

Pengaruh Torefaksi terhadap Pencucian Potassium dalam Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan

Ari Akbariyanto Wenas^a, Toto Hardianto^b

^{a,b}Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat.
e-mail: ariakbarwenas@gmail.com, totohardianto@yahoo.com

Kata kunci:

Zona Dekomposisi
Tandan Buah Kosong
(TKKS)
Pencucian
Torefaksi

ABSTRAK

Pada tahun 2018, 37,5 juta ton tandan kosong kelapa sawit (TKKS) diproduksi di Indonesia dan berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar padat. Namun, ada dua masalah utama dalam penggunaan TKKS sebagai bahan bakar padat, yaitu nilai kalor yang rendah dan kandungan kalium yang tinggi. Oleh karena itu, EFB perlu melalui beberapa proses terlebih dahulu yaitu *torrefaction* dan *washing*. Namun, ketika torrefaksi dilakukan terlebih dahulu diperkirakan dapat mempengaruhi kinerja pelindian kalium. Metode studi literatur digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui pengaruh torrefaksi terhadap pelindian kalium TKKS. Penelitian diawali dengan pengumpulan data *torrefaction* dan *leaching* dengan perlakuan perendaman dan pengadukan yang dilakukan pada TKKS dari berbagai sumber. Data tersebut kemudian dianalisis dan disimpulkan menjadi 4 zona dekomposisi, yaitu zona rendah ($100^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$), zona sedang ($200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$), zona tinggi ($250^{\circ}\text{C} < T \leq 330$), dan zona ekstrem ($T > 330^{\circ}\text{C}$). Berdasarkan hasil analisis, TKKS pada zona rendah dan zona sedang dipilih sebagai zona yang sesuai untuk dilakukan torrefaksi pada TKKS karena nilai kalor TKKS dapat mencapai nilai kalor batubara peringkat Lignite A, sedangkan untuk zona sedang telah setara dengan batubara peringkat C sub-bituminus. Berdasarkan nilai kalor yang dapat dicapai dengan mempertimbangkan proses *leaching* yang tepat untuk diterapkan, torrefaksi pada 200°C dianggap dapat menghasilkan produk torrefaksi yang optimal untuk TKKS. Kemudian, untuk menurunkan kadar kalium pada zona rendah dan sedang hingga suhu bias 230°C , perlakuan perendaman terbukti dapat menurunkan kadar kalium rata-rata 52,2%. Untuk mengoptimalkan penurunan kandungan kalium, TKKS perlu direndam pada suhu lingkungan dengan perbandingan air cucian terhadap biomassa 30:1 selama minimal 15 menit.

Keyword:

Decomposition Zones
Empty Fruit Bunch (EFB)
Leaching
Torrefaction

ABSTRACT

In 2018, 37.5 million tons of palm oil empty fruit bunches (EFB) were produced in Indonesia and have the potential to be used as solid fuel. However, there are two main problems in using EFB as a solid fuel, which are low heating value and high potassium content. Therefore, EFB needs to go through several processes first, namely torrefaction and washing. However, when torrefaction is carried out first is thought to be able to affect the potassium leaching performance. The literature study method was used in this study to investigate the influence of the torrefaction on the potassium leaching of EFB. The research is begun by gathering data of torrefaction and leaching by soaked and stirred treatment, carried out on EFB from various sources. Then, the data is analyzed and concluded into 4 decomposition zones, namely the low zone ($100^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$), the moderate zone ($200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$), the high zone ($250^{\circ}\text{C} < T \leq 330^{\circ}\text{C}$), and the extreme zone ($T > 330^{\circ}\text{C}$). Based on the results of the analysis, TKKS in the low zone and the moderate zone are selected as the appropriate zone to do torrefaction on EFB because the heating value of EFB could achieve Lignite A rank coal heating value, while for the medium zone has been equivalent to sub-bituminous C rank coal. Based on the heating value that can be achieved while considering the right leaching process to be applied, torrefaction at 200°C is considered could produce the optimal torrefaction products for EFB. Then, to reduce the potassium content in low and moderate zones

to a refractive temperature of 230°C, the soaked treatment has been proven to reduce potassium content by an average of 52.2%. As for optimizing the reduction in the potassium content, EFB needs to be soaked at environmental temperatures with a ratio of washing water to the biomass of 30:1 for at least 15 minutes.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan untuk mencari sumber energi baru dan terbarukan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pemakaian energi. Selain karena keterbatasan sumber daya, sumber energi fosil juga memiliki permasalahan di bidang lingkungan. Biomassa sebagai salah satu bentuk sumber energi terbarukan sangat tepat untuk digunakan sebagai pengganti sumber energi fosil saat ini.

Kelapa sawit sangat populer dibudidayakan di kawasan Asia Tenggara untuk pemanfaatan minyak kelapa sawit. Indonesia tercatat menghasilkan 42,8 juta ton minyak kelapa sawit mentah pada tahun 2018 [1] dan menjadikan Indonesia sebagai negara penghasil minyak kelapa sawit mentah terbesar di dunia. Pemanfaatan minyak kelapa sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO) sangat beragam, mulai dari bahan baku pengolahan minyak goreng, kosmetik, hingga campuran bahan bakar cair. Indonesia telah mulai memanfaatkan CPO sebagai campuran bahan bakar cair yang dikenal sebagai B30 [2]. Namun, dalam proses pengolahannya, kelapa sawit menghasilkan 3 jenis limbah padat, yaitu serat, cangkang, dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) [3].

Dalam pabrik kelapa sawit, keberadaan serat dan cangkang telah dimanfaatkan langsung sebagai bahan bakar boiler bahkan diimpor ke luar negeri. Hal ini dikarenakan nilai kalor dan cangkang cukup tinggi dan telah mampu menggantikan penggunaan batu bara dengan kelas sub-bituminus C [4][5][6][7].

Dari segi ketersediaan jumlah yang berlimpah dan melihat pemanfaatannya yang masih kurang saat ini, TKKS sangat berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan bakar padat. Namun demikian, TKKS memiliki nilai kalor yang sangat rendah jika dibandingkan dengan dua limbah padat lainnya dan batu bara di Indonesia [4][5][6][7]. Jika dihitung pada tahun 2018, Indonesia dapat menghasilkan 37,5 juta ton TKKS [1][3] yang mampu setara dengan 1GWe yang dihasilkan sepanjang tahun jika digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik.

Akan tetapi sebagai biomassa, TKKS diketahui memiliki kandungan air yang sangat tinggi mencapai 60wt% [8][9]. Kandungan air yang tinggi ini dapat mengurangi energi panas yang seharusnya dapat dimanfaatkan. Selain itu, hal yang paling utama adalah ditemukannya kandungan mineral abu yang sangat tinggi di dalam TKKS. Mineral dominan yang terkandung di dalam TKKS adalah potassium yang mencapai 48,94wt% dari abu sisa pembakaran TKKS [4]. Kandungan potassium yang tinggi inilah yang menjadikan TKKS dimanfaatkan sebagai pupuk perkebunan [10]. Akan tetapi sebagai bahan bakar, keberadaan mineral yang tinggi tidak diperlukan karena dapat memberikan kerugian yang besar. Ketika dilakukan proses pembakaran di dalam tungku pembakaran, kandungan mineral yang tinggi, terutama logam alkali sangat berpotensi untuk membentuk kerak di bagian dalam tungku. Terbentuknya kerak dapat menurunkan performa konversi energi yang seharusnya dapat dilakukan. Oleh karena itu, keberadaan mineral di dalam bahan bakar harus dikurangi bahkan dihilangkan [4][11].

Studi ini akan membahas peningkatan nilai kalor TKKS dengan torefaksi yang diduga dapat memengaruhi pengurangan kandungan potassium melalui pencucian.

2. METODE PENELITIAN

Dalam rangka meningkatkan kualitas tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai bahan bakar padat, perlu ditentukan target peningkatan kualitas bahan bakar padatnya. Studi ini akan membahas peningkatan kualitas tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan bakar padat yang mampu menggantikan penggunaan batu bara. Dengan demikian, target peningkatan kualitas bahan bakar padat adalah batu bara yang banyak digunakan di Indonesia, yaitu batu bara kelas rendah (*low rank coal*) atau batu bara kelas sub-bituminus C (berdasarkan ASTM D388).

2.1. Sifat dan Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit

Kelapa sawit merupakan tanaman yang sengaja dibudidayakan untuk keperluan industri, seperti bahan baku minyak masak, bahan baku kosmetik, hingga bahan baku energi. Dari perkebunan kelapa sawit, dipanen tandan buah segar dalam kondisi buah kelapa sawit dirontokkan dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) untuk diproses lebih lanjut. Dari proses pengolahan satu tandan buah segar kelapa sawit, diperoleh 21wt% TKKS[3]. TKKS dapat dikatakan sebagai biomassa dengan basis lignoselulosa. Komponen lignoselulosa dari TKKS sangat bervariasi, tetapi diketahui bahwa komponen hemiselulosa dan selulosa merupakan komponen yang paling dominan seperti yang tertera pada Tabel 1.

Untuk menjadikan TKKS sebagai bahan bakar padat yang mampu setara dengan batu bara, perlu dibandingkan karakteristik TKKS terhadap batu bara. Oleh karena itu, dalam studi ini akan dibandingkan nilai kalor dan kandungan potassium dari TKKS terhadap batu bara.

2.2. Sifat dan Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit memiliki nilai kalor yang jauh di bawah batu bara sub-bituminus C sehingga belum dapat digunakan secara langsung sebagai sumber energi pada pembangkit listrik. Untuk itu, TKKS perlu dipersiapkan terlebih dahulu dengan tujuan meningkatkan nilai kalornya agar setara dengan batu bara. Ada banyak cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan densitas energi dari suatu biomassa. Peningkatan tersebut dapat dicapai dengan cara meningkatkan kandungan bahan bakar pada suatu material. Kandungan bahan bakar yang dimaksud adalah karbon tetap dan sebagian kecil dari komponen zat terbang.

