

PELUANG PENGEMBANGAN BIOGAS DI SENTRA SAPI PERAH

Opportunities of Biogas Development in Dairy Cattle Center Areas

Meksy Dianawati dan Siti Lia Mulijanti

Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Jawa Barat
 Jalan Kayuambon No. 80, Kotak Pos 8495 Lembang 40391, Bandung Barat, Indonesia
 Telp. (022) 2786238, 2789846, Faks (022) 2789846
 E-mail: meksyd@yahoo.com, bptp-jabar@litbang.pertanian.go.id

Diterima: 27 April 2015; Direvisi: 27 Juli 2015; Disetujui: 5 Agustus 2015

ABSTRAK

Kotoran sapi perah yang tidak diolah dengan benar dapat mencemari lingkungan serta memengaruhi produksi dan kualitas susu. Limbah peternakan ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk mensubstitusi kebutuhan energi fosil yang semakin meningkat dan ketersediaannya makin terbatas. Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah pertanian maupun peternakan. Makalah ini mengulas alternatif pemanfaatan kotoran sapi perah sebagai biogas. Pengolahan kotoran ternak menjadi biogas memberikan banyak manfaat, yakni sebagai sumber energi alternatif, pupuk organik padat maupun cair, dan pakan ternak, serta dapat memperbaiki sanitasi lingkungan. Oleh karena itu, pembuatan biogas perlu dimasyarakatkan terutama di sentra sapi perah. Biogas lebih murah dibandingkan sumber energi lain sehingga peternak lebih baik berinvestasi membangun digester secara swadaya dibandingkan membeli gas elpiji. Pemerintah dapat memberikan subsidi digester kepada peternak sapi perah untuk mengurangi ketergantungan pada elpiji. Perbaikan teknologi biogas, integrasi sistem biogas dengan produksi pupuk organik, serta sosialisasi dan bimbingan teknis produksi dan pemanfaatan biogas dapat memperluas pengembangan biogas di masyarakat. Peminjaman kredit lunak dari pemerintah maupun swasta juga dapat mendorong pengembangan biogas.

Kata kunci: Biogas, limbah, peternakan, energi, subsidi

ABSTRACT

Dairy cattle waste that is not properly managed can affect the environment and milk quality. This livestock waste can be used as an alternative energy source to substitute the growing fossil energy needs and its limited availability. Biogas is a renewable energy source produced from treatment process of agriculture and livestock wastes. This paper informed utilization of livestock biogas as an alternative energy. Biogas production gives many benefits, i.e. as a source of alternative energy, organic fertilizer either in solid or liquid form, and animal feed, as well as improving environmental sanitation. With these benefits, biogas production should be promoted, especially in the dairy cattle areas. Biogas is cheaper compared with other energy sources. Therefore, farmers are better to invest in building a biogas digester themselves than buying LPG monthly. Government could provide subsidies of biogas digester to rural communities in farm centers to reduce dependence on LPG

Biogas technological improvements, integration of biogas with organic fertilizer production, and dissemination and technical guidance in biogas use and production can expand biogas development at the community level. Soft loans from government and private parties could also encourage biogas development.

Keywords: Biogas, waste, livestock, energy, subsidies

PENDAHULUAN

Usaha peternakan sapi perah dapat memberikan dampak positif terhadap pembangunan, berupa peningkatan pendapatan peternak, perluasan kesempatan kerja, peningkatan ketersediaan pangan terutama daging dan susu, serta peningkatan pendapatan asli daerah. Namun, isu lingkungan dan kesehatan terkait dengan peternakan sapi perah terkadang kurang diperhatikan. Flotats *et al.* (2009) menyatakan bahwa peternakan intensif dapat mencemari lingkungan melalui pembuangan kotoran ternak ke tanah, air permukaan, serta emisi gas metana ke atmosfer. Oleh karena itu, menurut Melse dan Timmerman (2009), peternakan berkelanjutan tidak hanya perlu memerhatikan kelangsungan hidup ternak dan produksinya, tetapi juga penanganan limbah yang dapat mencemari lingkungan, khususnya di daerah dengan populasi ternak tinggi. Kebersihan kandang, ternak, dan peralatan, serta petugas harus dijaga karena akan memengaruhi kondisi dan kesehatan serta produktivitas ternak (Kasworo *et al.* 2013). Usaha peternakan yang tidak memerhatikan kondisi lingkungan dapat menemui kegagalan karena kerugian akibat limbah yang tidak dikelola dengan benar (Sudiarto 2008).

