021	-	Bahan baku, hasil analisis	
3	- Batubara 85% - Daun kiara payung tertorefaksi, 10% - Tepung tapioka, 5%	Adonan I	11,53	3,85	45,87	38,77	5.729	16,50	Briket	
4	- Batubara 80% - Daun kiara payung tertorefaksi 15% - Tepung tapioka 5%	Adonan II	11,07	4,54	45,77	38,63	5.739	14,80	Briket	
5	- Batubara 75% - Daun kiara payung tertorefaksi 20% - Tepung tapioka 5%	Adonan III	10,69	5,24	45,66	38,42	5.749	14,80	Briket	
6	- Batubara 70% - Daun kiara payung tertorefaksi 25% - Tepung tapioka 5%	Adonan IV	10,27	5,93	45,55	38,25	5.760	21,50	Briket	
7	- Batubara 50% - Daun kiara payung tertorefaksi 45% - Tepung tapioka 5%	Adonan V	8,64	8,72	45,13	37,51	5.800	5,40	Briket	
8	- Batubara 35% - Daun kiara payung tertorefaksi 60% - Tepung tapioka 5%	Adonan VI	7,41	10,81	44,82	36,94	5.830	5,40	Briket	
9	- Batubara 20% - Daun kiara payung tertorefaksi 75% - Tepung tapioka 5%	Adonan VII	6,15	12,89	44,50	36,46	5.861	5,40	Briket	



Gambar 4. Spesifikasi briket batubara - daun kiara payung tertorefaksi



Gambar 5. Nilai kalor briket batubara - daun kiara payung tertorefaksi

Untuk sifat fisik briket batubara-biomassa tertorefaksi ini telah relatif kuat apabila dibandingkan dengan kualitas briket batubara-biomassa yang umum diperoleh pada kegiatan pembuatan briket sejenis, terutama pada komposisi biomassa sampai dengan 25%. Kuat tekan yang diperoleh mencapai 21,5 kg/cm². Beberapa hasil penelitian lainnya umumnya hanya mencapai 5 kg/cm² (Zanjani, Moghaddam dan Dorosti, 2014). Untuk batubara-biomassa sekam padi dengan bahan pengikat tepung tapioka 10% pun hanya mendapatkan kuat tekan (*compressive strength*) 13,4 kg/cm² (Himawanto, 2013).

Pada hakekatnya, nilai kuat tekan pada briket batubara-biomassa kiara payung tertorefaksi ini tepat untuk bahan bakar industri yang kemungkinan besar menggunakan *boiler co-firing pulverized coal combustion*, maka tujuan pembriketan hanya untuk mendapatkan kemudahan transportasi dan penanganan material (*material handling*) lainnya serta pencegahan emisi debu. Menilik data hasil perhitungan dan analisis kuat tekan pada Tabel 5, Gambar 4 dan 5, maka pembriketan campuran batubara dengan daun kiara payung tertorefaksi akan optimal pada komposisi maksimal 25 % daun kiara payung tertorefaksi.

b. Briket batubara-biomassa rumput gajah tertorefaksi

Pada setiap komposisi briket batubara-rumput gajah tertorefaksi yang diperoleh, dilakukan perhitungan neraca massa dan kalori untuk mendapatkan karakter briket batubara dari campuran kedua material tersebut. Dalam hal karakter fisik telah dilakukan analisis kuat tekan. Hasil perhitungan neraca massa dan kalori serta analisis kuat tekan tercantum pada Tabel 6, Gambar 6 dan 7.

Data pada Tabel 6, Gambar 6 dan 7 terlihat adanya kecenderungan penurunan kadar air lembab. Hal ini terjadi karena kadar air lembab rumput gajah tertorefaksi lebih kecil dari kadar air lembab batubara. Perubahan nilai parameter proksimat (kandungan air lembab, abu, zat terbang dan karbon padat) dan nilai kalor akan bersifat linier dengan adonan briket tersebut. Kadar air lembab rumput gajah tertorefaksi lebih rendah dari kadar air batubara maka untuk komposisi adonan dengan porsi rumput gajah tertorefaksi yang lebih besar berakibat kepada turunnya kadar air briket dan lebih kecil dari kadar air batubara, namun lebih besar dari kadar air lembab rumput gajah tertorefaksi. Kadar abu menaik dengan naiknya komposisi rumput gajah tertorefaksi karena kadar abu pada biomassa tersebut lebih tinggi dari kadar abu batubara. Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa semua nilai kalor briket batubara-rumput gajah tertorefaksi lebih rendah dari nilai kalor batubara murni. Penambahan bahan pengikat tepung tapioka sebanyak 5 % salah satu penyebabnya karena tepung tapioka berupa material rendah kalori (Tabel 3).