Tabel 1 Komposisi lignoselulosa di dalam TKKS

Lignoselulosa TKKS (wt%)			Ref.
Lignin	Hemiselulosa	Selulosa	
27,6 – 32,5	25,3 – 33,8	37,3 – 46,5	[12]
18,1	22,1	59,7	[13]
22,8	21,2	57,8	[14]
22,1	35,3	38,3	[15]
25,15	30,61	44,24	[16]
22,21	35,3	38,3	[17]
17,9	56,4	16,3	[18]

Diagram Van Krevelen dapat menunjukkan rasio karbon terhadap oksigen dan hidrogen. Melalui diagram Van Krevelen, dapat diketahui bahwa biomassa memiliki rasio O/C dan H/C yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan batu bara, membuat batu bara memiliki nilai kalor yang jauh lebih tinggi dibandingkan biomassa [19].

Proses pengeringan merupakan salah satu proses yang dapat meningkatkan rasio karbon di dalam biomassa. Secara definisi, pengeringan dapat digambarkan sebagai proses pengurangan kandungan air dari suatu material akibat energi panas. Proses pengeringan mampu mengurangi kandungan air dari dalam biomassa, tetapi hanya kandungan air permukaan. Akan tetapi, biomassa diketahui mengandung banyak air mencapai 60wt%. Akibat adanya pengurangan kandungan air dari biomassa melalui proses pengeringan, kandungan hidrogen dan oksigen di dalam biomassa pun dapat berkurang banyak. Pengurangan tersebut membuat rasio kandungan karbon di dalam biomassa dapat meningkat, sesuai dengan penggambaran yang dilakukan pada diagram Van Krevelen. Akan tetapi, besarnya peningkatan nilai kalor melalui proses pengeringan sangat terbatas terhadap seberapa banyak kandungan air yang dapat dikurangi. Proses pengeringan tidak memberikan efek lain terhadap

biomassa, bahkan masih terdapat kemungkinan kandungan air terserap kembali ke dalam biomassa akibat sifat hidrofilik biomassa.

Proses perlakuan lain yang telah diteliti dan terbukti dapat meningkatkan nilai kalor adalah proses torefaksi. Proses torefaksi merupakan salah satu bentuk proses pirolisis, yaitu proses termokimia yang dilakukan pada kondisi tanpa oksigen (inert) dalam durasi waktu tertentu. Melalui proses pirolisis, dekomposisi termal terjadi pada biomassa dan dapat menghasilkan produk gas, cair, dan padat. Proses torefaksi merupakan proses pirolisis ringan yang terjadi pada rentang temperatur 200°C hingga 300°C [20][21][22]. Ada banyak faktor yang dapat memengaruhi proses torefaksi, antara lain adalah temperatur dan durasi waktu tinggal [23][24][25]. Temperatur proses torefaksi sangat berkaitan dengan dekomposisi termal yang terjadi. Apabila temperatur proses semakin meningkat, maka dekomposisi yang terjadi akan semakin banyak, sedangkan durasi waktu tinggal sangat memengaruhi seberapa lama proses dapat berlangsung. Secara sederhana, semakin lama durasi waktu tinggal, dekomposisi termal yang mungkin terjadi akan semakin banyak.

Proses torefaksi tepat untuk dilakukan pada biomassa basis lignoselulosa karena dekomposisi lignoselulosa terjadi pada rentang temperatur torefaksi [26]. Dekomposisi yang terjadi pada lignoselulosa mengakibatkan biomassa mengalami perubahan struktur kimia sehingga densitas energi yang dihasilkan melalui proses torefaksi akan lebih tinggi. Proses torefaksi berlangsung pada temperatur yang lebih rendah dibanding jenis proses pirolisis lainnya. Hal ini memungkinkan laju pemanasan yang lebih lambat sehingga dapat menghasilkan produk padatan yang lebih dominan [19].

Secara umum, proses torefaksi dapat dibagi menjadi tiga mekanisme, yaitu depolimerisasi, devolatilisasi, dan karbonisasi [20][27]. Biomassa mengalami depolimerisasi yang merupakan penguraian rantai polimer sehingga menjadi ikatan yang lebih sederhana. Komposisi kimia dari biomassa akan berubah karena proses depolimerisasi. Penyederhanaan ikatan kimia dapat berupa pembentukan ikatan baru hingga mengurangi komponen kimia tertentu. Mekanisme pengurangan komponen kimia dalam bentuk zat terbang dari padatan biomassa disebut sebagai devolatilisasi. Setelah terjadinya penyederhanaan dan pengurangan zat tertentu akibat dekomposisi, rasio karbon pada biomassa akan meningkat. Peningkatan rasio karbon pada padatan biomassa disebut sebagai karbonisasi. Akan tetapi sebelum mekanisme proses torefaksi berlangsung, kandungan air pada permukaan biomassa (surface moisture) akan berkurang saat awal proses pemanasan. Pada rentang temperatur ini, belum terjadi perubahan komposisi kimia. Kemudian, pada pemanasan yang lebih lanjut, kandungan air terikat (inherent moisture) ikut berkurang dari biomassa.

Mulai dari temperatur 150°C, terjadi proses pengeringan yang reaktif sehingga terjadi perubahan komposisi kimia. Hal ini dikarenakan komponen lignoselulosa pada biomassa, yaitu lignin, hemiselulosa, dan selulosa mulai mengalami dekomposisi. Lignin merupakan komponen lignoselulosa yang pertama kali mengalami dekomposisi. Dekomposisi lignin dimulai pada temperatur 180°C dengan puncak laju dekomposisi lignin yang baru dimulai pada temperatur sekitar 360°C hingga 400°C. Pada rentang sekitar temperatur torefaksi, lignin mengalami reaksi dehidrasi pada rantai alkil yang membuat senyawa H₂O berkurang. Selain itu, rasio O/C dan H/C juga mengalami pengurangan dalam bentuk zat terbang seperti HCHO, CO₂, dan CO [28].

Selulosa yang merupakan salah satu komponen lignoselulosa yang dominan pada TKKS, baru mengalami dekomposisi pada temperatur sekitar 280°C. Puncak dekomposisi selulosa dimulai pada temperatur 300°C hingga 340°C. Tidak seperti lignin, pada rentang proses torefaksi, selulosa hanya mengalami dehidrasi dan melepaskan H₂O [28].

Untuk komponen hemiselulosa, dekomposisi mulai terjadi pada temperatur yang rendah seperti lignin, tetapi peningkatan laju dekomposisi telah muncul pada temperatur 200°C. Kemudian hemiselulosa akan mengalami puncak dekomposisi pada temperatur 290°C dan berakhir pada temperatur sekitar 350°C. Pada rentang temperatur proses torefaksi, komponen hemiselulosa melewati berbagai mekanisme, seperti dehidrasi, depolimerisasi, dan fragmentasi. Mekanisme-mekanisme tersebut menghasilkan zat terbang seperti H₂O, CH₃OH, CO₃, asam format, asam asetat, furfural, CO₂, hingga CO [28].

Apabila memandang dari ruang lingkup sel dan jaringan, proses torefaksi memberikan efek destruktif mulai dari temperatur 200°C. Di bawah temperatur tersebut, sel tumbuhan baru mengalami

deformasi pada temperatur sekitar 150°C yang menandakan perubahan struktur kimia baru terjadi. Akan tetapi, untuk kandungan seperti air, protein, dan lemak, akan mulai terdekomposisi pada temperatur 100°C. Karena sangat berkaitan dengan dekomposisi secara termal, proses torefaksi sangat bergantung kepada temperatur dan durasi waktu tinggal sebagai parameter proses[20].

Tandan kosong kelapa sawit atau TKKS merupakan salah satu biomassa dengan komponen lignoselulosa yang dominan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh P. Ninduangdee et al., diketahui bahwa pada rentang temperatur torefaksi, yaitu 250°C hingga 330°C, tandan kosong kelapa sawit secara aktif mengalami dekomposisi termal [18]. Pengurangan massa TKKS dapat mencapai 50wt% setelah mengalami proses torefaksi pada temperatur 330°C.

2.3. Pengurangan Kandungan Potassium

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh S. Novianti et al., kandungan potassium pada TKKS ditemukan sebesar 48,94 wt% dari sisa abu pembakaran yang menjadikan potassium sebagai mineral yang dominan ditemukan pada TKKS [4]. Keberadaan mineral pada abu sangat penting untuk dikurangi bahkan dihilangkan. Hal ini dikarenakan keberadaan mineral dapat meningkatkan potensi terbentuknya kerak pada tungku pembakaran [29]. Potassium memiliki titik leleh pada temperatur 63,5°C dan titik penguapan pada temperatur 759°C. Jarak yang jauh antara titik leleh dan titik penguapan memungkinkan kerak untuk terbentuk. Keberadaan kerak di dalam tungku pembakaran dapat mengganggu proses perpindahan panas selama proses pembakaran berlangsung.

Kandungan potassium dapat dikurangi melalui proses pencucian. Proses ini dikatakan sederhana karena potassium dapat dengan mudah dicuci menggunakan air. Hal ini dimungkinkan karena potassium memiliki kelarutan yang tinggi terhadap air. Karena proses pencucian kandungan potassium sangat bergantung kepada nilai kelarutannya terhadap air, parameter proses yang memengaruhi proses pencucian adalah seperti rasio air pencuci terhadap biomassa, temperatur air pencuci, dan durasi pencucian [30][31]. Rasio air pencuci terhadap biomassa memengaruhi seberapa banyak kandungan potassium dapat larut ke dalam air. Semakin banyak air pencuci yang digunakan, tingkat kejenuhan air pencuci akan semakin tinggi sehingga akan semakin banyak potassium yang dapat larut dan dicuci dari biomassa [14].

Di sisi lain, temperatur air pencuci memengaruhi tingkat kejenuhan air terhadap potassium [32]. Dengan meningkatnya temperatur, kandungan potassium yang dapat dicuci semakin banyak. Durasi pencucian juga berpengaruh terhadap seberapa lama proses pencucian berlangsung. Semakin lama proses pencucian dilakukan, semakin banyak pula kandungan potassium yang dapat dicuci. Akan tetapi, karena air memiliki tingkat kejenuhan terhadap kandungan potassium, durasi proses pencucian perlu diatur agar mendapatkan hasil yang optimal[14].