Limbah ternak umumnya digunakan sebagai pupuk kompos (Budiyanto 2011; Syamsuddin *et al.* 2012) dan hanya sedikit yang dimanfaatkan sebagai biogas (Dianawati *et al.* 2014; Farahdiba *et al.* 2014), padahal limbah ternak berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi pada saat bahan bakar energi terbatas. Kebutuhan bahan bakar minyak (BBM) untuk keperluan industri, transportasi, maupun rumah tangga dari tahun ke tahun semakin meningkat. Menurut Farahdiba *et al.* (2014),

persediaan minyak Indonesia diprediksi akan habis dalam jangka waktu 15 tahun, sedangkan gas alam akan habis dalam 60 tahun. Apabila terus dikonsumsi tanpa ditemukannya cadangan baru, diperkirakan cadangan BBM ini akan habis dalam dua dekade mendatang.

Biogas merupakan salah satu jenis energi yang dapat digunakan ditinjau dari aspek teknis, sosial, maupun ekonomi, terutama untuk memenuhi kebutuhan energi di pedesaan (Rustijarno 2009; Rajendran *et al.* 2012; Orskov *et al.* 2014). Pemanfaatan energi biogas memberikan beberapa keuntungan, yaitu mengurangi bau kotoran ternak yang tidak sedap, mencegah penyebaran penyakit, mengurangi efek gas rumah kaca, menghasilkan panas dan daya mekanis/listrik, serta memberikan hasil samping berupa pupuk padat dan cair (Borges de Oliveira *et al.* 2011; Orskov *et al.* 2014; Insam *et al.* 2015). Biogas dapat dimanfaatkan terutama untuk memasak, penerangan, dan tenaga penarik pompa air pada tingkat individual maupun untuk listrik, panas, pembangkit listrik, dan bahan bakar untuk kendaraan di tingkat industri (Minde *et al.* 2013). Biogas juga dapat memecahkan masalah lingkungan seperti degradasi tanah, penggundulan hutan, emisi CO₂, polusi udara dalam ruangan, polusi organik, dan masalah-masalah sosial seperti penggantian bahan bakar kayu dan fosil. Menurut Pereira-Querol *et al.* (2014), biogas merupakan komponen sentral sistem usaha tani yang mengombinasikan pengolahan limbah, penghasil energi panas dan listrik, serta produksi pupuk. Pemanfaatan limbah menjadi biogas secara ekonomi akan sangat kompetitif untuk mengatasi peningkatan harga BBM dan pupuk anorganik. Dengan demikian, limbah peternakan yang dihasilkan tidak lagi menjadi beban biaya usaha, tetapi menjadi hasil ikutan yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan bila mungkin setara dengan nilai ekonomi produk utama (Sudiarto 2008; Insam *et al.* 2015).

Makalah ini mengulas pemanfaatan kotoran sapi perah sebagai energi biogas untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar tidak terbarukan yang semakin berkurang ketersediaannya. Informasi tersebut diharapkan bermanfaat sebagai bahan pertimbangan dalam pengembangan digester biogas di sentra sapi perah di pedesaan sebagai alternatif pengganti subsidi BBM.

POTENSI LIMBAH KOTORAN SAPI PERAH

Indonesia memiliki potensi ternak yang sangat besar yang tersebar di beberapa daerah. Ternak yang diusahakan beraneka ragam, antara lain sapi perah, sapi potong, kerbau, kuda, kambing, domba, babi, ayam buras, ayam ras pedaging, ayam ras petelur, dan itik. Usaha ternak sapi perah memerlukan kondisi agroekologis beriklim dingin sehingga ternak ini hanya diusahakan di daerah yang memenuhi persyaratan tersebut.

Populasi sapi perah di Indonesia pada tahun 2014 mencapai 502.516 ekor dengan populasi tertinggi di Jawa

Timur, diikuti Jawa Barat, dan Jawa Tengah. Populasi sapi perah di Jawa Barat mencapai 135.345 ekor, yang tersebar di Kabupaten Bandung, Bandung Barat, Garut, Tasikmalaya, Bogor, Majalengka, Sukabumi, dan Sumedang. Produktivitas sapi perah yang dipelihara peternak saat ini tergolong rendah, yakni 9–10 liter/ekor/hari (Kasworo *et al.* 2013).

Seiring dengan peningkatan populasi sapi perah sebesar 4,51% dari tahun 2011 ke 2015 (Ditjen PKH 2015), kotoran yang dihasilkan juga meningkat. Apabila tidak dikelola dengan benar, limbah kotoran ini tidak saja memengaruhi produksi dan kualitas susu, tetapi juga lingkungan sekitarnya.

