

## HALAMAN PENGESAHAN

Judul Makalah : Energi Terbarukan dari Jerami Padi: Review Potensi dan Tantangan Bagi Indonesia  
Penulis 1 : Agus Haryanto  
Penulis 2 : Siti Suharyatun  
Penulis 3 : Winda Rahmawati  
Penulis 4 : **Sugeng Triyono**

Jenis Publikasi : Jurnal Nasional Terakreditasi Nasional (SINTA 2)  
Tempat Publikasi : JTEP, Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor  
Volume 7. No. 2, Agustus 2019 hal. 137 – 144 (8).  
Tanggal Publikasi : Agustus 2019  
ISSN : 2407-0475 (print) and 2338-8439 (online).  
Website : <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>  
DOI : 10.19028/jtep.07.2.137-144

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.  
NIP 196110201986031002

Bandar Lampung, 22-12-2020

Penulis,

Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc.  
NIP 196112111987031004

Menyetujui,  
Ketua LPPM Unila



Dr. Ir. Lismelia Afriani, D.E.A  
NIP 196505101993032008

DOKUMENTASI LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA BAKSARAKAT UNIVERSITAS LAMPUNG	
TGL	
NO. INVEN	
JENIS	
PARAF	

# jTEP

## JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 7, No. 2, Agustus 2019



Publikasi Resmi  
**Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia**  
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)  
bekerjasama dengan  
**Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA**  
Institut Pertanian Bogor





Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain meliputi teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam *invited paper* yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, *review* perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, *technical paper* hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta *research methodology* berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

## Penanggungjawab:

Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB  
Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia

## Dewan Redaksi:

Ketua : Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, IPB University)  
Anggota : Abdul Hamid Adom (Scopus ID: 6506600412, University Malaysia Perlis)  
(*editorial board*) Addy Wahyudie (Scopus ID: 35306119500, United Arab Emirates University)  
Budi Indra Setiawan (Scopus ID: 55574122266, IPB University)  
Balasuriya M.S. Jinendra (Scopus ID: 30467710700, University of Ruhuna)  
Bambang Purwantana (Scopus ID: 6506901423, Universitas Gadjah Mada)  
Bambang Susilo (Scopus ID: 54418036400, Universitas Brawijaya)  
Daniel Saputera (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya)  
Han Shuqing (Scopus ID: 55039915600, China Agricultural University)  
Hiroshi Shimizu (Scopus ID: 7404366016, Kyoto University)  
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana)  
Agus Arif Munawar (Scopus ID: 56515099300, Universitas Syahkuala)  
Armansyah H. Tambunan (Scopus ID: 57196349366, IPB University)  
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, IPB University)  
M. Rahman (Scopus ID: 7404134933, Bangladesh Agricultural University)  
Machmud Achmad (Scopus ID: 57191342583, Universitas Hasanuddin)  
Muhammad Makky (Scopus ID: 55630259900, Universitas Andalas)  
Muhammad Yulianto (Scopus ID: 54407688300, IPB University & Waseda University)  
Nanik Purwanti (Scopus ID: 23101232200, IPB University & Teagasc Food Research Center Irelandia)  
Pastor P. Garcia (Scopus ID: 57188872339, Visayas State University)  
Rosnah Shamsudin (Scopus ID: 6507783529, Universitas Putra Malaysia)  
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin)  
Sate Sampattagul (Scopus ID: 7801640861, Chiang Mai University)  
Subramaniam Sathivel (Scopus ID: 6602242315, Louisiana State University)  
Shinichiro Kuroki (Scopus ID: 57052393500, Kobe University)  
Siswoyo Soekarno (Scopus ID: 57200222075, Universitas Jember)  
Tetsuya Araki (Scopus ID: 55628028600, The University of Tokyo)  
Tusan Park (Scopus ID: 57202780408, Kyungpook National University)

---

**Redaksi Pelaksana:**

Ketua : Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, IPB University)  
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, IPB University)  
Bendahara : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, IPB University)  
Anggota : Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, IPB University)  
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, IPB University)  
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, IPB University)  
Leopold Oscar Nelwan (Scopus ID: 56088768900, IPB University)  
I Wayan Astika (Scopus ID: 43461110500, IPB University)  
Agus Ghautsun Niam (Scopus ID: 57205687481, IPB University)  
Administrasi : Diana Nursolehat (IPB University)

**Penerbit:** Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

**Alamat:** Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.  
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,  
E-mail: [jtep@ipb.ac.id](mailto:jtep@ipb.ac.id) atau [jurnaltep@yahoo.com](mailto:jurnaltep@yahoo.com)  
Website: [web.ipb.ac.id/~jtep](http://web.ipb.ac.id/~jtep) atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

**Rekening:** BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

**Percetakan:** PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

---

## Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 7 No. 2 Agustus 2019. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof. Dr. Ir. Bambang Purwantana, M.Agr (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Bayu Dwi Apri Nugroho, PhD (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Ir. Darma, M.Si, Ph.D (Fakultas Pertanian, Universitas Papua), Ir. Siti Mariana Widayanti, M.Si (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian), Prof.Dr.Ir. Tineke Mandang, (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Wayan Budiastra, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Radite Praeko Agus Setiawan, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Leopold Oscar Nelwan, MSi (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Lenny Saulia, MSi (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Chusnul Arif, S.TP, MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor)

---

Published: Mar 31, 2020

## Articles

### [Pendugaan Emisi CO2 dari Lahan Gambut dengan Menggunakan Model Artificial Neural Network \(ANN\)](#)

121-128

Anna Farida, Satyanto Krido Saptomo, Yudi Chadlin, Budi Indra Setiawan, Kazutoshi Osawa



Read Statistic: 195

### [Desain dan Kinerja Mesin Ekstruder Twin Screw untuk Pembuatan Pakan Ikan Terapung](#)

129-136

Anif Rahman Hakim, Wahyu Tri Handoyo, Ahmat Fauzi, Widiarto Sarwono



Read Statistic: 1425

### [Energi Terbarukan dari Jerami Padi : Review Potensi dan Tantangan Bagi Indonesia](#)

137-146

Agus Haryanto, Siti Suharyatun, Winda Rahmawati, Sugeng Triyono



Read Statistic: 487

### [Pengembangan Prototipe Dan Penjurian Traktor Satu Roda Untuk Pemeliharaan Tanaman Padi](#)

147-154

Jusran Jusran, Radite Praeko Agus Setiawan, I Dewa Made Subrata



Read Statistic: 169

### [Rancangan Kemasan dengan Indikator Warna untuk Deteksi Tingkat Kematangan Buah Alpukat](#)

155-162

Meika Wahyuni Azrita, Usman Ahmad, Emmy Darmawati



Read Statistic: 488

Accredited by Ristekbrin



[Make Submission](#)

[Article Template](#)

[About Journal](#)

[Editorial Team](#)

[Aim and Scope](#)

[Publication Ethics](#)

[Author Guidelines](#)

[Screening Plagiarism](#)

[Article Processing Charges](#)

[Open Access Statement](#)

[Copyright Notice](#)

[Journal Statistic](#)

Google Scholar Statistics

	All	Since 2016
Citations	641	520
h-Index	13	11

---

*Review*

**Energi Terbarukan dari Jerami Padi :  
Review Potensi dan Tantangan Bagi Indonesia**

*Renewable Energy from Rice Straw: Review on Potential and Challenges for Indonesia*

Agus Haryanto, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Lampung.

Email: [agus.haryanto@fp.unila.ac.id](mailto:agus.haryanto@fp.unila.ac.id)

Siti Suharyatun, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Lampung.