Selain parameter proses tersebut, tipe perlakuan pencucian dapat memengaruhi seberapa banyak kandungan potassium dapat dikurangi melalui proses pencucian. Hal ini dikarenakan kandungan potassium dapat dikurangi hanya ketika bertemu dengan air pencuci. Pemilihan perlakuan proses pencucian yang tepat didasari oleh karakteristik fisik padatan. Sebagai tambahan, bagaimana zat terlarut berada pada padatan akan memengaruhi proses pencucian. Zat terlarut tersebut bisa jadi berada pada permukaan luar padatan, dikelilingi oleh matriks inert material padatan, terdapat di dalam sel atau yang berikatan secara kimia [33]. Oleh karena itu, pemilihan tipe perlakuan proses pencucian harus disesuaikan agar kandungan potassium dapat tercuci lebih banyak.

Pada tumbuhan, sebagian besar kandungan potassium terletak pada bagian sitoplasma, tepatnya pada bagian sitosol dan vakuola [34]. Potassium pada sel tumbuhan memiliki peran antara lain dalam proses fisiologis dan metabolisme sel. Oleh karena itu, potassium biasanya dibutuhkan oleh tanaman untuk tetap subur sehingga banyak pupuk diproduksi dengan kandungan potassium. Secara alami, proses keluar masuknya zat pada sel tumbuhan diatur oleh dinding sel dan membran sel tumbuhan sehingga air pencucian harus dipaksa bertemu dengan kandungan potassium

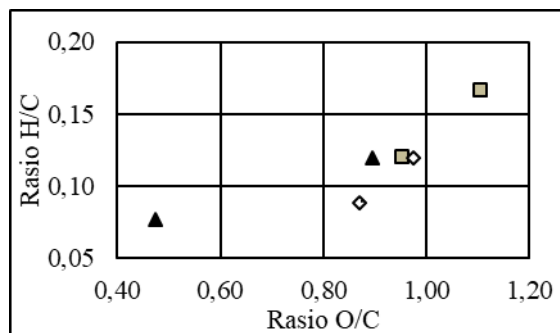
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini akan membahas bagaimana hasil torefaksi dan pencucian yang dilakukan pada tandan kosong kelapa sawit (TKKS) berdasarkan data dan studi dari berbagai literatur yang dikumpulkan.

Selain itu, analisis terhadap kemungkinan pengaruh terhadap TKKS yang ditorefaksi terlebih dahulu akan dilakukan sebelum proses pencucian dilakukan.

3.1. Proses Torefaksi pada Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

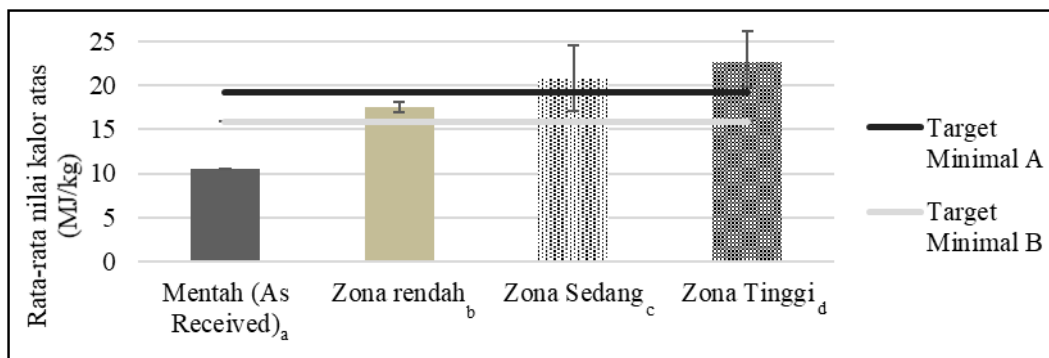
Torefaksi adalah salah satu bentuk proses pirolisis, yaitu proses termokimia yang memanfaatkan panas pada temperatur 200°C hingga 300°C tanpa oksigen[35]. Proses torefaksi tepat dilakukan untuk biomassa karena komponen lignoselulosa secara aktif terurai secara termal dalam kisaran temperatur torefaksi. Gambar di bawah ini menunjukkan peningkatan rasio karbon TKKS setelah ditorefaksi pada kisaran temperatur $100^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$, $200^{\circ}\text{C} \leq T < 250^{\circ}\text{C}$, dan $250^{\circ}\text{C} \leq T < 330^{\circ}\text{C}$ yang ditampilkan dalam diagram Van Krevelen.



Gambar 1 Diagram Van Krevelen dari batas atas dan bawah rasio karbon TKKS yang ditorefaksi [17][36][37][38].

Perubahan rasio karbon yang terjadi melalui proses torefaksi terjadi karena dekomposisi termal komponen lignoselulosa. Penurunan rasio O/C dan H/C dapat menunjukkan pola peningkatan nilai kalor dan menunjukkan fenomena yang menyebabkan perubahan fisik dan sifat hidrofobik sebagai akibat dari dekomposisi termal yang terjadi. Secara umum, terjadi peningkatan rasio karbon pada TKKS seiring peningkatan temperatur torefaksi. Pada beberapa temperatur, dampak yang diberikan terhadap rasio karbon sangat signifikan. Namun, jika diperhatikan lebih lanjut, peningkatan rasio karbon yang terjadi tidak sama untuk masing-masing rentang temperatur. Perbedaan ini terbentuk karena proses dekomposisi yang terjadi pada setiap rentang temperatur juga berbeda.

Pada temperatur di bawah 200°C, peningkatan rasio karbon sangat besar terjadi, tetapi dapat diasumsikan perubahan yang terjadi tidak disebabkan oleh dekomposisi lignoselulosa, tetapi disebabkan oleh pengurangan kandungan air [4][20]. Dalam kisaran 200°C hingga 250°C, peningkatan rasio karbon yang terjadi tidak terlalu besar. Hal ini disebabkan oleh dekomposisi lignoselulosa baru saja dimulai pada kisaran temperatur tersebut yang terdiri atas dekomposisi hemiselulosa yang baru saja dimulai dan dekomposisi lignin yang tidak signifikan. Di antara komponen lignoselulosa dalam TKKS, hemiselulosa adalah salah satu komponen yang paling dominan. Pada temperatur yang lebih tinggi, peningkatan rasio karbon yang terjadi cukup besar karena puncak dekomposisi hemiselulosa yang baru saja selesai pada 290°C. Selain itu, dekomposisi selulosa muncul sekitar 300°C[28]. Pada temperatur yang lebih tinggi, hemiselulosa mengalami mekanisme dehidrasi yang membuat H₂O dilepaskan, menyebabkan lebih banyak oksigen dan hidrogen berkurang dari biomassa. Diketahui bahwa puncak dekomposisi selulosa akan berakhir pada 340°C dan lignin pada 360°C yang mengakibatkan dekomposisi lignoselulosa akan berada pada kondisi ekstrem dan akan ada lebih banyak oksigen dan hidrogen yang dilepaskan pada temperatur yang lebih tinggi [28].



Gambar 2 Nilai kalor rata-rata TKKS kondisi mentah dan TKKS yang telah ditorefaksi pada rentang temperatur tertentu

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, peningkatan rasio karbon menyebabkan peningkatan nilai karbon. Pada Gambar 2 ditunjukkan data rata-rata nilai kalor TKKS kondisi mentah dan TKKS yang ditorefaksi pada rentang temperatur $100^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$, $200^{\circ}\text{C} \leq T < 250^{\circ}\text{C}$, dan $250^{\circ}\text{C} \leq T < 330^{\circ}\text{C}$ dengan durasi waktu tinggal berbeda yang telah dikumpulkan dari berbagai literatur. Sama seperti peningkatan rasio karbon, peningkatan nilai kalor juga terkait dengan dekomposisi yang terjadi selama torefaksi.

Berkaca pada perubahan yang terjadi terhadap rasio karbon, nilai kalor TKKS juga akan meningkat melalui mekanisme yang sama dan akan memiliki pola yang sama. Pada temperatur yang lebih rendah, proses utama yang terjadi adalah pengeringan yang menghasilkan peningkatan nilai kalor seperti yang telah dibahas sebelumnya. Namun, pada kisaran 200°C hingga 250°C , peningkatan nilai kalor tidak begitu besar karena dekomposisi yang terjadi juga tidak banyak. Mulai dari 250°C , ketika komponen hemiselulosa akan mengalami puncak dekomposisi, nilai kalor TKKS akan meningkat lebih besar. Jika dibandingkan, proses torefaksi dapat menghasilkan bahan bakar padat dari TKKS dengan nilai kalor yang mampu setara dengan batu bara lignit A (batu bara kelas rendah) pada 200°C dan dapat mencapai nilai kalor yang lebih tinggi dan mencapai batu bara bituminus (batu bara kelas menengah) pada 300°C .

3.2. Proses Pencucian pada Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Pengurangan kandungan potassium akan ditinjau melalui proses pencucian menggunakan air sebagai media pencuci dan dibagi berdasarkan perlakuan perendaman dan pengadukan. Analisis pengurangan potassium melalui proses pencucian akan diperkirakan melalui data dari berbagai literatur. Tabel 2 berikut menunjukkan pengurangan abu dari TKKS dengan perlakuan perendaman.