Dibandingkan dengan ternak lainnya, sapi perah menghasilkan kotoran paling banyak (Tabel 1). Kotoran tersebut berupa kotoran padat dan urine serta gas yang berbau tidak sedap. Peternak umumnya membuang kotoran sapi perah ke saluran air dan lahan yang terairi air tersebut, padahal kotoran yang dihasilkan setiap ekor ternak cukup banyak. Menurut Wahyuni (2008), sapi dengan bobot 640 kg/ekor menghasilkan kotoran 50 kg/hari. Jika dalam satu kelompok ternak sapi terdapat 100 ekor maka kotoran yang dihasilkan mencapai 5 ton/hari. Sementara itu, gas tidak sedap yang berupa gas metana dapat menimbulkan efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global karena memiliki dampak panas 21 kali lebih tinggi daripada gas karbon dioksida (Widodo *et al.* 2009). Hal ini menunjukkan perlunya pengelolaan limbah kotoran sapi perah dengan benar.

BIOGAS SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF

Biogas

Biogas merupakan campuran gas yang dihasilkan oleh bakteri dari bahan organik melalui fermentasi anaerobik (Abderezzak *et al.* 2012). Biogas umumnya terdiri atas 70% gas metana dan gas lainnya dalam jumlah sedikit (Insam *et al.* 2015). Biogas diperkirakan memiliki berat 20% lebih ringan dibandingkan udara. Biogas memiliki suhu

Tabel 1. Produksi dan kandungan bahan kering kotoran beberapa jenis ternak.

Jenis ternak	Bobot ternak/ ekor	Produksi kotoran ternak (kg/hari)	% bahan kering
Sapi potong	520	29	12
Sapi perah	640	50	14
Ayam petelur	2	0,1	26
Ayam pedaging	1	0,06	25
Babi dewasa	90	7	9
Domba	40	2	26

Sumber: Wahyuni (2008).

pembakaran antara 650–750°C dengan nilai panas pembakaran antara 4.800–6.700 kkal/m³, lebih rendah daripada gas metana murni yang mencapai 8.900 kkal/m³ (Widodo *et al.* 2009).

Pembentukan biogas dengan sistem anaerobik meliputi tiga tahap proses, yaitu: 1) hidrolisis, penguraian bahan-bahan organik mudah larut dan pencernaan bahan organik yang kompleks menjadi bentuk sederhana, 2) pengasaman, gula sederhana yang terbentuk pada tahap hidrolisis menjadi bahan makanan bagi bakteri pembentuk asam, serta 3) metanogenik, proses pembentukan gas metana (Haryati 2006). Keuntungan fermentasi anaerobik dibandingkan aerobik adalah pengurangan bahan organik cukup tinggi sehingga sesuai sebagai salah satu metode pengolahan limbah yang efektif (Abderezzak *et al.* 2012).

Teknologi Biogas

Reaktor biogas (digester) adalah konstruksi bangunan atau alat yang digunakan untuk mengolah berbagai bahan baku menjadi biogas. Menurut Abu-Dahrier *et al.* (2011), ada dua jenis digester berdasarkan cara pengisian bahan bakunya, yaitu *batch feeding* dan *continues feeding*. *Batch feeding* adalah jenis digester yang pengisian bahan organik dilakukan sekali sampai penuh, kemudian ditunggu sampai menghasilkan biogas. Setelah produksi biogas rendah, isian digester dibongkar dan diisi kembali dengan bahan organik yang baru. *Continues feeding* adalah jenis digester yang pengisian bahan organiknya dilakukan setiap hari dalam jumlah tertentu.

Berbagai tipe digester telah dikembangkan di Indonesia. Digester tipe kubah (*dome*) dibuat dengan menggali tanah yang kemudian dipasang bahan bangunan untuk membentuk digester sesuai dengan model yang diinginkan. Ada pula digester silinder yang terbuat dari tong atau drum baja yang dapat bergerak naik turun untuk menyimpan gas hasil fermentasi. Digester tipe plastik dan *fiberglass* banyak digunakan dalam skala rumah tangga. Kedua digester ini terdiri atas bagian yang berfungsi sebagai digester sekaligus penyimpan gas yang bercampur dalam satu ruangan tanpa sekat. Menurut Orskov *et al.* (2014), pilihan tipe digester bergantung pada kultur dan tradisi pengguna biogas.