Email: [ti\\_suharyatun@yahoo.com](mailto:ti_suharyatun@yahoo.com)

Winda Rahmawati, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Lampung.

Email: [windarahmawati89@gmail.com](mailto:windarahmawati89@gmail.com)

Sugeng Triyono, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Lampung.

Email: [striyono2001@yahoo.com](mailto:striyono2001@yahoo.com)

**Abstract**

*Straw is a waste produced from the threshing and harvesting of rice. So far, rice straw has only been removed. In fact, it can be used as a potential energy source. This paper aims to examine the potential of rice straw as a renewable energy source in Indonesia. Opportunities and challenges were evaluated based on extensive and in-depth literature review. The paper discussed rice straw potential, its characteristics and benefits of using straw energy, and conversion technology. Results showed that renewable energy potential of rice straw is 693 PJ/year. Conversion technologies include densification, combustion, gasification, pyrolysis, fermentation, and biogas. The biggest challenge for using rice straw energy is collection and transportation. Straw characteristics also need to be improved to increase its combustion properties. Combustion, densification, and biogas are applicable technologies to convert rice straw to energy.*

**Keywords:** *combustion, biogas, gasification, transportation, alkali metals.*

**Abstrak**

Jerami merupakan limbah dari proses perontokan dan pemanenan padi. Selama ini jerami padi hanya dibuang, padahal, bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi yang potensial. Makalah ini bertujuan membahas potensi jerami padi sebagai sumber energi terbarukan Indonesia. Peluang dan tantangan dikaji berdasarkan studi literatur secara ekstensif dan mendalam. Makalah berisi perhitungan potensi jerami padi, karakteristik, keuntungan energi jerami, dan teknologi konversi. Hasil pengkajian menunjukkan potensi energi terbarukan dari jerami 693 PJ/tahun. Teknologi konversi jerami meliputi densifikasi, pembakaran, gasifikasi, pirolisis, fermentasi dan biogas. Tantangan terbesar pemanfaatan jerami padi adalah pengumpulan dan transportasi. Karakteristik intrinsik jerami juga perlu diperbaiki untuk mengurangi kandungan logam dan meningkatkan sifat pembakarannya. Pembakaran langsung, densifikasi, dan biogas adalah teknologi mengkonversi jerami padi yang sudah diaplikasikan.

**Kata Kunci:** *pembakaran, biogas, gasifikasi, transportasi, logam alkali.*

*Diterima: 29 Januari 2019; Disetujui: 11 April 2019*

## Latar Belakang

Indonesia merupakan negara penghasil padi terbesar di kawasan Asia Tenggara dan terbesar ketiga di dunia (Abraham *et al.*, 2016), sehingga budidaya padi dan rantai prosesnya memiliki posisi penting. Hal ini dapat dilihat dari sumbangannya yang mencapai 21% dari total produksi sektor pertanian nasional (Samuel, 2013). Dengan luas panen mencapai 15.712 juta ha, produksi padi Indonesia mencapai 81.149 juta ton gabah kering giling (BPS, 2018). Proses produksi beras menghasilkan produk samping berupa jerami, kulit, dan bekatul. Jerami padi meliputi bagian yang tertinggal pada saat panen dan setelah gabah dirontokkan (merang), dan merupakan *komponen* yang paling besar. Produksi jerami kering berkisar 2.3 ton/ha (Djajanegara dan Rangkuti, 1983) hingga 3.86 ton/ha (Marsetyo, 2008). Pada angka produksi jerami padi rata-rata 3.08 ton/ha dan luas panen padi tahun 2018 seluas 15.712 juta ha (BPS, 2018), maka total potensi jerami padi Indonesia adalah 48.39 juta ton bahan kering per tahun. Dengan nilai kalori rata-rata 14.32 GJ/ton, maka potensi energi jerami padi adalah 693 PJ/tahun, setara 19.25 juta kiloliter solar. Potensi jerami padi ini diperkirakan meningkat dengan laju 3.1%/tahun (Makhrani, 2014).

Jerami padi bisa menjadi sumber energi alternatif menggantikan energi fosil sehingga mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) serta menghindari polusi lokal akibat pembakaran terbuka. Jerami padi menarik karena dapat diperbaharui dan dianggap netral karbon dioksida. Tetapi, jerami padi memiliki sifat intrinsik yang kurang baik sebagai bahan bakar. Selain itu, jerami padi tercecer di lahan mengakibatkan biaya koleksi yang mahal. Berat jenis yang rendah juga mengakibatkan transportasi jerami padi ke lokasi pengguna menjadi mahal. Makalah ini bertujuan untuk menyajikan hasil ulasan (*review*) mendalam mengenai potensi dan tantangan jerami padi sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia.

## Sifat Jerami Padi

Sebagai biomassa lignoselulosik, jerami tersusun atas tiga komponen, yaitu: lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Hal ini membuka peluang bagi pemanfaatan jerami sebagai sumber energi melalui berbagai rute konversi. Jerami memiliki massa jenis yang rendah, yaitu 70–80 kg/m<sup>3</sup> pada kadar air 15–18%. Tabel 1 memberikan sifat dan komposisi beberapa jenis jerami. Dua hal yang menyolok dari jerami padi dibandingkan jerami lain adalah kadar abu yang tinggi (hingga 22.1%) dan nilai kalori (HHV) yang rendah (kurang dari 15 MJ/kg). Efek negatif dari kandungan abu yang tinggi dan komposisi mineralnya akan dibahas lebih rinci di bagian selanjutnya.

## Teknologi Konversi Energi Jerami

Jerami padi dapat digunakan sebagai sumber energi untuk menghasilkan bahan bakar, panas, atau listrik melalui proses-proses termal-kimia, fisika, atau biologi (Gambar 1). Hingga saat ini konversi termal jerami padi yang paling umum adalah pembakaran langsung terbuka di lahan. Samuel (2013) menyatakan bahwa 61% dari potensi jerami dibakar di lahan. Alasan utama pembakaran jerami padi adalah murah dan kurangnya tenaga kerja. Pembakaran juga dipicu oleh aplikasi mesin pemanen *combine* yang mengakibatkan jerami berceceran dan sulit dikumpulkan. Pembakaran jerami dapat membantu mengendalikan gulma, hama dan penyakit. Efek negatif pembakaran meliputi kehilangan unsur hara, penipisan bahan organik tanah, dan pengurangan biota tanah (Mandal *et al.*, 2004). Jerami yang terbakar di lahan juga menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) dan polutan seperti CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, dioksin, dan furan (Jenkins *et al.*, 2003) hingga debu kasar (PM10) dan debu halus (PM2.5) (Chang *et al.*, 2013), yang mempengaruhi kualitas udara regional.