Dari sisi kualitas yang tertera pada hasil perhitungan menunjukkan bahwa briket tersebut cukup memadai sebagai bahan bakar industri dan PLTU pada komposisi biomassa 15, 20 dan 25 %. Sementara untuk industri besar pabrik semen briket briket batubara-rumput gajah tertorefaksi belum memenuhi syarat terutama karena nilai kalorinya masih di bawah standar (Lestari, Asy'ari dan Hidayatullah, 2016).

Sifat fisik briket batubara-biomassa tertorefaksi ini telah relatif kuat apabila dibandingkan

dengan kualitas briket batubara-biomassa pada umumnya, terutama pada komposisi biomassa sampai dengan 15%. Kuat tekan yang diperoleh mencapai 22,4 kg/cm² pada kadar air lembab 11,37 %. Beberapa hasil penelitian lainnya umumnya hanya mencapai 19 kg/cm² (Onukak dkk., 2017). Briket batubara-biomassa sekam padi dengan bahan pengikat tepung tapioka cukup tinggi pun (10%) hanya mendapatkan kuat tekan (*compressive strength*) 13,4 kg/cm² (Himawanto, 2013). Bahkan briket batubara dari Muangthai pada kadar air 10 % hanya mempunyai kuat tekan sebesar 10,5 kg/cm² (Siritheerasas, Chunnuyom dan Sethabunjong, 2008). Pembuatan briket pada penelitian ini telah mendapatkan sifat fisik yang bagus meskipun bahan pengikat yang berupa tepung tapioka hanya sebanyak 5 %.

Pada pembriketan batubara-rumput gajah tertorefaksi akan optimal dengan komposisi batubara 80 %, 15 % rumput gajah tertorefaksi dan tepung tapioka 5 %.

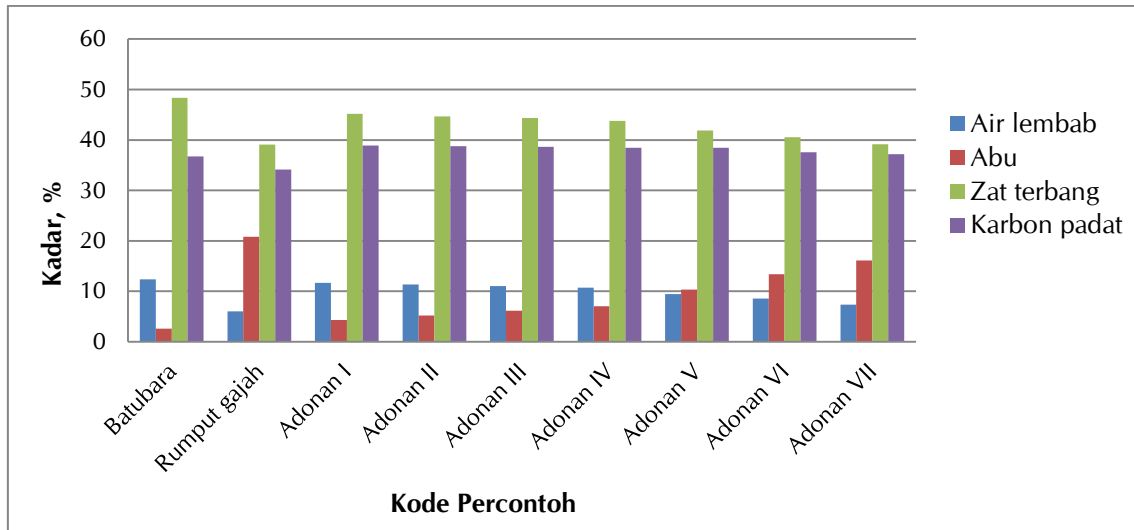
c. Briket batubara-biomassa batang singkong tertorefaksi

Terhadap komposisi briket batubara-batang singkong tertorefaksi yang terbentuk, dilakukan perhitungan neraca massa dan kalori sehingga diperoleh karakter campuran kedua material tersebut. Untuk karakter fisik dilakukan analisis kuat tekan. Hasil perhitungan dan analisis kuat tekan tercantum pada Tabel 7, Gambar 8 dan 9.