Harga digester kubah cukup mahal karena bangunan harus tahan gempa bumi. Digester silinder terkadang mengalami korosi pada drumnya sehingga tidak awet. Digester plastik memiliki kelemahan mudah bocor, terutama jika terkena benda-benda tajam. Namun, Herriyanti (2015) menyatakan digester *fiber glass* mudah dideteksi bila ada kebocoran, daya tahan kuat, dan dapat dipindahkan. Menurut Rajendran *et al.* (2012), digester kubah banyak berkembang di China, sedangkan digester silinder banyak diadopsi di India.

Ukuran digester beraneka ragam, bergantung pada kotoran ternak yang dihasilkan. Menurut Sunaryo (2014),

Tabel 2. Ukuran digester dan kuantitas bahan baku.

Kapasitas pengolahan (m ³)	Produksi gas per hari (m ³)	Kotoran hewan yang dibutuhkan per hari (kg)	Jumlah ternak yang dibutuhkan (ekor)
4	0,8–1,6	20–40	3–4
6	1,6–2,4	40–60	5–6
8	2,4–3,2	60–80	7–8

Sumber: Sunaryo (2014).

digester 4 m² memerlukan kotoran ternak 20–40 kg dengan kepemilikan ternak 3–4 ekor sapi. Dengan kapasitas tersebut, gas yang dihasilkan per hari berkisar antara 0,8–1,6 m³ (Tabel 2). Penggunaan digester yang tidak sesuai dengan kebutuhan menyebabkan produksi gas rendah dan tekanan gasnya tidak mampu mendorong limbah biogas ke saluran pengeluaran.

Proses Produksi Biogas

Proses produksi biogas diawali dengan mengencerkan kotoran ternak dengan air dengan perbandingan 1: 1–2, bergantung pada kondisi kotoran ternak. Bahan ini harus mengandung berat kering 5–10% (Bond dan Templeton 2011). Menurut Putro (2007), air yang berlebihan dalam sistem dapat menghambat saluran biogas, menurunkan tingkat panas api, dan membuat api berwarna kemerahan. Pengadukan dapat dilakukan setiap selang waktu tertentu untuk mencegah pengendapan padatan pada dasar tangki dan pembentukan busa pada permukaan yang menyulitkan gas keluar (Melse dan Timmerman 2009). Masalah tersebut jarang terjadi pada sistem digester kontinu karena pada saat bahan baku dimasukkan akan memecahkan busa pada permukaan sehingga seolah-olah terjadi pengadukan (Haryati 2006). Pengadukan dengan kandungan padatan sekitar 10% dapat mencegah sedimentasi dan meningkatkan produksi gas dalam digester (Hartati *et al.* 2012).

Kotoran yang sudah dicampur air dimasukkan ke dalam digester sampai menutup saluran pemasukan dan pengeluaran, kemudian dibiarkan sampai gas yang dihasilkan stabil. Waktu untuk membentuk gas yang stabil sekitar 20–40 hari (Schievano *et al.* 2011). Setelah itu pengisian digester dilakukan setiap hari atau dua hari sekali, bergantung pada kondisi lingkungan dan jenis bahan bakunya. Untuk meningkatkan proses fermentasi, pada pengisian pertama perlu ditambahkan bakteri anaerob sebagai starter sebanyak 1 liter serta isi rumen segar dari rumah potong hewan sebanyak lima karung untuk digester berkapasitas 3,5–5 m³.

Gas yang dihasilkan pertama kali harus dibuang karena didominasi CO₂. Selanjutnya produksi gas CH₄ makin meningkat dan produksi CO₂ makin menurun. Pada saat komposisi CH₄ 54% dan CO₂ 27%, biogas akan menyala. Biogas langsung dapat dihubungkan dengan

kompas gas atau generator listrik. Gas yang dihasilkan sangat baik untuk pembakaran karena mampu menghasilkan panas yang cukup tinggi, apinya berwarna biru, tidak berbau, dan tidak berasap (Rustijarno 2009).

Limbah pembuatan biogas yang berupa cairan ataupun padatan dapat digunakan sebagai pupuk organik (Rajendran *et al.* 2012). Pupuk organik dari limbah biogas memiliki kandungan N total, amonium, dan pH lebih tinggi daripada limbah pertanian yang dikomposkan, sedangkan rasio C/N menurun dari 10,7 menjadi 7 sehingga memiliki kualitas yang baik (Insam *et al.* 2015). Aktivitas mikroba distimulasi setelah aplikasi limbah biogas yang berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan C dan hara lain (Frac *et al.* 2012).