## Densifikasi

Keterbatasan utama jerami padi adalah kerapatan curah yang rendah (antara 80–100 kg/m<sup>3</sup>) sehingga menyulitkan penanganan, penyimpanan, dan transportasi. Densifikasi dapat menghasilkan bahan bakar yang homogen dan densitas hingga 10 kali sehingga menurunkan biaya transportasi serta ruang penyimpanan (Tumuluru *et al.*, 2011). Densifikasi menghasilkan dua jenis produk, yaitu pelet dan briket (Gambar 2). Pelet berbentuk silinder dengan diameter 6–12 mm, panjang <10 cm, densitas satuan 1000–1400 kg/m<sup>3</sup> dan densitas kamba sekitar 700 kg/m<sup>3</sup> (Stelte *et al.*, 2011). Pelet dapat digunakan untuk aplikasi rumah tangga maupun industri (*boiler*). Untuk menghasilkan pelet, jerami padi digiling menjadi partikel halus lalu dipres dengan tekanan tinggi (> 50 MPa). Tekanan sangat menentukan kualitas pelet, tetapi di atas 200 MPa tidak berpengaruh signifikan terhadap densitas pelet (Stelte *et al.*, 2011). Ukuran partikel jerami mempengaruhi tekanan kerja (makin kecil partikel, makin besar tekanan). Pelet dibuat dengan menambahkan uap tanpa perekat. Pelet yang berkualitas dibuat dengan suhu 60–80°C dan kadar air bahan 13–20% (Ishii 2014). Jika jerami terlalu kering, permukaan pelet bisa menjadi arang dan terbakar sebelum proses selesai. Jika terlalu basah, uap air tidak bisa lepas pada saat pengepresan sehingga menghasilkan pelet yang lemah secara mekanis. Pengembangan pelet jerami padi menarik secara komersial, meningkatkan nilai tambah rantai proses padi, dan dapat membuka kesempatan kerja di wilayah pedesaan.

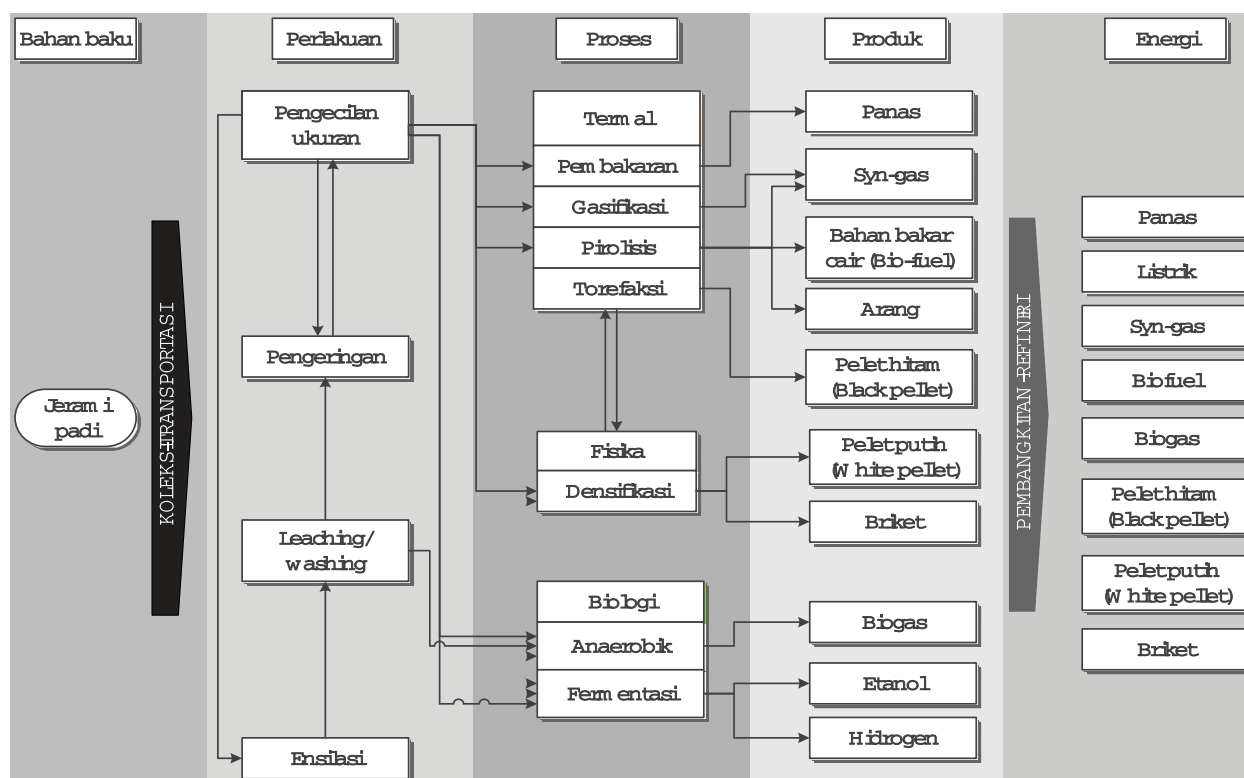
Briket berbentuk silinder atau balok dengan ukuran 60–100 mm dan panjang 60–150 mm. Briket dipakai untuk bahan bakar boiler dan kurang sesuai



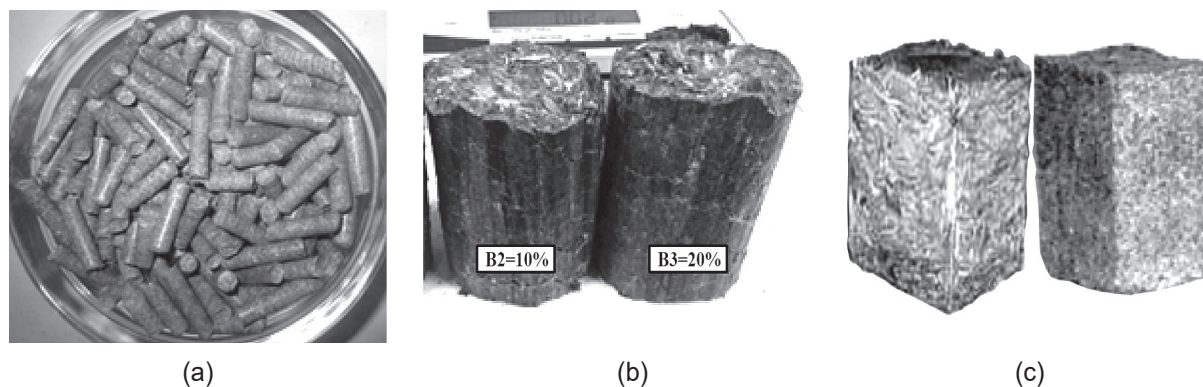
Table 1. Sifat-sifat jerami padi dan bahan sejenisnya.

Jenis Jerami	Uji Proksimat (% , bk)			Uji Ultima (% , bk)			Komposisi Ab (% , abu)			HHV (MJ/kg)	Ref
	Fix C	Abu	C	H	N	O	Si	Na	K		
Padi	17.82	20.15	49.15	6.23	1.59	42.13	80.68	0.74	5.72	14.74	*
Padi	15.86	18.67	38.24	5.20	0.87	36.84	74.67	0.96	12.30	15.08	**
Gandum ( <i>wheat</i> )	14.87	3.89	47.55	5.86	0.59	42.02	55.32	1.51	12.90	18.38	**
Gandum ( <i>oat</i> )	14.55	8.20	50.58	6.16	0.53	46.23	31.43	0.55	22.37	18.94	*
<i>Alfalfa</i> (rumput)	15.81	5.27	47.17	5.99	2.68	38.69	5.79	1.10	28.10	18.66	**
<i>Miscanthus</i>	12.55	3.05	47.29	5.75	0.33	43.52	61.84	0.33	11.60	18.72	**
<i>Switchgras</i>	14.34	8.97	46.68	5.82	0.77	37.57	65.18	0.58	11.60	18.06	**
Jerami jagung	14.83	5.06	49.31	6.04	0.70	43.56	54.04	0.15	20.67	19.06	*
Bagas tebu	11.95	2.44	48.64	5.87	0.14	38.39	46.61	0.79	4.15	18.99	**

Keterangan: \*) <https://phyllis.nl> ; \*\*) Jenkins *et al.* (1998)



Gambar 1. Potensi proses konversi energi jerami padi (adaptasi dari IRRI, 2018).