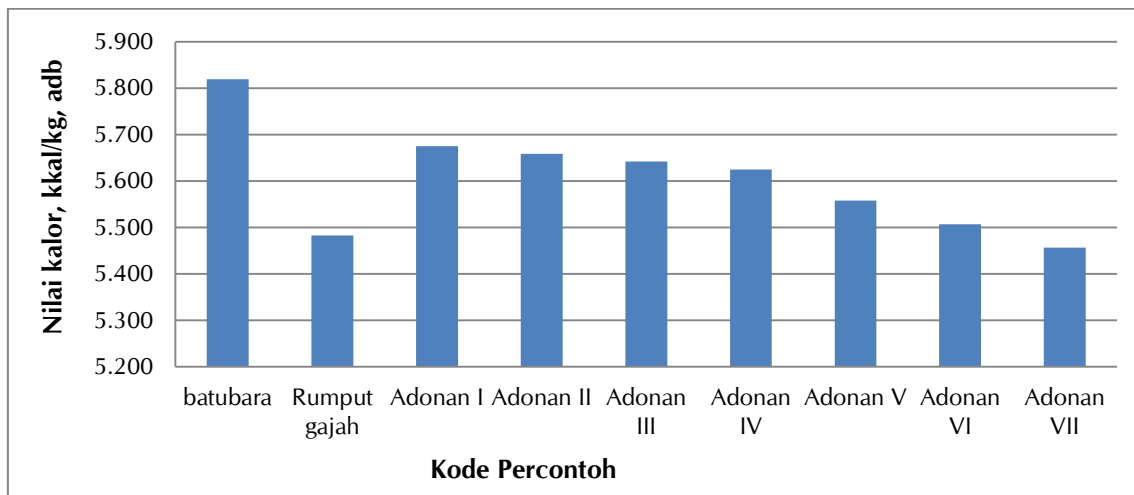
Untuk biomassa batang singkong, hasil terefaksi telah mendapatkan nilai kalor yang tinggi mencapai 7.354 kkal/kg, adb, meskipun abunya masih relatif tinggi yaitu lebih dari 17,85 %. Kadar abu biomassa batang singkong tanpa terefaksi hanya berkisar 4,05 % (Prakobboon dan Vahdati, 2013). Hal demikian perlu evaluasi sistem proses baik peralatan maupun temperatur dan waktu tinggal proses terefaksi pada batang singkong tersebut. Abu dari batubara maupun dari biomassa berpotensi menimbulkan kerak pada sistem pembakaran maupun peralatan perpindahan panas lainnya yang dilewati gas buang pembakaran *co-firing* paduan batubara-biomassa ini.

Tabel 6. Spesifikasi briket kimia batubara - rumput gajah tertorefaksi dari hasil perhitungan dan spesifikasi fisik kuat tekan dari hasil analisis