Nkoa *et al.* (2014) menyatakan bahwa limbah biogas merupakan sumber N dengan risiko kehilangan N rendah. Sementara Dianawati (2014) melaporkan bahwa limbah biogas merupakan media tanam terbaik untuk kentang. Tanaman petersai yang dipupuk limbah biogas basah maupun kering memiliki produksi lebih tinggi daripada yang diberi pupuk kandang ayam dan kotoran sapi. Menurut Minde *et al.* (2013), pertumbuhan tanaman yang lebih baik setelah dipupuk limbah biogas karena serangan hama penyakit serta gulma lebih sedikit daripada yang diberi pupuk kandang yang difermentasi.

Limbah biogas mengandung vitamin B12 sehingga berpotensi digunakan sebagai pakan ternak. Kandungan vitamin B12 pada limbah biogas mencapai 3.000 mikrogram per kg limbah biogas kering. Sebagai perbandingan, tepung ikan dalam ransum pakan ternak hanya mengandung 200 mikrogram per kg, sedangkan tepung tulang sekitar 100 mikrogram per kg (Elizabeth dan Rosdiana 2011). Rajendran *et al.* (2012) menyatakan limbah biogas dapat digunakan untuk pakan itik dan ikan.

Faktor Penentu Keberhasilan Produksi Biogas

Faktor penentu keberhasilan produksi biogas antara lain adalah suhu, pH, dan rasio C/N bahan baku (Haryati 2006; Abu-Dahrieh *et al.* 2011; Orskov *et al.* 2014). Produksi biogas optimal berada pada daerah mesofilik yaitu pada suhu antara 30–35°C (Khalid *et al.* 2011). Biogas yang dihasilkan pada kondisi di atas suhu tersebut mempunyai kandungan karbon dioksida yang lebih tinggi, sedangkan bila di bawah suhu tersebut, produksi biogas hanya sedikit dan akan terhenti pada suhu di bawah 10°C (Haryati 2006). Oleh karena itu, digester biogas di daerah dataran tinggi dengan suhu rendah sering berada di bawah tanah untuk memperkecil biaya pemanasan dan mengatasi perubahan suhu yang mendadak yang dapat menurunkan produksi biogas.

Kondisi keasaman (pH) yang optimal untuk produksi biogas yaitu 6,8–7,5 (Orskov *et al.* 2014) karena bakteri tumbuh pada kisaran pH tersebut (Rajendran *et al.* 2012). Laju produksi biogas menurun pada kondisi pH yang

lebih tinggi atau rendah. Pada tahap awal fermentasi bahan organik akan terbentuk asam organik yang akan menurunkan pH. Untuk mencegah penurunan pH dapat ditambahkan larutan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) atau kapur (CaCO_3) (Elizabeth dan Rosdiana 2011).

Rasio optimum C/N untuk digester anaerobik berkisar antara 20–30 (Orskov *et al.* 2014). Jika C/N terlalu tinggi, nitrogen akan dikonsumsi dengan cepat oleh bakteri metanogen untuk pertumbuhannya dan hanya sedikit yang bereaksi dengan karbon sehingga gas yang dihasilkan rendah. Sebaliknya jika C/N rendah, nitrogen akan dibebaskan dan berakumulasi dalam bentuk amonia yang dapat meningkatkan pH (Haryati 2006).

PRODUKSI ENERGI

Perbandingan Biogas dengan Sumber Energi Lain

Biogas merupakan sumber energi alternatif potensial dari limbah pertanian dan peternakan untuk menggantikan energi tidak terbarukan. Widodo *et al.* (2009) menyatakan bahwa energi dari 1 m³ biogas sebanding dengan lampu 60–100 watt selama 6 jam, memasak tiga jenis makanan untuk 5–6 orang, sebanding dengan 0,7 kg bensin, menjalankan motor 1 PK selama 2 jam, atau sebanding dengan 1,25 kwh listrik. Hanif (2010) melaporkan bahwa energi yang terkandung dalam 1 m³ biogas sebesar 2.000–4.000 kkal atau dapat memenuhi kebutuhan memasak bagi satu keluarga (4–5 orang) selama 3 jam.

Di Argosari, Kabupaten Malang, digester ukuran 5 m³ dengan dua ekor sapi menghasilkan 3 m³ biogas yang cukup untuk memasak dan menyalakan genset 400 watt selama 6 jam (Farahdiba *et al.* 2014). Biogas ini dapat menggantikan pengeluaran 2 liter minyak tanah atau 10 kg kayu bakar per hari. Sunaryo (2014) melaporkan untuk memasak 1 liter air dibutuhkan 0,04 m³ biogas dalam waktu 10 menit. Untuk menanak 0,5 kg beras dibutuhkan rata-rata 0,15 m³ biogas dalam 30 menit. Penggunaan sehari-hari dalam rumah tangga membutuhkan gas rata-rata 3 m³.