Gambar 2. Bahan bakar padat dari jerami: (a) pelet (Said *et al.*, 2015), (b) briket silinder (Gill *et al.*, 2017), (c) briket balok (Chou *et al.*, 2009).

untuk aplikasi rumah tangga. Untuk menghasilkan briket, jerami cukup dipotong-potong lalu dipres dengan mesin kempa. Briket yang baik dihasilkan dari tekanan kerja sekitar 30 MPa (Singh and Singh, 1982). Kondisi optimum pembuatan briket jerami adalah kadar air bahan 12–14%, ukuran partikel 14–16 mm, dan perekat 20%. Pada kapasitas 1200 kg/jam, pembuatan briket memerlukan daya minimum (36.60 kW) dan menghasilkan briket dengan densitas tinggi (1030.38–1159.22 kg/m<sup>3</sup>) dan nilai kalori tinggi (15.61 MJ/kg) (Gill *et al.*, 2017). Jenkins *et al.* (2000) mencatat konsumsi energi pada proses densifikasi dan penggilingan jerami padi berturut-turut mencapai 16 kWh/ton atau 2% dan 30 kWh/ton atau 4% dari daya yang dihasilkan pembangkit listrik jerami padi. Briket jerami untuk bahan bakar pembangkit listrik di daerah terpencil atau untuk mengoperasikan mesin penggiling gabah lebih berpeluang untuk dikembangkan karena tidak memerlukan energi untuk penggilingan dan biaya transportasi dapat ditekan.

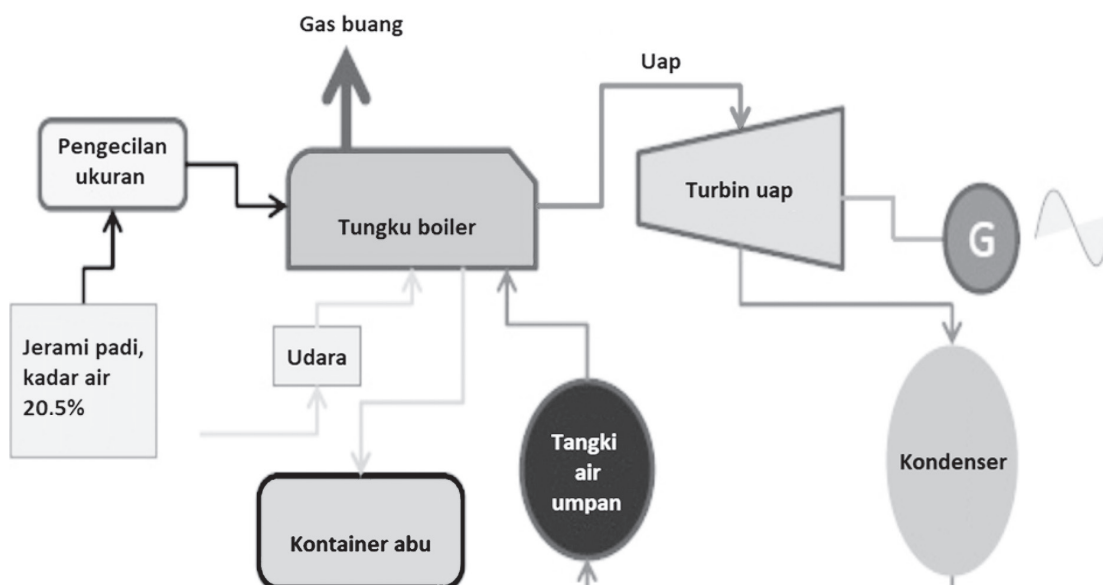
### Pembakaran Langsung

Jerami masih digunakan sebagai sumber bahan bakar bagi masyarakat di berbagai negara dan mencakup 14% dari konsumsi energi total di dunia (Matsumura *et al.*, 2005). Pembakaran langsung merupakan proses termal yang paling banyak dipilih untuk keperluan industri kecil (pembakaran batubara, genteng) hingga pengoperasian turbin uap skala kecil. Pemanfaatan jerami untuk bahan bakar pembangkit dapat mengatasi masalah kelangkaan listrik di Indonesia (Makhrani, 2014). Pembakaran langsung merupakan teknologi pembangkit listrik dari jerami yang paling menjanjikan (Suramaythangkoor and Gheewala, 2010).

Sistem pembangkit listrik dengan pembakaran langsung merupakan cara yang paling sederhana dan paling tua untuk membangkitkan listrik dari biomasa. Sistem pembangkit listrik jerami (Gambar 3) terdiri

dari komponen unit pengelolaan jerami (penyimpanan, pengecilan ukuran), tungku, boiler, kondenser, tangki air umpan, dan kontainer abu (Abdelhady *et al.*, 2014). Dalam pembangkit ini jerami dibakar di dalam tungku dan memanaskan boiler untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Bal jerami dikirim dari bin penyimpanan dan diumpankan ke tungku boiler. Di dalam boiler, sebagian jerami dibakar di atas sarangan (*grate*) dan sebagian lainnya tertunda dan terbakar di dalam tungku. Uap bersuhu dan bertekanan tinggi yang dihasilkan boiler memutar turbin yang dihubungkan dengan generator. Ketika turbin berputar maka generator juga berputar sehingga menghasilkan listrik yang kemudian ditransmisikan ke jaringan.

Pembangkit listrik berbahan bakar jerami padi berpotensi menurunkan emisi GRK sebesar 1.79 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh jika dibandingkan dengan pembangkit batubara, dan 1.05 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh jika dibandingkan dengan pembangkit gas alam (Shafie *et al.*, 2014). Di India, Soam *et al.* (2017) menyimpulkan tiap ton jerami padi kering yang dipakai untuk membangkitkan listrik dapat mereduksi emisi GRK 1.47 ton CO<sub>2</sub>-eq. Tetapi, Jenkins *et al.* (2000) mencatat bahwa pencampuran jerami padi sebanyak 20% pada pembangkit listrik berbahan bakar kayu justru meningkatkan biaya bahan bakar sebesar 25% (dari \$20 menjadi \$24.80 per ton). Studi di Thailand juga menunjukkan biaya bahan bakar pembangkit listrik jerami (0.38–0.61 Baht/MJ) belum kompetitif dibandingkan dengan batubara (0.30 Baht/MJ), tetapi masih sebanding dengan biomassa lain (0.35–0.53 Baht/MJ) (Suramaythangkoor and Gheewala, 2010). Untuk *boiler* industri, pemanfaatan jerami lebih kompetitif dan fleksibel dengan dua opsi, yaitu (1) menginstal *boiler* khusus berbahan bakar jerami; atau (2) jika memakai boiler batubara, maka penggantian bahan bakar dari batubara ke jerami akan memberikan penghematan biaya penyediaan bahan bakar sebesar 0.01 Baht/MJ panas. Berdasarkan hal ini, pembangkit listrik tenaga jerami perlu diupayakan



Gambar 3. Komponen sistem pembangkit listrik pembakaran langsung berbahan bakar jerami (Abdelhady *et al.*, 2014).

terutama untuk masyarakat yang tidak terjangkau PLN atau untuk mengoperasikan pabrik penggilingan padi sehingga dapat mengurangi konsumsi listrik konvensional.