No.	Komposisi Adonan	Kode sampel	Spesifikasi						Kuat tekan, kg/cm ²	Keterangan
			Air lembab, % adb	Abu, % adb	Zat terbang, % adb	Karbon padat, % adb	Nilai kalori, kkal/kg, adb			
1	- Batubara, 100%	Batubara	12,34	2,58	48,36	36,72	5.819	-	Bahan baku, hasil analisis	
	- Rumput gajah tertorefaksi, 0%									
	- Tepung tapioka 0%									
2	- Batubara 0%	Rumput	6,01	20,80	39,08	34,10	5.483	-	Bahan baku, hasil analisis	
	- Rumput gajah tertorefaksi, 100%									
	- Tepung tapioka 0%									
3	- Batubara 85%	Adonan I	11,69	4,28	45,15	38,87	5.675	13,4	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi, 10%									
	- Tepung tapioka, 5%									
4	- Batubara 80%	Adonan II	11,37	5,18	44,69	38,74	5.659	22,4	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi 15%									
	- Tepung tapioka 5%									
5	- Batubara 75%	Adonan III	11,05	6,10	44,23	38,62	5.642	17	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi 20%									
	- Tepung tapioka 5%									
6	- Batubara 70%	Adonan IV	10,73	7,00	43,76	38,47	5.625	13,9	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi 25%									
	- Tepung tapioka 5%									
7	- Batubara 50%	Adonan V	9,47	10,33	41,90	38,43	5.558	9,9	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi 45%									
	- Tepung tapioka 5%									
8	- Batubara 35%	Adonan VI	8,52	13,38	40,52	37,58	5.507	9,4	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi 60%									
	- Tepung tapioka 5%									
9	- Batubara 20%	Adonan VII	7,57	16,11	39,12	37,16	5.457	8,6	Briket	
	- Rumput gajah tertorefaksi 75%									
	- Tepung tapioka 5%									



Gambar 6. Spesifikasi briket batubara - rumput gajah Tertorefaksi



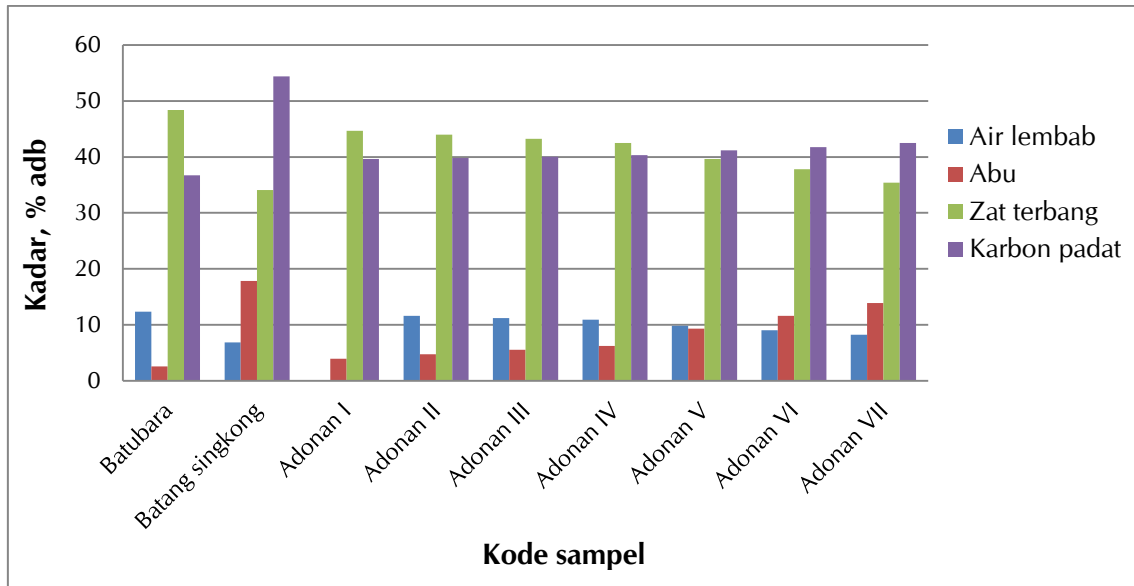
Gambar 7. Nilai kalor briket batubara - rumput gajah tertorefaksi

Data pada Tabel 7, Gambar 8 dan 9 menunjukkan bahwa semakin banyak komposisi biomassa (batang singkong tertorefaksi), semakin sedikit kandungan air lembab. Hal ini terjadi karena kadar air lembab biomassa lebih kecil dari kadar air lembab batubara. Demikian pula semakin banyak komposisi batubara, semakin tinggi kadar air lembab. Perubahan nilai parameter proksimat (kandungan air lembab, abu, zat terbang dan karbon padat) dan nilai kalor pada pencampuran batubara dan biomassa tertorefaksi bersifat linier sehingga perubahan komposisi juga selaras dengan perubahan nilai proksimat dan nilai kalor tersebut. Berdasarkan Gambar 9 terlihat bahwa nilai kalori briket