Menurut Susilaningsih *et al.* (2007), biaya bahan bakar biogas per tahun sebesar Rp400.000, lebih rendah dibandingkan dengan kayu bakar yang mencapai Rp900.000, elpiji Rp 2.520.000, dan minyak tanah Rp1.980.000 (Tabel 3). Dengan demikian, penggunaan biogas sebagai bahan bakar lebih ekonomis dibandingkan dengan sumber energi lain. Tumwesige *et al.* (2014) menyatakan efisiensi biogas dalam skala kecil adalah 55% untuk memasak, 24% untuk mesin panas, dan 3% untuk penerangan.

Seekor sapi atau kerbau dapat menghasilkan biogas 0,3 m³ per hari (Sugiyono 2012). Susilaningsih *et al.* (2007) melaporkan bahwa untuk dapat memanfaatkan biogas, keluarga peternak dengan lima orang anggota di Kota Batu, Jawa Timur, membutuhkan empat ekor sapi, yang

Tabel 3. Perbandingan biaya pemakaian biogas dan bahan bakar lain di Kota Batu, Jawa Timur.

Jenis bahan bakar	Harga (Rp)	Nilai ekonomi		Biaya	Harga peralatan
		Periode	Harga (Rp)		
Minyak tanah	2.750 per liter	2 liter untuk sehari	5.500 per liter	1.980.000	50.000
Elpiji	70.000 per tabung	1 tabung 10 hari pemakaian	7.000 per tabung	2.520.000	350.000
Biogas	0	20 kg kotoran sapi	1.111 (asumsi peralatan)	400.000	2.000.000
Kayu bakar	5.000 per ikat	2 hari pemakaian	2.500 per ikat	900.000	0

Sumber: Susilaningsih *et al.* (2007).

akan menghasilkan kotoran 40 kg/hari dan biogas 1,44 m³/hari (Tabel 3). Rustijarno (2009) menyatakan tiap kg kotoran sapi menghasilkan biogas rata-rata 0,0315 m³. Jika produksi kotoran sapi per hari adalah 50 kg maka setiap ekor sapi perah dewasa dapat menghasilkan 0,0315 m³ x 50 kg atau 1,5 m³ biogas.

Setiap 1 m³ biogas sebanding dengan 0,46 kg elpiji. Dengan asumsi tersebut, tabung gas 3 kg dapat diisi 6,5 m³ biogas dari 4,3 ekor sapi, sedangkan tabung gas 12 kg dapat diisi 26 m³ biogas dari 17,4 ekor sapi (Wahyuni 2008). Jika peternak rata-rata memiliki sapi perah empat ekor (Susilaningsih *et al.* 2007) maka satu tabung gas 3 kg dapat dipenuhi dalam jangka waktu 1–2 hari, sedangkan satu tabung gas 12 kg dapat dipenuhi dalam jangka waktu 4–5 hari. Apabila dikelola dengan benar, dalam satu bulan peternak dapat menghasilkan 15–30 tabung gas 3 kg atau 6–8 tabung gas 12 kg. Dengan demikian, kotoran ternak perlu dimanfaatkan sebagai biogas untuk bahan bakar rumah tangga.

Analisis Usaha Biogas

Pengolahan limbah ternak dapat memberikan tambahan pendapatan selain dari ternak, yaitu biogas serta pupuk organik padat dan cair. Dengan demikian, pengolahan limbah ternak berpotensi membuka lapangan kerja di pedesaan (Bojesen *et al.* 2015). Hal ini karena pada umumnya peternakan sapi rakyat dikelola oleh keluarga dengan melibatkan suami, istri, dan anak. Farahdiba *et al.* (2014) melaporkan penggunaan biogas di Desa Argosari, Kecamatan Jabung, Kabupaten Malang sudah mencapai 35%, tetapi limbah biogas yang dimanfaatkan baru 44%. Dianawati *et al.* (2014) melaporkan pemanfaatan limbah kotoran sapi perah di Desa Pangalengan, Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung baru 57%, di mana yang dijadikan kompos 21% dan untuk biogas baru 14%.

Widodo *et al.* (2009) melaporkan pendapatan dari digester biogas sekitar Rp600.000/bulan. Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan investasi biogas layak dengan rasio B/C 1,35 dan modal investasi kembali pada tahun keempat dengan umur ekonomi digester 20 tahun.