### Pembakaran Langsung

Jerami masih digunakan sebagai sumber bahan bakar bagi masyarakat di berbagai negara dan mencakup 14% dari konsumsi energi total di dunia (Matsumura *et al.*, 2005). Pembakaran langsung merupakan proses termal yang paling banyak dipilih untuk keperluan industri kecil (pembakaran batubara, genteng) hingga pengoperasian turbin uap skala kecil. Pemanfaatan jerami untuk bahan bakar pembangkit dapat mengatasi masalah kelangkaan listrik di Indonesia (Makhrani, 2014). Pembakaran langsung merupakan teknologi pembangkit listrik dari jerami yang paling menjanjikan (Suramaythangkoor and Gheewala, 2010).

Sistem pembangkit listrik dengan pembakaran langsung merupakan cara yang paling sederhana dan paling tua untuk membangkitkan listrik dari biomassa. Sistem pembangkit listrik jerami (Gambar 3) terdiri dari komponen unit pengelolaan jerami (penyimpanan, pengecilan ukuran), tungku, boiler, kondenser, tangki air umpan, dan kontainer abu (Abdelhady *et al.*, 2014). Dalam pembangkit ini jerami dibakar di dalam tungku dan memanaskan boiler untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Bal jerami dikirim dari bin penyimpanan dan diumpungkan ke tungku boiler. Di dalam boiler, sebagian jerami dibakar di atas sarangan (*grate*) dan sebagian lainnya tertunda dan terbakar di dalam tungku. Uap bersuhu dan bertekanan tinggi yang dihasilkan boiler memutar turbin yang dihubungkan dengan generator. Ketika turbin berputar maka generator juga berputar sehingga menghasilkan listrik yang kemudian ditransmisikan ke jaringan.

Pembangkit listrik berbahan bakar jerami padi berpotensi menurunkan emisi GRK sebesar 1.79 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh jika dibandingkan dengan pembangkit batubara, dan 1.05 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh jika dibandingkan dengan pembangkit gas alam (Shafie *et al.*, 2014). Di India, Soam *et al.* (2017) menyimpulkan tiap ton jerami padi kering yang dipakai untuk membangkitkan listrik dapat mereduksi emisi GRK 1.47 ton CO<sub>2</sub>-eq. Tetapi, Jenkins *et al.* (2000) mencatat bahwa pencampuran jerami padi sebanyak 20% pada pembangkit listrik berbahan bakar kayu justru meningkatkan biaya bahan bakar sebesar 25% (dari \$20 menjadi \$24.80 per ton). Studi di Thailand juga menunjukkan biaya bahan bakar pembangkit listrik jerami (0.38–0.61 Baht/MJ) belum kompetitif dibandingkan dengan batubara (0.30 Baht/MJ), tetapi masih sebanding dengan biomassa lain (0.35–0.53 Baht/MJ) (Suramaythangkoor and Gheewala, 2010). Untuk *boiler* industri, pemanfaatan jerami lebih kompetitif dan fleksibel dengan dua opsi, yaitu (1) menginstal *boiler* khusus berbahan bakar jerami; atau (2) jika memakai boiler batubara, maka penggantian bahan bakar dari batubara ke jerami akan memberikan penghematan biaya penyediaan bahan

bakar sebesar 0.01 Baht/MJ panas. Berdasarkan hal ini, pembangkit listrik tenaga jerami perlu diupayakan terutama untuk masyarakat yang tidak terjangkau PLN atau untuk mengoperasikan pabrik penggilingan padi sehingga dapat mengurangi konsumsi listrik konvensional.

### Gasifikasi Jerami

Gasifikasi merupakan teknologi konversi energi jerami yang menjanjikan untuk menghasilkan daya listrik atau panas (Suramaythangkoor and Gheewala, 2010). Gasifikasi adalah proses termokimia dimana biomassa dikonversi menjadi syngas yang terdiri dari CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan sedikit gas lain. Syngas dapat digunakan sebagai bahan bakar maupun feedstock industri. Gasifikasi jerami dapat mengurangi polusi dan memperbaiki kualitas udara rumah tangga. Delivand *et al.* (2011) menyimpulkan gasifikasi kapasitas pembangkit 8-10 MW lebih praktis dan memenuhi kriteria keekonomian. Studi di Pakistan menyimpulkan gasifikasi biomassa layak diimplementasikan di wilayah pedesaan dengan populasi sekitar 200 keluarga atau untuk industri kecil (Khan, 2015). Sistem pembangkitan listrik jerami dapat ditingkatkan efisiensinya hingga 43% dengan mengintegrasikan semua komponen sistem, yaitu torefaksi, gasifikasi, pembersihan gas, dan pembangkit siklus kombinasi (Darmawan *et al.*, 2017).

Sistem gasifikasi *fluidized bed* sesuai untuk jerami padi, tetapi sistem ini terkendala karena tidak bisa bekerja pada skala kecil. Sistem gasifikasi *downdraft* atau *updraft* skala kecil dengan pelet atau briket jerami dapat dikembangkan di pedesaan atau untuk menjalankan penggilingan padi. Tetapi, aplikasi gasifikasi jerami padi masih akan lambat karena kadar abu dan kalium yang tinggi yang akan dibahas di bagian selanjutnya.

### Pirolisis Jerami

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia dari biomassa pada kondisi tanpa oksigen (anaerob) atau dengan sedikit oksigen dalam kisaran suhu relatif rendah 300–700°C. Selama pirolisis, molekul-molekul hidrokarbon kompleks dan besar pecah menjadi molekul-molekul gas, cairan, dan arang yang lebih sederhana. Pirolisis diklasifikasikan menjadi pirolisis lambat dengan produk utama arang, dan pirolisis cepat dengan produk utama bio-oil atau minyak pirolisis. Pütün *et al.* (2004) melaporkan bahwa bio-oil dari jerami padi mencapai nilai maksimum 35,86% pada proses dengan uap air. Yang *et al.* (2011) melaporkan suhu pirolisis optimum 450°C dengan aliran gas carrier 10 L/menit. Pada penelitian ini produk bio-oil mencapai 41.3% (w/w) dengan nilai pH sekitar 4.1 dan viskositas pada 25°C sekitar 9 cSt. Jung *et al.* (2008) melaporkan suhu reaksi optimal untuk produksi bio-oil dari jerami padi adalah antara 440 hingga 500°C dengan produksi bio-oil mencapai 69%.

Hingga kini pirolisis jerami masih dalam tahap pengembangan untuk menghasilkan produk bernilai tinggi, yaitu minyak pirolisis yang merupakan bahan dasar (*building block*) bagi proses lebih lanjut. Pirolisis lambat dengan produk cair, arang, dan gas yang seimbang lebih berpeluang untuk dikembangkan karena tidak memerlukan perkakas yang rumit.

### Etanol Jerami

Karena kaya akan selulosa dan hemiselulosa dan tidak bersaing dengan bahan makanan, jerami padi juga menjadi bahan baku yang menjanjikan untuk produksi etanol generasi kedua. Ada dua platform teknologi konversi yang tengah dikembangkan, yaitu platform syngas dan platform gula. Dalam platform syngas, jerami digasifikasi untuk menghasilkan syngas yang kemudian difermentasi atau diproses secara katalitik untuk menghasilkan etanol (Drapcho *et al.*, 2008). Dalam platform gula, selulosa dan hemiselulosa dihidrolisis dengan bantuan asam atau enzim menjadi gula (seperti glukosa, xylosa, arabinosa, dan galaktosa), lalu difermentasi untuk menghasilkan etanol. Platform gula hanya dapat memanfaatkan selulosa dan hemiselulosa. Tetapi, selulosa dan hemiselulosa terikat oleh lapisan lignin yang susah terhidrolisis. Kehadiran abu dan kandungan silika yang tinggi menimbulkan masalah dalam produksi etanol dari jerami padi. *Pretreatment* merupakan tahap yang paling mahal (Mosier *et al.*, 2005), sehingga pemilihan metode *pretreatment* yang tepat menjadi tantangan utama dalam pengembangan teknologi konversi jerami padi menjadi etanol yang efisien sehingga layak secara ekonomi (Binod *et al.*, 2010).