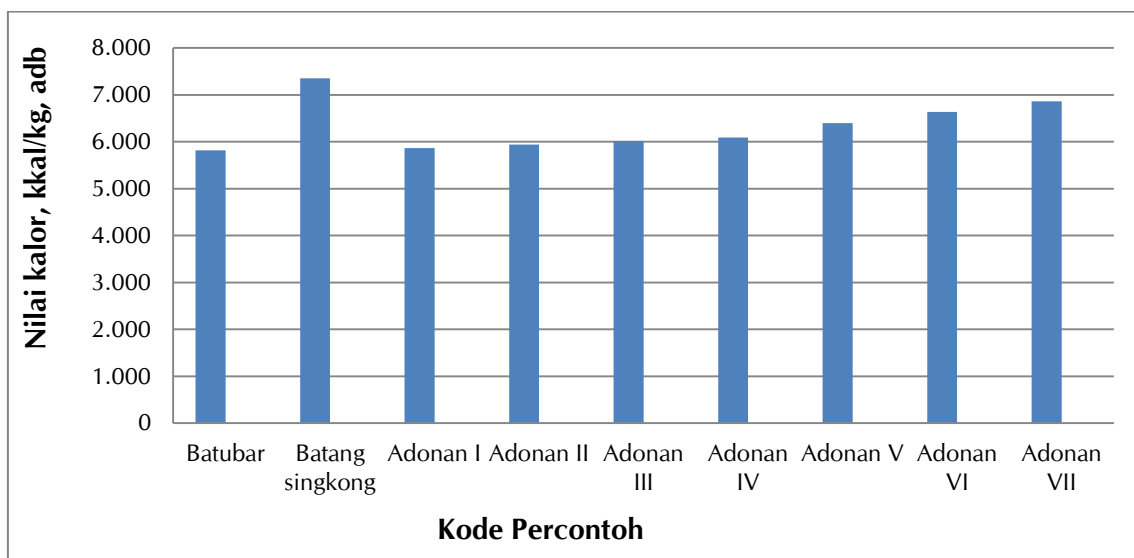
batubara-batang singkong tertorefaksi menaik seiring dengan naiknya komposisi biomassa, karena nilai kalor biomassa tertorefaksi batang singkong lebih tinggi dari nilai kalor batubara. Semua nilai kalor briket dari adonan I sampai dengan VII mempunyai nilai kalor yang besarnya berada antara nilai kalor batubara dengan nilai kalor batang singkong tertorefaksi namun lebih tinggi dari nilai kalor tepung tapioka. Penambahan tepung tapioka sebagai bahan pengikat hanya berpengaruh kecil pada perubahan nilai kalor gabungan karena pada hakekatnya tepung tapioka merupakan material non bahan bakar dengan nilai kalor relatif rendah (Adekunle, Ibrahim dan Kucha, 2015).

Tabel 7. Spesifikasi kimia briket batubara -batang singkong tertorefaksi dari hasil perhitungan dan spesifikasi fisik kuat tekan dari hasil analisis

No.	Komposisi Adonan	Kode sampel	Spesifikasi						Kuat tekan, kkal/kg, adb	Keterangan
			Air lembab, % adb	Abu, % adb	Zat terbang, % adb	Karbon padat, % adb	Nilai kalori, kkal/kg, adb	kg/cm ²		
1	- Batubara 100 %	Batubara	12,34	2,58	48,36	36,72	5.819	-	Bahan baku, hasil analisis	
	- Batang singkong tertorefaksi 0 %									
	- Tepung tapioka 0%									
2	- Batubara 0 %	Batang singkong	6,87	17,85	34,10	41,18	7.354	-	Bahan baku, hasil analisis	
	- Batang singkong tertorefaksi 100 %									
	- Tepung tapioka 0%									
3	- Batubara 85 %	Adonan I	11,77	3,97	44,65	39,61	5.863	18,90	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 10 %									
	- Tepung tapioka 5%									
4	- Batubara 80 %	Adonan II	11,60	4,73	43,96	39,80	5.939	18,90	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 15 %									
	- Tepung tapioka 5%									
5	- Batubara 75 %	Adonan III	11,22	5,53	43,23	40,02	6.019	18,00	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 20 %									
	- Tepung tapioka 5%									
6	- Batubara 70 %	Adonan IV	10,94	6,26	42,50	40,30	6.093	15,70	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 25 %									
	- Tepung tapioka 5%									
7	- Batubara 50 %	Adonan V	9,86	9,32	39,66	41,16	6.400	7,70	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 45 %									
	- Tepung tapioka 5%									
8	- Batubara 35 %	Adonan VI	9,04	11,61	37,79	41,74	6.638	6,30	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 60 %									
	- Tepung tapioka 5 %									
9	- Batubara 20 %	Adonan VII	8,23	13,89	35,38	42,50	6.860	4,50	Briket	
	- Batang singkong tertorefaksi 75 %									
	- Tepung tapioka 5%									