Pendapatan ini belum termasuk hasil samping berupa pupuk cair dan padat. Berdasarkan kajian teknis dan ekonomis tersebut, teknologi biogas layak dikembangkan. Hal yang sama dilaporkan Rosyidi *et al.* (2014), bahwa biaya pembuatan digester ukuran 4–5 m³ di Yogyakarta pada tahun 2011 sebesar Rp2 juta dan investasi akan kembali pada tahun keenam.

Syamsudin *et al.* (2012) melaporkan bahwa pendapatan pelaksana program biogas asal ternak bersama masyarakat (BATAMAS) Kelompok Tani Kampulang, Kelurahan Songka, Kecamatan Wara Selatan Kota Palopo diperoleh dari 1) penggunaan biogas setiap bulan sebanyak 97 m³ atau setara dengan minyak tanah 1,85 liter/m³ atau Rp481.120/bulan, 2) hasil penjualan limbah padat biogas Rp504.000, dan 3) hasil penjualan limbah cair biogas Rp202.000/bulan. Dengan demikian, total pendapatan sebesar Rp1.187.120/bulan dengan pendapatan bersih Rp468.120/bulan (Tabel 4).

Perbandingan Subsidi Elpiji dengan Subsidi Pengadaan Digester Biogas

Potensi pengembangan biogas di sentra ternak terhambat dengan adanya subsidi gas elpiji oleh pemerintah. Menurut Hermawan (2014), kebutuhan gas pada tahun 2013 mencapai 5,6 juta ton yang terdiri atas elpiji 3 kg sebesar 4,4 juta ton dan elpiji 12 kg sebanyak 970.000 ton. Hal ini tidak terlepas dari kesuksesan program konversi minyak tanah ke elpiji karena elpiji memiliki keunggulan pemasarannya luas baik di perkotaan maupun di pedesaan, hasil pembakarannya lebih bersih, nilai kalorinya tinggi, stabil, praktis, dan ramah lingkungan (Farahdiba *et al.* 2014). Namun, ketergantungan pada elpiji sebagai sumber energi tidak terbaharui dapat membebani pemerintah dan tidak lestari karena ketersediaannya di alam terbatas. Persediaan gas alam Indonesia diprediksi akan habis dalam waktu 60 tahun (Farahdiba *et al.* 2014).

Harga keekonomian elpiji adalah Rp8.500/kg, tetapi harga jual ke masyarakat hanya Rp5.850/kg sehingga subsidi elpiji 3 kg sebesar Rp7.950/kg atau mencapai Rp 60 triliun. Sementara itu, selisih harga keekonomian elpiji 12

Tabel 4. Analisis usaha pengolahan limbah ternak pelaksana program BATAMAS.

Uraian	Jumlah fisik	Satuan	Harga satuan (Rp)	Total nilai (Rp)
Produksi per bulan				1.187.120
Biogas	97	m ²	4.960	481.120
Pupuk organik padat	1.008	kg	500	504.000
Pupuk organik cair	202	liter	1.000	202.000
Biaya tetap				451.000
Penyusutan				151.000
Digester biogas	60	bulan	4.500.000	66.000
Bak limbah padat	30	bulan	300.000	75.000
Bak limbah cair	1	bulan	300.000	10.000
Upah tenaga kerja				300.000
Biaya variabel ternak				268.000
Total biaya/bulan				719.000
Pendapatan bersih/bulan				468.120

Sumber: Syamsuddin *et al.* (2012).

kg ditanggung oleh Pertamina dengan kerugian pada tahun 2012 mencapai Rp7,73 triliun. Kerugian Pertamina akan meningkat seiring dengan tingginya harga keekonomian elpiji 12 kg, meningkatnya harga bahan baku elpiji, dan melemahnya nilai tukar rupiah terhadap dolar AS. Sementara itu, dari total proyeksi konsumsi elpiji tahun 2014 sebesar 6,11 juta metrik ton, hanya sekitar 2,5 juta metrik ton yang dapat disediakan oleh kapasitas produksi domestik, yang seluruhnya diserap Pertamina. Dengan demikian, pemenuhan kebutuhan elpiji harus melalui impor sekitar 59% (Hermawan 2014).

Dianawati *et al.* (2014) melaporkan bahwa penggunaan elpiji 3 kg oleh keluarga dengan 4–5 orang di Pangalengan berkisar antara 4–6 tabung/bulan. Apabila kebutuhan gas elpiji keluarga tersebut adalah 5 tabung ukuran 3 kg sebulan, maka subsidi elpiji kepada masyarakat sebesar Rp7.950 x 3 kg x 5 tabung atau Rp119.250/bulan (Tabel 5). Semakin banyak keluarga yang menggunakan tabung gas, semakin banyak subsidi yang dikeluarkan pemerintah.