Rute konversi jerami ke etanol adalah yang paling lambat perkembangannya di Indonesia. Belum ada tanda-tanda bahwa teknologi ini akan teraplikasi dalam waktu dekat. Salah satu kendalanya adalah biaya proses produksi bahan bakar etanol yang tidak kompetitif. Jangankan bahan bakar etanol generasi kedua yang berbasis serat, etanol generasi pertama pun belum terjangkau harga keekonomiannya. Sebuah industri etanol berbahan baku singkong di Lampung Utara sudah berhenti beberapa tahun lalu akibat harga bahan baku yang mahal.

### Biogas Jerami

Produksi biogas diakui sebagai salah satu proses konversi biomassa menjadi energi terbarukan yang paling ramah lingkungan (Mussoline *et al.*, 2013). Banyak penelitian yang membuktikan viabilitas produksi biogas dari campuran jerami padi dan limbah organik lainnya. Kalra dan Panwar (1986) melaporkan setiap kilogram jerami padi dapat menghasilkan sekitar 220 L biogas. Campuran jerami padi dan kotoran sapi (perbandingan berat kering 3:1) dapat meningkatkan produksi biogas hingga 434.2 L/gVS yang terdegradasi dengan kandungan metana mencapai 50.12% (Haryanto *et al.*, 2018). Kotoran hewan yang umum digunakan sebagai sumber bakteri

meliputi kotoran babi, kotoran sapi, dan kotoran ayam. Kotoran sapi yang dicampur kotoran ayam dapat meningkatkan kapasitas *buffering* dan menghasilkan efek sinergis (Wang *et al.*, 2014). Mussoline *et al.* (2013) melaporkan kondisi optimal adalah pH (6.5–8.0), suhu (35–40°C) dan rasio C/N 25–35 dan dari digester 1-m<sup>3</sup> berisi campuran 50 kg jerami padi dengan air limbah babi dapat diperoleh biogas total 22.859 L selama 189 hari (231 L CH<sub>4</sub>/kgVS). Jika sistem diperluas untuk pertanian padi 100-ha, maka skenario ini dapat menghasilkan 100,000 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> per tahun, setara 328 MWh. Biogas dapat digunakan untuk membangkitkan daya listrik melalui mesin pembakaran internal maupun melalui boiler. Hibukawa *et al.* (2014) melaporkan bahwa Nagaoka Wastewater Treatment Plant di kota Niigata, Jepang, memerlukan 1916 ton jerami padi (kadar air, 20%) untuk dicampurkan dengan lumpur air limbah guna menghasilkan biogas. Hal ini merupakan motivasi bahwa jerami padi memiliki prospek yang baik untuk digunakan sebagai substrat dalam proses produksi biogas.

Meskipun demikian, suatu perlakuan awal (*pretreatment*) diperlukan untuk jerami padi karena dinding lignin pada jerami menghambat pencernaan (*digestibility*), yang mengurangi efisiensi konversi menjadi biogas. Berbagai metode *pretreatment* jerami padi dapat dipilih, seperti perlakuan mekanis (pengecilan ukuran), bahan kimia, termal, dan enzim (Bruni *et al.*, 2010). Perlakuan menggunakan alkali merupakan yang sangat efektif mengurangi lignin sehingga meningkatkan proses dekomposisi anaerobik. Produksi biogas dari jerami padi dengan perlakuan NaOH meningkat antara 27.3–64.5% (He *et al.*, 2008). *Pretreatment* dengan 0.5 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> pada 110°C selama 2 jam menghasilkan 292 L CH<sub>4</sub>/kgVS, sedangkan jerami tanpa diolah hanya memproduksi 130 L CH<sub>4</sub>/kgVS (Dehghani *et al.*, 2015).

### Tantangan

Tantangan pemanfaatan jerami padi meliputi persoalan sosial-ekonomi terkait dengan praktek budidaya padi di lahan basah yang berakibat pada mahalnya biaya pengumpulan dan transportasi, serta persoalan teknis yang meliputi karakteristik intrinsik dari jerami itu sendiri.

### Pengumpulan dan Transportasi

Pengumpulan jerami masih menjadi tantangan utama dalam rantai penyediaan jerami untuk penggunaan lebih lanjut. Jerami perlu dikumpulkan dan diikat agar lebih kompak dan mudah diangkat. Kebiasaan petani Indonesia yang memanen padi ketika kondisi lahan masih basah menyulitkan proses koleksi sehingga menjadi mahal. Pada pemanenan tradisional dengan sabit, proses perontokan (baik menggunakan thresher maupun dibanting pada gebot) akan meninggalkan jerami yang terkumpul dalam satu area. Persoalan juga dihadapi pada proses



transportasi yang biasanya dilakukan menggunakan truk. Demi penghematan, sopir cenderung untuk mengangkut jerami sebanyak mungkin. Dengan kondisi yang terurai, maka pemuatan dilakukan dengan menumpuk dan mengikat jerami sampai tinggi. Hal ini membahayakan pengguna jalan lainnya karena selain menghalangi jarak pandang, muatan yang tinggi juga rawan mengakibatkan truk terguling.

Jika kondisi tanah pada saat panen cukup kering, maka pengumpulan dapat dilakukan secara mekanis. Studi di Vietnam menunjukkan pengumpulan jerami secara mekanis berkapasitas 0.87–2.47 ton/jam dapat menekan kebutuhan tenaga kerja hingga 90% dengan biaya pengumpulan jerami antara 12–18 US\$/ton (Nguyen *et al.*, 2016). Biaya pengumpulan jerami padi di Taiwan 31.66 US\$/ton dan biaya transportasi 20.7 US\$/ton (Chiu *et al.*, 2016). Pengumpulan jerami padi secara mekanis dapat mencegah pembakaran di lahan, menjamin kelangsungan pasokan feedstock untuk penggunaan lebih lanjut, dan memberikan nilai tambah bagi budidaya padi. Oleh karena itu, kajian menyeluruh sistem koleksi dan transportasi perlu dilakukan untuk mempertimbangkan jerami padi sebagai sumber energi. Hambatan utama pemanfaatan jerami padi untuk energi adalah biaya yang tinggi untuk logistik pengumpulan, pengangkutan, penanganan dan penyimpanan. Biaya transportasi jerami padi dipengaruhi oleh jarak tempuh. Pada jarak tempuh antara 12–20 km, biaya transportasi jerami padi 5.40–6.40 \$/ton dan peningkatan 0.12 \$/ton per km (Jenkins *et al.*, 2000).