Tabel 2 Pengurangan kandungan abu dari TKKS dengan metode perendaman [14]

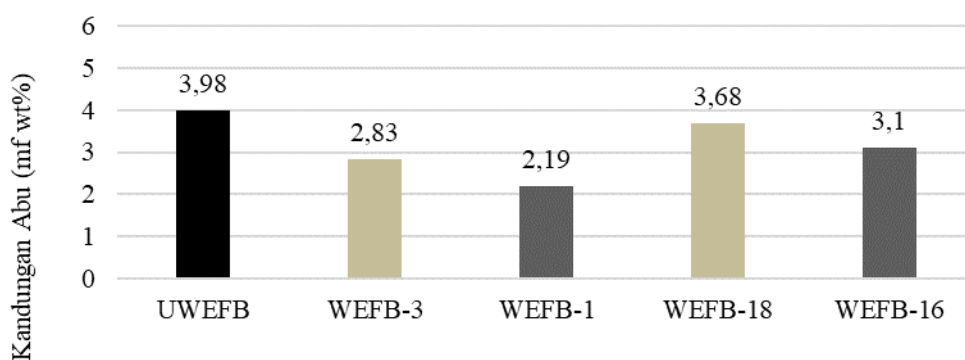
Parameter		Pengurangan Abu
Waktu Tinggal (menit)	Rasio Air:Biomassa	
Kondisi Mentah		n/a
5	50 : 1	48,7%
10	50 : 1	57,4%
20	50 : 1	68,0%
30	50 : 1	70,3%
5	30 : 1	42,6%
10	30 : 1	50,1%
15	30 : 1	53,2%
20	30 : 1	58,2%
25	30 : 1	62,0%
30	30 : 1	63,6%
5	20 : 1	38,5%

5	25 : 1	39,3%
5	30 : 1	42,6%
5	35 : 1	45,7%
5	40 : 1	46,2%
5	50 : 1	48,7%

Data tersebut digunakan karena diketahui bahwa potassium merupakan kandungan abu yang paling dominan dari TKKS [4]. Penelitian yang dilakukan oleh Abdullah et al. menunjukkan penurunan kandungan potassium sebagai hasil dari perendaman TKKS dengan parameter waktu tinggal dan rasio air pencucian terhadap biomassa[14]. Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 2, waktu tinggal memengaruhi berapa lama proses berlangsung untuk mengurangi kandungan potassium. Kandungan potassium dalam sel tumbuhan terletak pada bagian sitosol dan vakuola[34]. Dalam kondisi normal, masuk dan keluarnya zat/material diatur oleh dinding sel dan membran sel tumbuhan. Oleh karena itu, proses pencucian membutuhkan waktu bagi air untuk bersentuhan dengan kandungan potassium. Durasi pencucian yang lebih lama dapat mengurangi kandungan potassium lebih banyak. Melalui penelitian yang sama, ditunjukkan bahwa semakin banyak air yang digunakan, maka semakin banyak kandungan potassium yang dapat dikurangi dari TKKS. Jumlah air yang digunakan sangat memengaruhi tingkat kejenuhan potassium dalam air. Oleh karena itu, agar dapat mengurangi kandungan potassium lebih banyak, tingkat kejenuhan potassium di dalam air perlu dihindari, dengan salah satu caranya ada memperbanyak jumlah air pencuci.

Pencucian yang direndam mampu mengurangi kandungan potassium dari TKKS mentah hingga rata-rata 52,2% [14]. Pengurangan terbesar ditemukan dalam perlakuan waktu tinggal 30 menit dengan menggunakan 50 liter air. Sementara itu, pengurangan terkecil ditemukan sebesar 38,5% dengan perendaman selama 5 menit dengan menggunakan 20 liter air. Hasil pengurangan kandungan potassium yang ditemukan dalam penelitian ini cukup besar karena proses pencucian dilakukan pada TKKS dalam kondisi mentah.

Sementara itu, data yang digunakan untuk menganalisis pencucian dengan pengadukan diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Fuad et al. yang menunjukkan pengurangan kandungan abu akibat proses pencucian dengan pengadukan pada kecepatan yang berbeda[39]. Data ini digunakan karena telah diketahui bahwa potassium merupakan kandungan abu yang paling dominan dari TKKS[4]. Rasio air pencuci terhadap biomassa dan durasi waktu tinggal juga dijadikan parameter proses. Mirip dengan hasil yang ditunjukkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Abdullah et al., semakin banyak jumlah air pencuci yang digunakan, maka akan semakin banyak kandungan potassium yang dapat dikurangi. Hal yang sama juga berlaku untuk pengaruh yang diberikan oleh durasi waktu tinggal[39]. Namun, efek yang diberikan oleh kecepatan pengadukan tidak sesuai dengan asumsi awal bahwa proses pencucian dengan agitasi mampu mengurangi lebih banyak potassium dari TKKS.



Gambar 3 Pengurangan kandungan abu TKKS melalui pengadukan dengan kecepatan 180 dan 540 rpm selama 30 dan 120 menit[39]

Tren yang ditunjukkan dari peningkatan kecepatan pengadukan tetap menunjukkan penurunan kandungan abu, tetapi pada kecepatan pengadukan yang lebih tinggi, kandungan abu yang dapat dicuci menjadi berkurang. Hal ini dapat terjadi kemungkinan karena pada kecepatan yang sangat tinggi, pergerakan air akan lebih acak sehingga menyebabkan air pencuci tidak mampu menembus lapisan luar biomassa melalui pori-pori permukaan. Ada juga kemungkinan bahwa air pencuci dapat masuk ke dalam tetapi karena kecepatan rotasi yang tinggi, campuran air pencuci dan potassium terperangkap karena gaya sentrifugal yang besar.

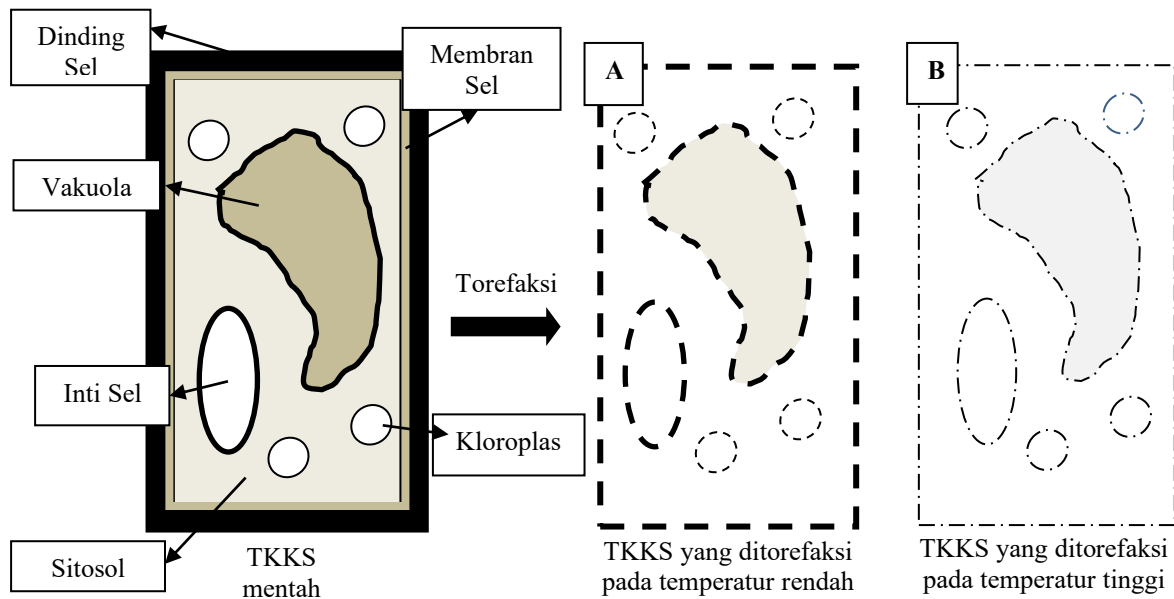
Dari kedua jenis metode pencucian tersebut, dapat disimpulkan bahwa perendaman mampu menghasilkan pengurangan potassium yang lebih baik untuk TKKS. Sebagai catatan, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mencari tahu lebih lanjut efek pengadukan pada pengurangan potassium. Selain itu, proses perendaman menggunakan lebih sedikit energi dari pada proses pengadukan karena tidak memerlukan energi tambahan untuk agitasi.

3.3. Pengaruh Torefaksi terhadap Kemampuan Pencucian Potassium pada Tandan Kosong Kelapa Sawit

Sebelumnya telah dibahas mengenai peningkatan nilai kalor tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui proses torefaksi. Dari pembahasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa torefaksi memberikan hasil yang lebih baik dalam meningkatkan nilai kalor. Selain itu, torefaksi dapat mengurangi sifat higroskopis biomassa sehingga membuat TKKS tidak dapat menyerap kembali kadar air dari lingkungan. Torefaksi juga dikenal mampu menghasilkan produk yang mudah hancur (*grindability* yang tinggi). Dari pembahasan sebelumnya, juga telah dibahas tentang cara mengurangi kandungan potassium dari TKKS. Melalui proses pencucian, dapat disimpulkan bahwa perendaman TKKS menghasilkan pengurangan potassium yang sama bahkan mampu lebih banyak daripada pencucian yang diaduk.

Akan tetapi, tujuan utama studi ini adalah untuk meningkatkan kualitas TKKS secara keseluruhan sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar padat alternatif yang setara batu bara dengan nilai kalor yang tinggi dan kandungan potassium yang sedikit atau bahkan tidak ada. Pada bagian selanjutnya, akan dibahas pengaruh proses torefaksi yang dilakukan terlebih dahulu pada TKKS sebelum dilakukan proses melalui studi literatur dan data yang telah diperoleh sebelumnya, untuk mendapatkan lebih banyak pemahaman tentang bagaimana cara untuk meningkatkan kualitas TKKS secara keseluruhan sebagai bahan bakar padat alternatif yang setara batu bara.

Efek dari proses torefaksi yang diasumsikan dapat memengaruhi pengurangan kandungan potassium melalui proses pencucian adalah perubahan fisik dan sifat hidrofobik yang timbul akibat dekomposisi termal. Perubahan bentuk fisik yang terjadi akibat torefaksi dianggap dapat membantu kemampuan proses pencucian dalam mengurangi kandungan potassium TKKS. Anggapan itu disimpulkan karena proses pencucian memanfaatkan kelarutan potassium di dalam air sehingga kemampuan pencucian sangat dipengaruhi oleh berapa banyak air pencuci bertemu dengan kandungan potassium [12][18][36].



Gambar 4 Ilustrasi perubahan fisik sel tumbuhan TKKS akibat proses torefaksi.

Dalam sel tumbuhan, kandungan kalium tersebar di sitoplasma, tepatnya pada bagian sitosol dan vakuola[34]. Sitosol adalah cairan yang mengisi bagian dalam sel dimana komposisi utamanya disusun oleh air, sedangkan vakuola adalah gudang penyimpanan yang berisi air terlarut dan diselubungi oleh membran. Sel tumbuhan memiliki perbedaan dari sel lain. Sel tumbuhan memiliki dinding sel yang berada di lapisan terluar setelah membran sel[40]. Gambar 4 menunjukkan TKKS dalam bentuk sel tumbuhan dengan perubahan fisik yang mungkin terjadi akibat proses torefaksi. Diketahui bahwa komponen utama dari dinding sel adalah komponen lignoselulosa[40].

Secara alami, aliran masuk dan keluarnya zat dari sel tumbuhan diatur oleh mekanisme yang dimiliki oleh dinding dan membran sel. Oleh karena itu, ketika proses pencucian dilakukan, air pencuci tidak dapat bertemu langsung dengan kandungan potasium yang terkandung di dalam sel. Agar proses pencucian berlangsung lebih optimal, air pencuci harus dipaksa untuk bertemu kandungan potasium di dalam bagian sel.