Gambar 8. Spesifikasi briket batubara - batang singkong tertorefaksi



Gambar 9. Nilai kalor briket batubara - batang singkong tertorefaksi

Data kualitas yang tertera pada hasil perhitungan tersebut di atas menunjukkan bahwa briket tersebut cukup memadai sebagai bahan bakar industri dan PLTU karena kadar abunya kurang dari 12,8 % kecuali adonan VII. Adonan tersebut mempunyai kadar abu relatif tinggi karena komposisi batang singkong tertorefaksi sangat tinggi sedang kadar abu pada biomassa tersebut sudah tinggi. Secara interpolasi, maka komposisi batang singkong tertorefaksi dibatasi pada 70 % agar kadar abu adonan lebih rendah dari

12,8 %. Untuk sifat fisik briket batubara-batang singkong tertorefaksi ini telah relatif kuat apabila dibandingkan dengan kualitas briket batubara-biomassa pada umumnya, terutama pada komposisi biomassa sampai dengan 15%. Kuat tekan yang diperoleh mencapai 18,9 kg/cm². Sementara itu, briket batubara dari Thailand pada kadar air lembab 10 % hanya mempunyai kuat tekan sebesar 10,5 kg/cm² (Siritheerasas, Chunniyom dan Sethabunjong, 2008). Data di atas, menyimpulkan bahwa pembriketan campuran

batubara dengan batang singkong tertorefaksi dapat dibuat sampai komposisi maksimal 25 % batang singkong tertorefaksi, batubara 70 % dan bahan pengikat tepung tapioka 5 %. Pada komposisi tersebut nilai kalor tercatat sebesar 6.093 kkal/kg, adb, kadar abu sangat rendah 6,26 % dan kuat tekan cukup memadai sebesar 15,7 kg/cm². Briket tersebut relatif besar nilai kalornya mengingat batubara yang digunakan adalah batubara non torefaksi. Ujicoba pembuatan briket semikokas batubara dan bonggol jagung tertorefaksi di Tanjung Enim dengan komposisi adonan 80 % semikokas batubara dan 20 % bonggol jagung tertorefaksi menghasilkan briket dengan nilai kalor 6.297 kkal/kg (Faizal, 2017). Dari sisi operasional terlihat pembuatan briket tersebut akan lebih mahal karena memerlukan karbonisasi suhu rendah terhadap batubara.

KESIMPULAN

Briket batubara–biomassa tertorefaksi pada komposisi batubara sebanyak 70 %, batang singkong tertorefaksi 25 % dan tepung tapioka sebanyak 5 % tepat untuk bahan bakar sistem *co-firing* pada industri terutama PLTU termasuk kelayakan fisik untuk penanganan material dan emisi debu, berdasarkan nilai kalor dan kadar abu serta sifat fisik berupa kuat tekan memberikan nilai kalor 6.093 kkal/kg, adb, abu kurang dari 12,8 %, kuat tekan mencapai 15,7 kg/cm². Pada komposisi tersebut terbentuk bahan bakar padat cukup memadai untuk pembangkitan energi termal pada industri yang lebih efektif dan efisien (optimal) dari penerapan pemanfaatan sumber daya alam domestik dan berdampak pada pengurangan emisi terutama CO₂ sekaligus merupakan upaya pemanfaatan sumber energi *reweable* dari biomassa tertorefaksi dan mengurangi energi fosil *non renewable*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pemilik tambang batubara Wahau atas kerja sama dalam penyediaan percontohan batubara yang digunakan untuk penelitian di Laboratorium Pengujian Batubara, Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan

Batubara, Bandung. Tak lupa ucapan yang sama kami sampaikan kepada para operator Sentra Teknologi Pemanfaatan Batubara di Palimanan dan para analis Laboratorium Pengujian Batubara Puslitbangtek Minerba, Bandung atas bantuan saat preparasi percontohan dan kegiatan analisis percontohan dan hasil briket batubara–biomassa.