Kini, pemanenan padi banyak dilakukan menggunakan mesin pemanen kombinasi (*combine harvester*). Dengan mesin combine harvester, proses pengumpulan jerami padi menjadi makin sulit dan mahal karena jerami tercecer dan tersebar di lahan (Samuel, 2013). Logistik penyediaan bahan bakar sangat berpengaruh terhadap ekonomi pembangkit listrik biomassa, khususnya jerami padi. Salah satu gagasan menarik adalah mengoptimalkan mesin combine agar mampu memanen padi, merontok dan mengepak gabah, serta menggulung jerami padi *in situ* menjadi bal (Gambar 4). Analisis penggunaan mesin baler di Thailand (Delivand *et al.*, 2011) menunjukkan biaya total operasi logistik bervariasi dari 18.75 hingga 19.89 US\$/t. Menyatukan proses pemanenan hingga penggulangan jerami padi dalam sekali kerja menjadi penting karena biaya untuk koleksi jerami cukup besar. Dengan cara ini proses pemanenan jerami hanya menyisakan bongkar-muat dan transportasi.

### Karakteristik Intrinsik Jerami Padi

Jerami padi merupakan bahan bakar yang buruk, terutama untuk sistem yang beroperasi pada suhu tinggi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik intrinsik dari jerami padi itu sendiri, seperti kadar abu yang tinggi dan kandungan elemen-elemen (Si, K, Na, S, Cl, P, Mg, dan Fe) yang tinggi. Kandungan abu yang tinggi menurunkan nilai energi (Gambar 5). Abu yang tinggi juga mengakibatkan tambahan biaya 0.5 \$/MWh pada

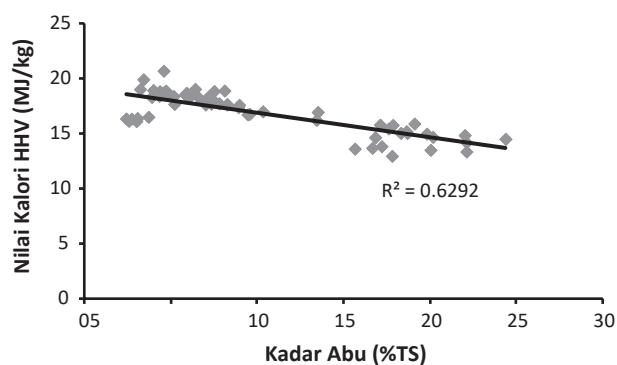
biaya total pembangkitan untuk menangani masalah yang terkait dengan abu dan ammonia (Jenkins *et al.*, 2000).

Komposisi kimia abu jerami padi yang terdiri dari logam alkali dan alkali tanah (Si, Ca, Mg, Na dan K) bertanggung jawab pada berbagai reaksi yang tidak diinginkan dalam sistem pembakaran. Konsentrasi abu dan kandungan silika serta logam alkali yang tinggi pada jerami padi mengakibatkan aglomerasi, fouling, slagging pada komponen boiler (Jenkins *et al.*, 1998) yang berdampak pada menurunnya efisiensi sistem (Jenkin *et al.*, 2000) dan kegagalan pada sebagian besar tanur dan boiler. Kegagalan ini telah menghambat pemanfaatan jerami untuk boiler skala besar, bahkan di wilayah dimana boiler berdekatan dengan sumber jerami. Kandungan silika yang tinggi pada jerami padi menyebabkan komponen mesin pencacah atau penggiling cepat aus. Jerami padi juga sangat sulit dibakar, terutama pada tungku pembakaran yang dirancang untuk pembangkit akibat terbentuknya deposit. Deposit ini menghambat laju perpindahan panas, memicu pembentukan kerak dalam tungku dan pada sarangan sehingga mempersulit pengumpanan bahan bakar dan pembuangan abu (Jenkins *et al.*, 1998). Hal ini meningkatkan biaya pembangkitan listrik karena rendahnya efisiensi.

Salah satu upaya menurunkan K dan Cl adalah pelindian (*leaching*). Pelindian dengan air dapat menghilangkan 80% K dan 90% Cl. Pelindian



Gambar 4. Sebuah mesin pemanen padi *combine harvester-baler* (www.youtube.com).



Gambar 5. Pengaruh kadar abu biomassa terhadap nilai kalori (data dari <https://phyllis.nl>).

dapat dilakukan secara alami dengan membiarkan jerami terkena hujan lalu memanennya, atau merendam jerami setelah dipanen. Pelindian jerami menggunakan air limbah tahu dapat menurunkan K hingga 93.75% hanya dalam waktu 3.75 menit (Zubaidah, 2019). Pencampuran 20-25% jerami yang sudah terlindi dengan kayu bakar atau sekam padi dapat menurunkan resiko akibat kerak (Baker, 2000).

### Simpulan

Jerami padi berpotensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan. Potensi tahunan jerami padi di Indonesia mencapai 48.39 juta ton yang setara dengan 693 PJ. Teknologi konversi jerami menjadi energi terbarukan yang tersedia meliputi pembakaran terkontrol, densifikasi untuk menghasilkan pelet maupun briket, gasifikasi, pirolisis, fermentasi, dan dekomposisi anaerobik (biogas). Tantangan utama pemanfaatan jerami padi meliputi kadar abu dan kadar logam alkali yang tinggi yang mengakibatkan aglomerasi pada sistem konversi dengan suhu tinggi. Perlakuan *leaching* (pelindihan) menggunakan air bisa mengurangi kandungan logam alkali secara signifikan. Tantangan lain adalah proses koleksi dan transportasi yang secara ekonomi masih mahal. Sifat jerami yang lepas mengakibatkan rumitnya proses pengumpulan dan transportasi. Salah satu solusinya adalah densifikasi *in situ* yang disatukan dengan proses pemanenan menggunakan mesin combine harvester. Sejauh ini pembakaran langsung, densifikasi, dan biogas merupakan teknologi konversi jerami padi yang sudah diaplikasikan, sedangkan teknologi lainnya (gasifikasi, pirolisis, fermentasi etanol) masih dalam tahap pengembangan.

### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Penelitian Terapan Unggulan BLU Universitas Lampung tahun 2018 dengan nomor kontrak 1459/UN26.21/PN/2018. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada dua orang reviewer yang telah memberikan saran dan masukan berharga.

### Daftar Pustaka

Abdelhady, S., D. Borello, S. Shaban and F. Rispoli. 2014. Viability Study of Biomass Power Plant Fired with Rice Straw in Egypt. *Energy Procedia* Vol. 61: 211-215.

Abraham, A., A.K. Mathew, R. Sindhu, A. Pandey and P. Binod. 2016. Potential of rice straw for bio-refining: An overview. *Bioresource Technology* Vol. 215: 29-36.

Baker, R. 2000. Biomass fuel leaching for the control of fouling, slagging, and agglomeration in biomass

power generation. *PhD Dissertation*, University of California.

Binod, P., R. Sindhu, R.R. Singhanian, S. Vikram, L. Devi, S. Nagalakshmi, N. Kurien, R.K. Sukumaran, A. Pandey. 2010. Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresource Technology* Vol. 101: 4767-4774.

BPS. 2018. Statistik Indonesia 2018. Badan Pusat Statistik, Jakarta.

Bruni, E., A.P. Jensen and I. Angelidaki. 2010. Comparative study of mechanical, hydro-thermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource Technology* Vol. 101: 8713-8717.

Chang, C.H., C.C. Liu and P.Y. Tseng. 2013. Emissions inventory for rice straw open burning in Taiwan based on burned area classification and mapping using Formosat-2 satellite imagery. *Aerosol Air Qual. Res.* Vol. 13: 474-87.

Chiu, Y.-C., S.-J. Guo, S. Chen, C.-Y. Tsai and J.-M. Tsai. 2016. Planning the collection and transportation of rice straw in Nantou County, Taiwan. *Applied Engineering in Agriculture* Vol. 32(5): 1-8.

Chou, C.-S, S.-H. Lin, and W.-C. Lu. 2009. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel Processing Technology* Vol. 90, p. 980-987.