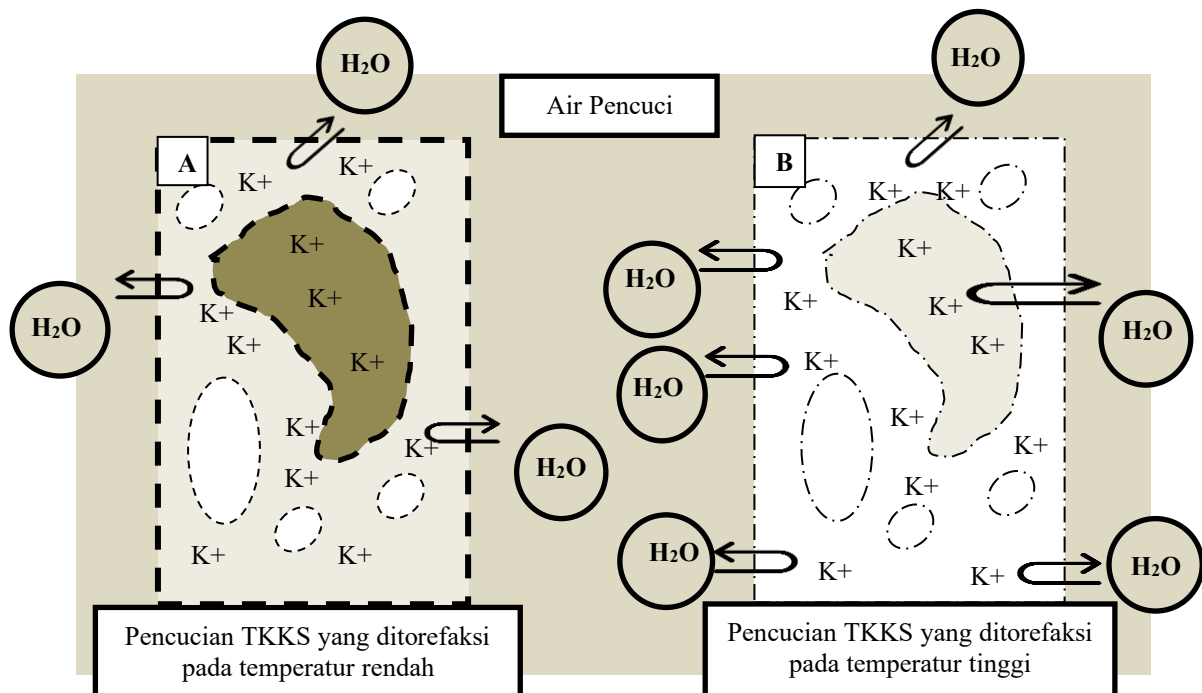
Perubahan fisik yang terjadi akibat proses torefaksi dianggap sebagai salah satu cara untuk memaksa air pencuci untuk bertemu dengan kandungan potasium di dalam sel. Semakin banyak dekomposisi termal yang terjadi, semakin banyak perubahan fisik yang akan muncul dalam biomassa[17][41]. Dinding sel tumbuhan yang komponen utamanya adalah komponen lignoselulosa, rusak akibat dekomposisi yang terjadi dari proses torefaksi. Kerusakan yang terjadi diduga berupa lubang atau retakan yang terbentuk di dinding sel sehingga air pencuci dapat masuk dengan bebas ke bagian dalam. Kerusakan yang terjadi juga bisa berupa penipisan dinding sel karena dekomposisi yang terjadi[20]. Penipisan dinding sel diperkirakan merusak mekanisme alami masuk dan keluarnya zat ke dalam sel tumbuhan sehingga diharapkan air pencuci dapat bertemu lebih banyak dengan kandungan potasium di dalam sel. Anggapan ini juga tergambar pada Gambar 4.

Selain memengaruhi komponen lignoselulosa yang menyebabkan dinding sel mengalami perubahan fisik, proses dekomposisi juga memengaruhi komponen biomassa lain[36]. Namun, zat seperti kandungan mineral dan bahan anorganik lainnya tidak berubah. Kadar air akan mulai menurun pada temperatur di bawah 100°C. Sitosol atau cairan dalam sel memiliki kadar air yang sangat besar sehingga melalui proses torefaksi bagian dalam sel akan kehilangan isinya yang menyebabkan kekosongan dalam sel. Kekosongan pada bagian dalam sel untuk waktu yang lama dapat menyebabkan penyusutan ukuran sel. Penyusutan ukuran sel menyebabkan stres menumpuk di bagian luar sel sehingga dapat menyebabkan sel pecah[20]. Hilangnya kadar air ini juga memengaruhi sifat *bulk density* dan *grindability* yang muncul pada biomassa akibat proses torefaksi. Tingkat kerusakan pada biomassa sangat

dipengaruhi oleh jenis biomassa dan parameter torefaksi seperti durasi waktu tinggal dan temperatur[42].

Beberapa zat organik seperti lemak, lilin, alkaloid, protein, pektin, gula dalam bentuk sederhana, dan zat organik lain yang ditemukan dalam biomassa juga mengalami dekomposisi dan dilepaskan sebagai bahan volatil. Hasil, jumlah, dan produk devolatilisasi sangat tergantung pada jumlah dan lokasi zat organik ini selama proses torefaksi[20]. Zat lain yang membentuk sebagian besar bagian sel adalah protein dan lipid[43]. Kedua zat tersebut menyebar dan membentuk bagian sel seperti membran sel dan organel sel lainnya, termasuk vakuola. Selain dinding sel, membran sel juga memiliki peran dalam melindungi bagian dalam sel dan mengatur masuk dan keluarnya zat dalam sel[40]. Namun, membran sel adalah lapisan semipermeabel yang sangat tipis dan karena komposisinya terdiri dari protein dan lipid ketika temperatur dekomposisi termal meningkat, membran sel akan hancur[20].

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, temperatur torefaksi yang lebih tinggi akan menghasilkan dekomposisi lignoselulosa yang lebih banyak[36][27]. Selain temperatur, waktu tinggal juga berkontribusi pada berapa banyak dekomposisi dapat terjadi. Oleh karena itu, tingkatan torefaksi yang lebih tinggi akan menyebabkan perubahan fisik yang lebih besar pada TKKS dan dapat menghasilkan kemampuan mencuci yang lebih baik. Pernyataan ini diilustrasikan pada Gambar 5 yang menunjukkan efek perubahan fisik karena dekomposisi termal pada kemampuan pencucian.



Gambar 5 Ilustrasi pencucian pada sel tumbuhan TKKS dengan perubahan fisik akibat dekomposisi termal (a) rendah dan (b) tinggi melalui proses torefaksi

Selain perubahan fisik, dugaan pengaruh kedua yang telah disebutkan pada awal pembahasan adalah sifat hidrofobik yang muncul pada biomassa akibat torefaksi. Berdasarkan penyelidikan yang dilakukan oleh Tumuluru et al., sifat hidrofobik biomassa akan meningkat seiring peningkatan temperatur torefaksi[20]. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa kemampuan biomassa dalam berbagai kondisi untuk menyerap kembali kandungan air dari lingkungan mengalami penurunan. Dalam kondisi mentah, pelet yang terbuat dari partikel kayu berukuran 0,8 mm mampu menyerap kembali kadar air hingga 16wt%. Ketika pelet kayu yang ditorefaksi pada 300°C, kemampuan reabsorpsi berkurang hingga 25%. Dengan kata lain, hidrofobik muncul dalam biomassa karena proses torefaksi.

Hidrofobisitas adalah sifat fisik dari molekul yang memiliki kesan menolak keberadaan air (hidrofobik) [19]. Sifat hidrofobik sangat bergantung kepada berapa banyak gugus fungsional -OH

(hidroksil) yang ada di dalam biomassa[20][41]. Proses torefaksi menyebabkan biomassa terdekomposisi dan beberapa gugus fungsional hidroksil dalam biomassa juga terpengaruh sehingga terlepas dalam bentuk zat terbang [20][41]. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Chen et al., pengurangan kandungan gugus hidroksil adalah reaksi yang sering terjadi selama proses torefaksi[41]. Gugus hidroksil berubah menjadi kelompok karboksil dan kemudian dilepaskan sebagai bahan yang mudah menguap. Semakin banyak gugus fungsional hidroksil dilepaskan, semakin tinggi hidrofobik biomassa[41].

Dalam kondisi normal atau belum mengalami perlakuan, biomassa memiliki kadar air yang sangat tinggi. Ketika proses pengeringan dilakukan, kadar air dapat dikurangi. Namun, karena sifat higroskopis biomassa, kadar air dapat diserap kembali secara alami dari lingkungan[20][44]. Melalui proses torefaksi, sifat higroskopis dapat dikurangi dan sifat hidrofobik dapat meningkat[19][20][44]. Efek hidrofobitas pada proses pencucian adalah biomassa tidak dapat dilewati oleh air karena TKKS menolak keberadaan air sehingga menyebabkan kontak air pencuci dengan kandungan potassium berkurang atau bahkan tidak mungkin terjadi. Potassium terletak di sitosol dan vakuola sel tumbuhan[34]. Ilustrasi sel tumbuhan dapat dilihat lagi pada Gambar 4. Bagian-bagian tersebut ditutupi oleh dinding sel yang komponen utamanya adalah lignoselulosa[40][43]. Proses torefaksi menyebabkan dekomposisi termal sehingga komponen organik seperti penyusun dinding sel, membran sel, cairan di dalam sel, dan organel sel, akan berkurang. Namun, kandungan mineral seperti potassium tidak terpengaruh sehingga potassium kemungkinan akan terperangkap di dalam sel ketika TKKS ditorefaksi[20]. Kandungan potassium yang terperangkap sulit dicuci oleh air karena biomassa telah berubah menjadi hidrofobik[44]. Sifat hidrofobik membuat air pencuci sulit atau bahkan tidak mampu menembus lapisan biomassa. Ketika TKKS ditorefaksi pada temperatur yang lebih rendah, diduga masih tersisa sejumlah gugus hidroksil sehingga molekul air dapat tertarik ke arah biomassa karena sifat hidrofobik yang belum besar. Air yang ditarik diharapkan mampu menembus dinding sel sehingga bisa bersentuhan dengan kandungan potassium yang terperangkap di dalam sel. Sedangkan pada temperatur torefaksi yang lebih tinggi, sifat hidrofobik biomassa sudah tinggi karena banyak gugus hidroksil yang berkurang, sehingga pengurangan kandungan potassium melalui proses pencucian akan lebih sulit untuk dilakukan.