DAFTAR PUSTAKA

- Adekunle, J., Ibrahim, J. and Kucha, E. (2015) 'Proximate and ultimate analyses of biocoal briquettes of Nigerian's Ogboyaga and Okaba sub-bituminous coal', *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(1), pp. 114–123. doi: 10.9734/BJAST/2015/15154.
- BP (2017) *BP Statistical Review of World Energy 2017*. 66th Ed. BP. Available at: https://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_ch/PDF/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf.
- Crnogaca, B. (2017) 'Torrefaction as a process for biomass conversion into biocoal', *Tehnika*, 72(3), pp. 323–327. doi: 10.5937/tehnika1703323C.
- Daulay, B. (2017) 'Perkembangan industri batubara Indonesia', in Daulay, B., Kadapi, M., and Hartiningsih, R. W. (eds) *Teknologi Pemanfaatan Batubara Indonesia*. Jakarta: LIPI Press, pp. 15–37.
- Department for Environment; Food and Rural Affairs (2007) *UK biomass strategy*. London: Crown. Available at: http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0705_Defra_-_UK_Biomass_Strategy_01.pdf.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara (2018) *Laporan kinerja 2017*. Jakarta: Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. Available at: https://www.minerba.esdm.go.id/library/content/file/28935-Lakin_dan_PK_2017/1c91c16e25684db9d5039a874a6748e82018-04-11-10-12-42.pdf.
- Faizal, M. (2017) 'Utilization biomass and coal mixture to produce alternative solid fuel for reducing emission of green house gas', *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(3), p. 950. doi: 10.18517/ijaseit.7.3.2474.
- Hermawati, W., Mahmudi, Maulana, I., Rosaira, I. and Alamsyah, P. (2013) *Sumber daya*