Darmawan, A., A.C. Fitrianto, M. Aziz, and K. Tokimatsu. 2017. Enhanced electricity production from rice straw. *Energy Procedia* Vol. 142: 271-277.

Dehghani, M., K. Karimi and M. Sadeghi. 2015. Pretreatment of rice straw for the improvement of biogas production. *Energy Fuels* Vol. 29(6): 3770-3775.

Delivand, M.K., M. Barz, S.H. Gheewala and B. Sajjakulnukit. 2011. Economic feasibility assessment of rice straw utilization for electricity generating through combustion in Thailand. *Applied Energy* Vol. 88: 3651-3658.

Djajanegara, A. and M. Rangkuti. 1983. Residues of importance as potential animal feeds in Indonesia, in edited by Shacklady, C.A. (Ed). *The Use of Organic Residues in Rural Communities*, United Nations University Press, Tokyo: 3-10.

Drapcho, C.M., N.P. Nhuan, T.H. Walker. 2008. *Biofuels Engineering Process Technology*. Mc Graw Hill Companies, Inc., New York : 133-134.

Gill, N., R. Dogra and B. Dogra. 2017. Influence of moisture content, particle size, and binder ratio on quality and economics of rice straw briquettes. *Bioenergy Research*. DOI: 10.1007/s12155-017-9877-9.

Haryanto, A., B.P. Sugara, M. Telaumbanua, and R.A.B. Rosadi. 2018. Anaerobic co-digestion of cow dung and rice straw to produce biogas using semi-continuous flow digester: Effect of urea addition. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* Vol. 147(1): 012032.

- Hibukawa, H.S., A.I. Noue, S.H. Imeno and T.K. Omatsu. 2014. Examination of rice straw collection and transportation systems for the production of biogas by co-digestion with sewage sludge: A case study of the Nagaoka region in Niigata Prefecture. *Japanese Journal of FarmWork Research* Vol. 49(2): 69-78.
- IRRI (International Rice Research Institute). 2018. Rice Straw (Rice Knowledge Bank). <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/rice-by-products/rice-straw> (visited February 10, 2018).
- Ishii, K. and T. Furuichi. 2014. Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. *Waste Management* Vol. 34(12): 2621-2626.
- Jenkins, B.M. 1998. Physical properties of biomass, in Kitani, O. and C.W. Hall (Eds). *Biomass Handbook*. Gordon and Breach, New York, p.
- Jenkins, B.M., R.R. Bakker, R.B. Williams, R. Bakker-Dhaliwal, M.D. Summers, H. Lee, L.G. Bernheim, W. Huisman, L.L. Yan, P. Andrade-Sanchez and M. Yore. 2000. Commercial feasibility of utilizing rice straw in power generation. *Proceedings Bioenergy 2000*, Buffalo, New York.
- Jenkins, B.M., J.J. Mehlschau, R.B. Williams, C. Solomon, J. Balmes, M. Kleinman and N. Smith. 2003. Rice straw smoke generation system for controlled human inhalation exposures. *Aerosol Sci. Technol.* Vol. 37(5): 437-454.
- Jung, S-H., Kang, B-S. and Kim, J-S. 2008. Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol. 82(2): 240-247.
- Kalra, M.S. and J.S. Panwar. 1986. Anaerobic digestion of rice crop residues. *Agricultural Wastes* Vol. 17: 263-269.
- Khan, A. 2015. Economic feasibility of biomass gasification for electricity generation in Pakistan. *Global Journal of Science Frontier Research: E Interdisciplinary* Vol.15 (1): 19-23.
- Makhrani. 2014. Potential analysis of rice straw as an alternative energy source for substitute coal in Indonesia. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 554: 276-280
- Mandal, K.G., A.K. Misra, K.M. Hati, K.K. Bandyopadhyay, P.K. Ghosh and M. Mohanty. 2004. Rice residue management options and effects on soil properties and crop productivity. *Food Agric. Environ.* Vol. 2: 224-231.
- Marsetyo. 2008. Strategi pemenuhan pakan untuk peningkatan produktivitas dan populasi sapi potong. *Seminar Nasional Pengembangan Sapi Potong Untuk Mendukung Percepatan Pencapaian Swasembada Daging Sapi 2008-2010*. Kerjasama Universitas Tadulako dan Subdinan Peternakan Distanbunak, Palu : 94-103.
- Matsumura, Y., T. Minowa and H. Yamamoto. 2005. Amount, availability, and potential use of rice straw (agricultural residue) biomass as an energy resource in Japan. *Biomass and Bioenergy* Vol. 29: 347-354
- Mosier, N., C. Wyman, D. Dale, R. Elander, Y.Y. Lee, M. Holtzapfle. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* Vol. 96: 673-686.
- Mussoline, W., G. Esposito, A. Giordano and P. Lens. 2013. The anaerobic digestion of rice straw: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* Vol. 43: 895-915.
- Nguyen, H.V., C.D. Nguyen, T.V. Tran, H.D. Hau, N.T. Nguyen and M. Gummert. 2016. Energy efficiency, greenhouse gas emissions, and cost of rice straw collection in the Mekong river delta of Vietnam. *Field Crops Research* 198: 16-22.
- Nurhayati, T., Y. Waridi and H. Roliadi. 2006. Progress in the technology of energy conversion from woody biomass in Indonesia. *Forestry Studies in China* Vol. 8(3), p. 1-8.
- Pütün, A.E., E. Apaydin, and E. Pütün. 2004. Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis. *Energy* Vol. 29(12-15): 2171-2180.
- Said, N., M.M. Abdel daiem, A. Garcia-Maraver, and N. Zamorano. 2015. Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. *Fuel Processing Technology* Vol. 138: 56-64.
- Samuel, V. 2013. Environmental and socioeconomic assessment of rice straw conversion to ethanol in Indonesia: the case of Bali. *Thesis*. KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, Stockholm, Sweden.
- Shafi, S.M., H.H. Masjuki and T.M.I. Mahlia. 2014. Life cycle assessment of rice straw-based power generation in Malaysia. *Energy* Vol. 70: 401-410.
- Singh, A. and Y. Singh. 1982. Briquetting of paddy straw. *Agric Mech Asia Africa Latin Am.* Vol. 13(4): 42-44.
- Soam, S., P. Borjesson, P.K. Sharma, R.P. Gupta, D.K. Tuli and R. Kumar. 2017. Life cycle assessment of rice straw utilization practices in India. *Bioresour. Technol.* Vol. 228: 89-98.
- Stelte, W., J.K. Holm, A.R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt and U.B. Henriksen. 2011. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel* Vol. 90: 3285-3290.
- Suramaythangkoor, T. and S.H. Gheewala. 2010. Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand. *Applied Energy* Vol. 87: 128-133.
- Tumuluru, J.S., C.T. Wright, J.R. Hess and K.L. Kenney., 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* Vol. 5: 683-707.

- Wang, X.X., Lu, F. Li and G. Yang. 2014. Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition. *PLOS ONE* Vol. 9(5): e97265.
- Yang, S.Y., Zhang, C. and Chen, Z. 2011. The physical characteristics of bio-oil from fast pyrolysis of rice straw. *Advanced Materials Research* Vol. 328-330: 881–886.
- Zubaidah, U. 2019. Pencucian (*Leaching*) Kadar Kalium (K) Jerami Padi (*Oryza sativa*) Menggunakan Limbah Cair Industri Tahu untuk Meningkatkan Mutu Bahan Bakar. *Skripsi*. Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Lampung.