Nilai kalor TKKS yang dapat dihasilkan pada setiap zona dekomposisi telah ditampilkan pada Gambar 2 yang menunjukkan data rata-rata, batas bawah, dan batas atas pada setiap zona dekomposisi. Berdasarkan data tersebut, nilai kalor TKKS yang ditargetkan, yaitu batu bara kelas lignit A dan sub-bituminus C, dapat dihasilkan melalui proses torefaksi. Hasil analisis data yang dilakukan menunjukkan proses yang dilakukan pada zona rendah ($100^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$) mampu meningkatkan nilai kalor TKKS hingga rata-rata 17,61 MJ/kg. Nilai kalor tersebut telah berada pada rentang batu bara kelas lignit A yang dijadikan target minimum bawah dari nilai kalor yang ingin dicapai, sedangkan proses torefaksi yang dilakukan pada zona sedang ($200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$) dapat menghasilkan TKKS dengan nilai kalor rata-rata 20,84 MJ/kg. Nilai kalor TKKS yang diperoleh pada zona sedang telah berada pada rentang batu bara kelas sub-bituminus C.

Proses torefaksi yang dilakukan pada zona tinggi ($250^{\circ}\text{C} < T \leq 330^{\circ}\text{C}$) dan zona ekstrem ($T > 330^{\circ}\text{C}$) dapat menghasilkan TKKS dengan nilai kalor yang lebih tinggi. Akan tetapi, efek dekomposisi termal akibat proses torefaksi pada zona tinggi dan zona ekstrem diyakini sudah sangat besar, terutama sifat hidrofobik biomassa yang dapat mengganggu proses pencucian [41][45]. Peningkatan hidrofobitas berdasarkan Equilibrium Moisture Content (EMC) dapat mencapai sekitar 33% pada TKKS yang ditorefaksi pada temperatur 280°C . Padahal peningkatan hidrofobitas pada zona sedang di temperatur 230°C hanya sebesar 9,38% [41]. Peningkatan sifat hidrofobik yang besar diduga karena dekomposisi hemiselulosa sudah mulai mengalami puncak dekomposisinya pada zona tinggi [28]. Perubahan fisik yang terjadi pada zona tinggi telah terbukti mampu mengurangi efek hidrofobitas yang muncul [41], akan tetapi data untuk memvalidasi pernyataan tersebut pada TKKS belum ditemukan. Peningkatan temperatur lebih lanjut menyebabkan dekomposisi lebih banyak terjadi pada zona ekstrem akibat selulosa yang mulai mengalami puncak dekomposisinya [28]. Akan tetapi, hidrofobitas TKKS zona ekstrem diperkirakan sudah sangat parah sehingga perubahan fisik yang terjadi pada zona ekstrem tidak dapat mengompensasi gangguan terhadap kemampuan pencucian.

Akibat efek dari proses torefaksi yang mulai muncul pada zona sedang di temperatur 230°C serta akibat efek tersebut yang akan terus meningkat pada zona tinggi dan zona ekstrem maka zona rendah dan zona sedang dipilih sebagai zona dekomposisi untuk menghasilkan TKKS yang mampu meningkatkan nilai kalor yang telah mencapai target yang ditetapkan. Zona rendah dan zona sedang juga dipilih karena efek proses torefaksi dapat dikatakan belum muncul pada TKKS di kedua zona dekomposisi tersebut. Setelah menetapkan zona dekomposisi yang tepat untuk dilakukan proses torefaksi, yaitu zona rendah dan zona sedang, langkah selanjutnya adalah perlu ditentukan proses pencucian yang tepat untuk dilakukan pada kedua zona tersebut.

Akan tetapi, untuk menentukan proses torefaksi yang optimum dari segi proses, maka perlu diperhatikan juga kemungkinan kerugian yang dapat muncul. Diketahui bahwa untuk meningkatkan nilai kalor, diperlukan sejumlah energi untuk menaikkan temperatur biomassa agar dekomposisi termal dapat terjadi. Semakin tinggi temperatur proses serta semakin lama durasi waktu tinggal, energi proses yang diperlukan akan semakin besar. Dari dua zona yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu zona rendah dan zona sedang, sebagai zona dekomposisi yang tepat untuk dilakukan persiapan TKKS, perlu ditentukan proses peningkatan nilai kalor yang tepat dilakukan berdasarkan data-data yang telah dikumpulkan. Zona rendah merupakan zona dengan dekomposisi yang terjadi akibat proses pengeringan di dalam oven pada temperatur 105°C selama 24 jam [16][17][36][37][38], sedangkan zona sedang merupakan zona dengan dekomposisi yang terjadi akibat proses torefaksi pada temperatur 200°C, 220°C, 240°C, dan 250°C, dengan variasi waktu tinggal 15, 30, 45, 60, dan 120 menit [16][17][36][38].

Berdasarkan data-data tersebut, dipilih zona rendah dan zona sedang hingga temperatur 230°C sebagai proses peningkatan nilai kalor yang tepat untuk TKKS. Pemilihan kedua proses tersebut dikarenakan rata-rata nilai kalor atas TKKS mengalami penurunan pada temperatur 220°C dengan nilai 18,04 MJ/kg [17][36] dan mulai mengalami peningkatan kembali pada zona sedang hingga pada temperatur 250°C rata-rata nilai kalor atas TKKS mencapai 21,67 MJ/kg [16][36][38]. Penurunan nilai kalor yang muncul tersebut kemungkinan besar dikarenakan TKKS yang digunakan merupakan jenis yang berbeda jauh atau memiliki komposisi yang berbeda dengan TKKS yang digunakan pada penelitian yang lain. Hal ini dapat terlihat jelas ketika membandingkan nilai kalor atas TKKS yang dikeringkan. Penelitian yang dilakukan oleh Chin et al. menghasilkan nilai kalor atas 18,07 MJ/kg [16] yang menunjukkan TKKS yang digunakan memiliki banyak kandungan air sehingga nilai kalor meningkat drastis melalui proses pengeringan.

Selanjutnya apabila dua proses tersebut dibandingkan, zona rendah dapat meningkatkan rata-rata nilai kalor atas hingga 17,61 MJ/kg [16][17][36][37][38], sedangkan zona sedang pada temperatur 230°C dapat meningkatkan rata-rata nilai kalor atas hingga 21,57 MJ/kg [16][17]. Seperti yang telah dijabarkan sebelumnya, efek dari proses torefaksi berupa perubahan bentuk fisik dan peningkatan nilai hidrofobisitas yang dapat memengaruhi kemampuan proses pencucian, baru muncul pada TKKS setelah melewati temperatur dekomposisi 230°C. Oleh karena itu, pemilihan zona rendah dan zona sedang dengan temperatur 230°C telah tepat untuk menghindari efek proses torefaksi. Kedua pilihan tersebut juga telah mampu mencapai nilai kalor TKKS yang ditargetkan, TKKS pada zona rendah mampu mencapai batu bara kelas lignit A, sedangkan TKKS pada zona sedang dengan temperatur 230°C mampu mencapai batu bara kelas sub-bituminus C. Perbandingan antara kedua pilihan tersebut menunjukkan bahwa proses peningkatan nilai kalor pada zona rendah dapat dilakukan untuk mengantisipasi kerugian proses yang besar, seperti biaya proses. Proses peningkatan nilai kalor pada zona rendah dianggap memiliki biaya proses yang lebih rendah karena proses yang dilakukan hanya proses pengeringan, sedangkan untuk zona sedang dilakukan proses torefaksi pada temperatur 230°C dengan rata-rata durasi waktu tinggal 52,2 menit. Namun, rata-rata nilai kalor atas TKKS meningkat sekitar 20% dibandingkan dengan zona rendah [16][17]. Akan tetapi, tujuan utama peningkatan nilai kalor yang diharapkan adalah nilai kalor setinggi mungkin sehingga zona sedang dengan temperatur 230°C dipilih sebagai parameter proses peningkatan nilai kalor TKKS yang tepat.

Proses utama yang terjadi pada zona rendah adalah pengurangan kandungan moisture yang dapat berkurang hingga 60wt%. Dekomposisi termal yang terjadi belum menyebabkan perubahan struktur kimia dan sifat yang jauh dari kondisi mentah [20][28]. Walaupun dekomposisi yang terjadi tidak signifikan, tetapi lignin adalah satu-satunya komponen lignoselulosa yang mengalami dekomposisi di

bawah temperatur 200°C [28]. Pernyataan-pernyataan tersebut mendukung dugaan bahwa kemampuan pencucian kandungan potassium masih dapat dilakukan dengan normal. Proses pencucian dengan tipe perendaman dirasa tepat untuk dilakukan pada zona rendah. Hal ini dikarenakan tipe perendaman sangat sederhana dan tepat dilakukan pada zona rendah yang proses pencuciannya belum sulit untuk dilakukan [29][14][13][14]. Proses pencucian dengan tipe perendaman pada TKKS yang diyakini masih memiliki sifat alaminya, seperti zona rendah dan zona sedang, dapat menghasilkan pengurangan kandungan potassium hingga rata-rata 52,2% [14].