- biomassa: *Potensi energi Indonesia yang terabaikan*. Bogor: IPB Press.
- Himawanto, D. A. (2013) 'Karakteristik mekanik briket biocoal yang dihasilkan dari mesin pembriket tipe screw', *Jurnal Teknik Mesin*, 21(1), pp. 40–44. Available at: <http://journal.um.ac.id/index.php/teknik-mesin/article/view/3692>.
- Lestari, D., Asy'ari, M. A. and Hidayatullah, R. (2016) 'Geokimia batubara untuk beberapa industri', *Jurnal POROS TEKNIK*, 8(1), pp. 48–54. doi: 10.31961/porosteknik.v8i1.381.
- Maciejewska, A., Veringa, H., Sanders, J. and Peteves, S. D. (2006) *Co-firing biomass with coal: Constrains and role of biomass pre treatment*. Luxembourg: European Communities. Available at: http://www.canadiancleanpowercoalition.com/files/7712/8330/1763/BM2_EUR22461EN.pdf.
- Mehmood, S., Reddy, B. V. and Rosen, M. A. (2012) 'Energy analysis of a biomass co-firing based pulverized coal power generation system', *Sustainability*, 4(4), pp. 462–490. doi: 10.3390/su4040462.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (2006) *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 47 Tahun 2006 tentang Pedoman pembuatan dan pemanfaatan briket batubara dan bahan bakar padat berbasis batubara*. Indonesia. Available at: http://psdg.geologi.esdm.go.id/kepmen_pp_uu/permen-esdm-47-2006.pdf.
- Ministry of Energy and Mineral Resources (2017) *Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2017*. Jakarta: Ministry Of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia. Available at: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia-2017-.pdf>.
- Oladunmoye, O. O., Aworh, O. C., Maziya-Dixon, B., Erukainure, O. L. and Elemo, G. N. (2014) 'Chemical and functional properties of cassava starch, durum wheat semolina flour, and their blends', *Food Science & Nutrition*, 2(2), pp. 132–138. doi: 10.1002/fsn3.83.
- Onukak, I., Mohammed-Dabo, I., Ameh, A., Okoduwa, S. and Fasanya, O. (2017) 'Production and characterization of biomass briquettes from tannery solid waste', *Recycling*, 2(4), p. 17. doi: 10.3390/recycling2040017.
- Prakobboon, N. and Vahdati, M. (2013) 'Review of the potensia for co-firing of cassava rhizome for generating heat and power in cassava based bio ethanol plant in Thailand', *International Journal of Biomass & Renewables*, 2(2), pp. 14–22. Available at: http://ijbr.utp.edu.my/uploads/34_111_4yc3f13-12-30.pdf.
- Rismayani, S. and Sjaifudin, A. (2011) 'Pembuatan bio-briket dari limbah sabut kelapa dan bottom ash', *Arena Tekstil*, 26(1), pp. 47–54.
- dos Santos, R. L., Freire, F. J., da Rocha, A. T., da Silva, J. A. A., Tavares, J. A., de Sousa Ferreira, E. G. B. and de Oliveira, E. C. A. (2015) 'Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) biomass production as promising alternative source of energy in Brazil's semiarid area using gypsum', *Australian Journal of Crop Science*, 9(11), pp. 1082–1088. Available at: http://www.cropj.com/santos_9_11_2015_1082_1088.pdf.
- Sirithheerasas, P., Chunnuyom, C. and Sethabunjong, P. (2008) 'Combustion of moist coal briquettes', *Chiang Mai Journal Science*, 35(1), pp. 35–42. Available at: <http://www.thaiscience.info/Journals/Article/CMJS/10905716.pdf>.
- Speight, J. G. (2013) *The chemistry and technology of coal*. 3rd Ed. CRC Press.
- Suganal (2017) 'Pembuatan briket batubara', in Daulay, B., Kadapi, M., and Hartiningsih, R. W. (eds) *Teknologi Pemanfaatan Batubara Indonesia*. Jakarta: LIPI Press, pp. 265–282.
- Sui, J., Xu, X., Zhang, B., Huang, C. and Lv, J. (2013) 'A mathematical model of biomass briquette fuel combustion', *Energy and Power Engineering*, 05(04), pp. 1–5. doi: 10.4236/epe.2013.54B001.
- Surono, U. B. (2010) 'Peningkatan kualitas pembakaran biomassa limbah tongkol jagung sebagai bahan bakar alternatif dengan proses karbonisasi dan pembriketan', *Jurnal Rekayasa Proses*, 4(1), pp. 13–18. doi: 10.22146/jrekpros.570.
- Syamsiro, M. (2016) 'Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torrefaksi', *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, 1(1), pp. 7–13. Available at: <http://ejournal.janabadra.ac.id/index.php/JMST/article/view/SYAMSIRO>.
- Venter, P. and Naude, N. (2015) 'Evaluation of some optimum moisture and binder

- conditions for coal fines briquetting', *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(4), pp. 329–333. doi: 10.17159/2411-9717/2015/v115n4a9.
- Wibowo, S., Laia, D. P. ., Khotib, M. and Pari, G. (2017) 'Karakterisasi Karbon pellet campuran rumput gajah (*pennisetum purpureum scumach*) dan tempurung nyamplung (*calophyllum inophyllum linn*)', *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 35(1), pp. 73–82. Available at: <http://ejournal.fordamof.org/ejournal-litbang/index.php/JPHH/article/view/2520>.
- Wijayapala, W. D. A. S. and Mudunkotuwa, S. R. H. (2016) 'Co-firing of biomass with coal in pulverized coal fired boilers at Lakvijaya Power Plant: A case study', *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 49(3), p. 33. doi: 10.4038/engineer.v49i3.7074.
- Winaya, S., Susila, I. N. D. and Agung, I. B. (2010) 'Co-firing system fludized bed berbahan bakar batubara dan ampas tebu', *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 4(2), pp. 180–188.
- Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z. and Dorosti, S. (2014) 'Physical and chemical properties of coal briquettes from biomass-bituminous blends', *Petroleum & Coal*, 56(2), pp. 188–195. Available at: http://www.vurup.sk/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/07/pc_2_2014_moghaddam_285_re.pdf.