Proses pencucian dengan tipe perendaman masih dirasa tepat untuk dilakukan pada zona sedang hingga temperatur sekitar 230°C karena sifatnya yang masih belum jauh berubah dari kondisi awal [28][41]. Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa kemampuan proses pencucian akan sedikit terpengaruh karena dekomposisi hemiselulosa yang baru mulai terjadi [28]. Sementara itu, zona sedang di atas temperatur 230°C, zona tinggi, dan zona ekstrem diyakini telah dipengaruhi oleh efek yang ditimbulkan dari proses torefaksi [28][41]. Perubahan fisik yang terjadi pada zona sedang membuat pori-pori tertutup dan dapat menyebabkan kemampuan pencucian menurun. Pernyataan tersebut divalidasi melalui penelitian yang dilakukan oleh Sabil et al. dan Chew et al. yang menampilkan gambar FE SEM permukaan TKKS di berbagai kondisi [17] [45]. Nilai hidrofobitas pada zona sedang juga tinggi, selain karena gugus hidroksil yang berkurang hal ini juga disebabkan karena perubahan fisik yang terjadi [41]. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Djakon et al. sifat hidrofobik yang muncul pada zona sedang masuk kategori severely hydrophobic dengan nilai percobaan water drop penetration test mencapai 600 hingga 3600 detik [44]. *Water drop penetration test* atau WDPT merupakan percobaan yang mengukur durasi air yang diteteskan pada biomassa hingga mampu menembus lapisan biomassa tersebut. Tipe perlakuan yang tepat dilakukan untuk zona-zona tersebut adalah pengadukan. Tipe perlakuan tersebut perlu dilakukan untuk memaksa air pencuci bertemu dengan kandungan potassium yang terperangkap di bagian dalam sel [29]. Akan tetapi, data terkait proses pencucian dengan tipe pengadukan untuk TKKS yang telah melalui proses torefaksi belum ditemukan sehingga kebutuhan data tersebut didekati dengan data proses pencucian dengan tipe pengadukan pada TKKS kondisi mentah. Hasil pengumpulan data menunjukkan tipe perlakuan tersebut dapat menghasilkan pengurangan kandungan potassium hingga 45%. Akan tetapi, hasil yang dapat diperoleh melalui proses pencucian dengan tipe pengadukan sangat bergantung kepada parameter prosesnya sehingga masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menguak kebenaran dari fenomena ini. Hal yang perlu diteliti lebih lanjut adalah dugaan peningkatan kecepatan pengadukan yang dapat menurunkan kemampuan proses pencucian.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ninduangdee et al., didapatkan kurva analisis termogravimetrik untuk TKKS [18]. Berdasarkan penelitian tersebut, pada rentang temperatur sekitar 150°C hingga 250°C, tidak terlihat perubahan massa TKKS yang signifikan. Pada rentang temperatur tersebut, persentase massa berada di sekitar 90% atau terjadi dekomposisi sebanyak 10% dari kondisi TKKS awal dalam penelitian ini. Hal ini dapat memvalidasi kemungkinan proses pencucian masih dapat dengan mudah dilakukan hingga zona sedang.

Untuk memaksimalkan pengurangan kandungan potassium TKKS, parameter proses pencucian yang berkaitan dengan kelarutan potassium di dalam air juga perlu diperhatikan. Diketahui bahwa semakin banyaknya air pencuci yang digunakan, maka akan semakin banyak kandungan potassium yang dapat berkurang [14]. Jumlah air pencuci yang lebih banyak diduga memengaruhi tingkat kejenuhan potassium yang dapat larut ke dalam air. Akan tetapi, semakin banyak air pencuci yang digunakan perlu diperhatikan pula seberapa efisien proses dapat dilakukan. Berdasarkan penelitian tersebut, data yang diberikan dengan menggunakan rasio air terhadap TKKS sebesar 50:1 dibanding 30:1 menghasilkan pengurangan kandungan potassium yang lebih banyak hingga 20%. Akan tetapi, penggunaan 50 L air untuk mencuci 1 kg TKKS dirasa kurang efisien. Dengan demikian, berdasarkan data yang dimiliki, penggunaan rasio air terhadap biomassa sebesar 30:1 sudah cukup jika digunakan.

Parameter proses pencucian yang berikutnya adalah durasi waktu tinggal. Diketahui bahwa semakin lama durasi waktu tinggal, maka akan semakin banyak kandungan potassium yang dapat berkurang. Durasi waktu tinggal yang lebih lama dapat menyebabkan proses pencucian berlangsung lebih lama. Akan tetapi, durasi pencucian yang lama dapat menjadi tidak efisien karena akan banyak waktu yang terbuang untuk mencuci beberapa TKKS. Berdasarkan penelitian yang sama, pengurangan

kandungan abu yang terbesar dapat dicapai pada waktu tinggal 20 menit. Peningkatan kemampuan pencucian pada durasi waktu tinggal selama 20 menit dengan rasio air terhadap biomassa 30:1 terjadi sekitar 13% jika dibandingkan dengan pencucian pada durasi waktu tinggal selama 15 menit dengan rasio yang sama. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa peningkatan durasi waktu tinggal tidak memberikan efek yang signifikan terhadap pengurangan kandungan abu. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, dipilih proses pencucian dengan durasi waktu tinggal selama 15 menit karena dirasa pengurangan yang terjadi sudah cukup banyak.

Parameter selanjutnya adalah temperatur air pencuci. Diketahui bahwa semakin tinggi temperatur, maka nilai kelarutan potassium akan semakin meningkat. Akan tetapi, data terkait variasi temperatur air pencuci belum dapat diperoleh. Namun demikian, ketika proses pencucian ingin divariasikan temperaturnya, diperlukan tambahan energi, sedangkan melalui proses pencucian dengan menggunakan air dengan temperatur kamar, kandungan abu dapat dicuci hingga rata-rata 52,2%. Berdasarkan data tersebut, ditentukan temperatur air pencuci yang disarankan adalah air dengan temperatur kamar.

4. KESIMPULAN

4.1. Kesimpulan

Penggunaan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai alternatif bahan bakar padat sangat menarik karena potensinya yang tinggi dengan mempertimbangkan ketersediaannya. Ada dua hal yang perlu dilakukan untuk meningkatkan kualitas TKKS sebelum digunakan sebagai bahan bakar padat, yaitu meningkatkan nilai kalor dan mengurangi kandungan potassiumnya. Studi dan kajian yang dilakukan telah mengumpulkan beberapa data dan memberikan wawasan berdasarkan dua metode tersebut. Peningkatan nilai kalor TKKS dibahas melalui proses torefaksi, sedangkan pengurangan kandungan potassium dibahas melalui proses pencucian. Kemudian dilakukan analisis terhadap pengaruh proses torefaksi terhadap pengurangan kandungan potassium melalui proses pencucian.

1. Untuk meningkatkan nilai kalor TKKS, kandungan bahan bakar, yaitu karbon, perlu ditingkatkan. Proses pengeringan dan torefaksi dapat meningkatkan rasio karbon. Melalui pengeringan, rasio karbon dapat meningkat akibat pengurangan kandungan air. Sementara melalui torefaksi, rasio karbon dapat lebih meningkat karena struktur kimia lain dapat berubah dan berkurang lebih banyak.
2. Peningkatan nilai kalor TKKS yang signifikan dihasilkan melalui dekomposisi termal dan proses torefaksi yang terjadi pada zona rendah ($100^{\circ}\text{C} < T \leq 200^{\circ}\text{C}$) dan zona tinggi ($250^{\circ}\text{C} < T \leq 330^{\circ}\text{C}$). Nilai kalor atas TKKS mencapai rata-rata 17,61 MJ/kg dan 22,72 MJ/kg [16][17][36][37][38].
3. Kemampuan pencucian di zona rendah ($100^{\circ}\text{C} < T \leq 200^{\circ}\text{C}$) dianggap masih normal karena efek proses torefaksi pada TKKS baru muncul pada zona sedang di sekitar temperatur 230°C . Pengurangan potassium TKKS dapat mencapai rata-rata 52,2% melalui pencucian dengan tipe perendaman [14]. Sementara itu, pencucian pada zona dekomposisi di atas temperatur 230°C akan mulai sulit dilakukan karena perubahan fisik permukaan biomassa serta sifat hidrofobik baru muncul, sehingga proses pencucian dengan tipe pengadukan perlu dipertimbangkan. Akan tetapi, perubahan fisik yang terjadi pada zona tinggi ($250^{\circ}\text{C} < T \leq 330^{\circ}\text{C}$) dapat membantu proses pencucian karena terbukti mampu mengurangi efek hidrofobitas biomassa. Untuk mengoptimalkan pengurangan kandungan potassium TKKS, proses pencucian disarankan menggunakan rasio air terhadap biomassa sebesar 30:1, durasi waktu tinggal selama 15 menit, dan air pencuci pada temperatur kamar [14].
4. Penyesuaian proses sesuai zona dekomposisi perlu dilakukan untuk mendapatkan TKKS dengan target nilai kalor yang disesuaikan dengan kebutuhan batu bara pada pembangkit listrik di Indonesia, yaitu batu bara kelas lignit A hingga sub-bituminus C, serta kandungan potassium yang dikurangi semaksimal mungkin dengan cara penyesuaian parameter proses.
5. Proses pencucian diyakini sebagai proses pengurangan potassium yang sederhana dan efektif. Antara metode pencucian yang direndam dan diaduk, metode pengadukan dapat mengurangi lebih banyak kandungan potassium

4.2. Saran

Studi yang dilakukan memiliki tujuan akhir yaitu untuk menjadikan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi salah satu bahan bakar alternatif yang dapat menggantikan penggunaan batu bara. Melalui review paper ini, telah dilakukan analisis dan dibentuk kesimpulan yang bersifat kuantitatif terkait peningkatan nilai kalor dan pengurangan kandungan potassium dari TKKS. Namun, dalam menjadikan TKKS sebagai bahan bakar padat yang berkualitas, aspek nilai kalor dan kandungan abu (dalam studi ini lebih dikhususkan kepada kandungan potassium) perlu ditinjau secara berkelanjutan.

Secara umum, studi dan kajian yang telah dilakukan telah dapat merumuskan pengaruh proses torefaksi terhadap kemampuan pencucian pada TKKS (Torefaksi-Pencucian) secara kualitatif, sehingga masih perlu dilakukan validasi melalui pengujian terhadap hasil investigasi yang dilakukan. Selain itu, terdapat beberapa aspek yang masih belum dilakukan penelitian sehingga terdapat beberapa pengembangan penelitian yang dapat dilakukan, seperti:

1. Perlu dilakukan percobaan pencucian kandungan potassium untuk TKKS yang telah melalui proses torefaksi di zona tinggi dan zona ekstrem untuk mendalami efek proses torefaksi terhadap kemampuan pencucian.
2. Perlu dilakukan percobaan untuk memvalidasi efek dari kecepatan gerakan pencucian yang mampu mengurangi kemampuan pencucian.
3. Karena kualitas TKKS yang baik dianggap memiliki nilai kalor yang tinggi dan kandungan potassium yang rendah, perlu ditinjau juga alur proses peningkatan kualitas yang berurutan, tidak hanya Torefaksi-Pencucian, namun juga Pencucian-Torefaksi.
4. Secara umum, masih terdapat banyak metode yang dapat meningkatkan kualitas TKKS sebagai bahan bakar padat. Namun, melihat dari proses yang ditinjau saat ini (Torefaksi dan Pencucian), metode Torefaksi Basah (Hidrotermal) memiliki kemiripan. Oleh karena itu perlu dilakukan peninjauan terhadap Alur Torefaksi-Pencucian, Alur Pencucian-Torefaksi, dan Torefaksi Basah, atau dengan metode lainnya sehingga didapat pemilihan proses yang optimal.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kajian dan penelitian ini dibantu secara finansial oleh Institut Teknologi Bandung sebagai bagian dari Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (P2MI) ITB dalam kelompok keahlian Konversi Energi tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Perkebunan, "Statistik Perkebunan Indonesia 2018-2020 Kelapa Sawit," 2020.
- [2] J. C. Ge, H. Y. Kim, S. K. Yoon, and N. J. Choi, "Optimization of palm oil biodiesel blends and engine operating parameters to improve performance and PM morphology in a common rail direct injection diesel engine," *Fuel*, vol. 260, no. June 2019, p. 116326, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116326.
- [3] E. Hambali and M. Rivai, "The Potential of Palm Oil Waste Biomass in Indonesia in 2020 and 2030," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 65, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/65/1/012050.
- [4] S. Novianti, A. Nurdiawati, I. N. Zaini, P. Prawisudha, H. Sumida, and K. Yoshikawa, "Low-potassium Fuel Production from Empty Fruit Bunches by Hydrothermal Treatment Processing and Water Leaching," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 584–589, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.460.
- [5] S. Nasir, "Estimation of Fuel Higher Heating Value (HHV) Using Proximate Analysis Presentation Agenda : Fuels & Combustion Introduction HHV Correlations and Evaluation," 2013.
- [6] S. S. Idris, N. A. Rahman, and K. Ismail, "Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA)," *Bioresour. Technol.*, vol. 123, no. 2012, pp. 581–591, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.065.
- [7] J. Poudel, T. I. Ohm, J. H. Gu, M. C. Shin, and S. C. Oh, "Comparative study of torrefaction of empty fruit bunches and palm kernel shell," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 917–927, 2017, doi: 10.1007/s10163-016-0492-1.

- [8] R. Omar, A. Idris, R. Yunus, K. Khalid, and M. I. Aida Isma, "Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis," *Fuel*, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.01.023.
- [9] W. Suksong et al., "Enhanced solid-state biomethanisation of oil palm empty fruit bunches following fungal pretreatment," *Ind. Crops Prod.*, vol. 145, no. June 2019, p. 112099, 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112099.
- [10] R. P. Singh, M. H. Ibrahim, N. Esa, and M. S. Iliyana, "Composting of waste from palm oil mill: A sustainable waste management practice," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 9, no. 4, pp. 331–344, 2010, doi: 10.1007/s11157-010-9199-2.
- [11] M. Yan, D. Ar Rahim, H. Susanto, R. Dennie Agustin Pohan, and D. Hantoko, "Impact of biomass upgrading via hydrothermal treatment on slagging and fouling during cofiring with coal," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 778, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012104.
- [12] Y. Sudiyani et al., "Utilization of biomass waste empty fruit bunch fiber of palm oil for bioethanol production using pilot - Scale unit," *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 31–38, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.005.
- [13] N. Abdullah, F. Sulaiman, and H. Gerhauser, "Characterisation of oil palm empty fruit bunches for fuel application," *J. Phys. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–24, 2011.
- [14] N. Abdullah and F. Sulaiman, "The properties of the washed empty fruit bunches of oil palm," *J. Phys. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 117–137, 2013.
- [15] M. A. Sukiran, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, N. Abu Bakar, and S. K. Loh, "A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 149, pp. 101–120, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.011.
- [16] K. L. Chin et al., "Optimization of torrefaction conditions for high energy density solid biofuel from oil palm biomass and fast growing species available in Malaysia," *Ind. Crops Prod.*, vol. 49, pp. 768–774, 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.06.007.
- [17] K. M. Sabil, M. A. Aziz, B. Lal, and Y. Uemura, "Effects of torrefaction on the physiochemical properties of oil palm empty fruit bunches, mesocarp fiber and kernel shell," *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, pp. 351–360, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.05.015.
- [18] P. Ninduangdee, V. I. Kuprianov, E. Y. Cha, R. Kaewrath, P. Youngyuen, and W. Athhawethworawuth, *Thermogravimetric Studies of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Palm Kernel Shell: TG/DTG Analysis and Modeling*, vol. 79. Elsevier B.V., 2015.
- [19] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, vol. (5)2, no. 2. Oxford: Elsevier, 2010.
- [20] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanji, J. R. Hess, C. T. Wright, and R. D. Boardman, "A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy Applications," *Ind. Biotechnol.*, vol. 7, no. October, pp. 384–401, 2011, doi: 10.1089/ind.2011.0014.
- [21] D. Eseltine, S. S. Thanapal, K. Annamalai, and D. Ranjan, "Torrefaction of woody biomass (Juniper and Mesquite) using inert and non-inert gases," *Fuel*, vol. 113, pp. 379–388, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.085>.
- [22] W.-H. Chen, Y.-Q. Zhuang, S.-H. Liu, T.-T. Juang, and C.-M. Tsai, "Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres," *Bioresour. Technol.*, vol. 199, pp. 367–374, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.066>.
- [23] J. Wannapeera, B. Fungtamman, and N. Worasuwanarak, "Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 92, no. 1, pp. 99–105, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.04.010>.
- [24] P. Basu, S. Rao, and A. Dhungana, "An investigation into the effect of biomass particle size on its torrefaction," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 91, no. 3, pp. 466–474, Mar. 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.21710>.
- [25] Y. Uemura, W. Omar, N. A. Othman, S. Yusup, and T. Tsutsui, "Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen," *Fuel*, vol. 103, pp. 156–160, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.018>.
- [26] G. Talero, S. Rincón, and A. Gómez, "Torrefaction of oil palm residual biomass: Thermogravimetric characterization," *Fuel*, vol. 242, pp. 496–506, 2019, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.057>.
- [27] N. Yaacob, N. A. Rahman, S. Matali, S. S. Idris, and A. B. Alias, "An overview of oil palm biomass torrefaction: Effects of temperature and residence time," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 36, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1755-1315/36/1/012038.
- [28] F. X. Collard and J. Blin, "A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 594–608, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.06.013.
- [29] R. R. Bakker, "Biomass Fuel Leaching for the Control of Fouling, Slagging, and Agglomeration in Biomass Power Generation," University of California, 2000.
- [30] H. G. Schwatzberg, "Leaching-Organic Materials," in R. W. Rousseau (Ed): *Handbook of Separation Process Technology*, John Wiley & Sons Inc., 1987.
- [31] K. L. Chin et al., "Reducing ash related operation problems of fast growing timber species and oil palm biomass for combustion applications using leaching techniques," *Energy*, vol. 90, pp. 622–630, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.094.
- [32] A. Seidell, *Solubilities of Inorganic and Organic Compound: A Compilation of Quantitative Solubility Data from The Periodical Literature*, 2nd Edition, 2nd ed. New York: D. Van Nostrand Company, 1919.
- [33] R. K. Prabhudesai, "Leaching," in P. A. Schweitzer: *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, 1979.
- [34] P. Ragel, N. Raddatz, E. O. Leidi, F. J. Quintero, and J. M. Pardo, "Regulation of K + nutrition in plants," *Front. Plant Sci.*, vol. 10, no. March, 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.00281.
- [35] M. J. C. van der Stelt, H. Gerhauser, J. H. A. Kiel, and K. J. Ptasinski, "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 9, pp. 3748–3762, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>.
- [36] Y. Uemura, W. N. Omar, T. Tsutsui, and S. B. Yusup, "Torrefaction of oil palm wastes," *Fuel*, vol. 90, no. 8, pp. 2585–2591, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.03.021.
- [37] T. Thaim and R. A. Rasid, "Improvement Empty Fruit Bunch Properties through Torrefaction," *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 10, no. 17, pp. 114–121, 2016.
- [38] B. B. Nyakuma, A. Ahmad, A. Johari, T. A. T. Abdullah, and O. Oladokun, "Torrefaction of Pelletized Oil Palm Empty Fruit Bunches," *21st Int. Symp. Alcohol Fuels – 21st ISAF Torrefaction*, no. May, pp. 15–19, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11199-007-9278-1>.
- [39] M. A. H. M. Fuad, H. M. Faizal, and F. N. Ani, "Experimental investigation on water washing and decomposition behaviour for empty fruit bunch," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 59, no. 2, pp. 207–219, 2019.
- [40] C. Loix, M. Huybrechts, J. Vangronsveld, M. Gielen, E. Keunen, and A. Cuypers, "Reciprocal interactions between cadmium-induced cell wall responses and oxidative stress in plants," *Front. Plant Sci.*, vol. 8, no. October, pp. 1–19, 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.01867.
- [41] Y. Chen, B. Liu, H. Yang, Q. Yang, and H. Chen, "Evolution of functional groups and pore structure during cotton and corn stalks torrefaction and its correlation with hydrophobicity," *Fuel*, vol. 137, pp. 41–49, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.07.036.
- [42] A. J. Stamm, "Thermal Degradation of Wood and Cellulose," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 48, no. 3, pp. 413–417, Mar. 1956, doi: 10.1021/ie51398a022.
- [43] V. Srivastava, L. S. McKee, and V. Bulone, "Plant Cell Walls," in *eLS*, no. July, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017, pp. 1–17.
- [44] A. Dyjakon, T. Noszczczyk, and M. Smędzik, "The influence of torrefaction temperature on hydrophobic properties of waste biomass from food processing," *Energies*, vol. 12, no. 24, pp. 1–17, 2019, doi: 10.3390/en12244609.
- [45] J. J. Chew, M. Soh, J. Sunarso, S. T. Yong, V. Doshi, and S. Bhattacharya, "Gasification of torrefied oil palm biomass in a fixed-bed reactor: Effects of gasifying agents on product characteristics," *J. Energy Inst.*, vol. 93, no. 2, pp. 711–722, 2020, doi: 10.1016/j.joei.2019.05.010.