Penggunaan biogas saat ini terkendala dengan biaya untuk pembangunan digester yang mahal (Haryati 2006; Rustijarno 2009; Chadwick *et al.* 2015). Kasworo *et al.* (2013) melaporkan bahwa peternak enggan menggunakan biogas karena peralatannya mahal. Apabila digester

biogas lebih murah, peternak tertarik untuk menggunakan teknologi tersebut secara sukarela tanpa perlu bantuan pemerintah. Sugiyono (2012) menyatakan bahwa kendala utama perluasan program Desa Mandiri Energi adalah 95% pendanaan bergantung pada pemerintah pusat dan kontribusi dari masyarakat atau swasta kurang dari 5%.

Salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pengadaan digester biogas di Indonesia adalah PT Biru (Dianawati *et al.* 2014; Rosyidi *et al.* 2014). Perusahaan tersebut membangun digester dengan biaya pembuatan bergantung pada kepemilikan sapi, berkisar antara Rp10.094.000 hingga Rp22.491.000 (Tabel 6). Dengan biaya investasi dan masa pakai digester 15 tahun atau 180 bulan maka biaya investasi biogas berkisar antara Rp56.078 hingga Rp 124.950/bulan, bergantung pada ukuran digester (tanpa memperhitungkan biaya penyusutan) (Tabel 6). Biaya tersebut lebih rendah dibandingkan pembelian gas tabung setiap bulan antara Rp71.550–Rp143.100 (Tabel 5). Dengan lebih rendahnya biaya pengeluaran per bulan investasi digester (Rp56.078–Rp 124.950) (Tabel 6) dibandingkan subsidi elpiji per keluarga per bulan (Rp71.550–Rp143.100) (Tabel 5), Pemerintah dapat memberikan subsidi digester biogas kepada masyarakat di sentra sapi perah untuk mengurangi ketergantungan pada gas elpiji. Perhitungan ini belum memasukkan pendapatan dari hasil penjualan pupuk organik sehingga akan menambah manfaat dan pendapatan bagi peternak.

Biaya investasi awal digester biogas cukup tinggi, namun apabila dihitung dengan pengeluaran bulanan pembelian gas elpiji, investasi digester biogas cukup menguntungkan. Keluarga peternak dengan penggunaan gas elpiji tiga tabung per bulan sebaiknya membangun digester ukuran 4 m³, meskipun memiliki sapi lebih dari dua ekor, sedangkan keluarga dengan penggunaan elpiji enam tabung per bulan dapat membangun digester ukuran

Tabel 5. Pengeluaran elpiji dalam rumah tangga.

Jumlah tabung	Subsidi pemerintah (Rp)	Pengeluaran elpiji rumah tangga (Rp)
3	71.550	66.000
4	95.400	88.000
5	119.250	110.000
6	143.100	132.000

Harga tabung gas 3 kg tahun 2015 sebesar Rp22.000.

Tabel 6. Biaya pembuatan digester biogas.

Ukuran digester (m ³)	Kepemilikan sapi minimal (ekor)	Total biaya investasi biogas (Rp)	Pengeluaran biogas per bulan (Rp)
4	2	10.094.000	56.078
6	3	12.645.000	70.417
8	6	16.842.000	93.567
10	8	18.157.000	100.872
12	10	22.491.000	124.950

Sumber: Dianawati *et al.* (2014).

maksimum 10 m³ dengan jumlah kepemilikan sapi minimal 8 ekor (Tabel 5 dan 6). Farahdiba *et al.* (2014) melaporkan bahwa satu digester dapat memenuhi kebutuhan energi bagi rumah tangga dengan empat orang (bapak, ibu, dan dua anak) dengan pemilikan minimal tiga ekor sapi untuk memasak, memanaskan air, dan penerangan (lampu petromaks). Dianawati *et al.* (2014) melaporkan bahwa setelah mendapat penyuluhan nilai kompetitif pembangunan digester, beberapa peternak di Desa Pangalengan, Kecamatan Pangalengan Kabupaten Bandung, Jawa Barat berkeinginan membeli digester secara swadaya sebanyak tiga digester dan dari bantuan Pemerintah 10 digester.

Pemerintah mengeluarkan dana subsidi untuk pembelian elpiji 3 kg sebesar Rp7.950/kg. Apabila dibandingkan antara mengeluarkan dana subsidi gas elpiji 3 kg dan bantuan digester kepada peternak, pemerintah dapat memberikan bantuan digester maksimum 6 m³ kepada pengguna gas elpiji tiga tabung per bulan, sedangkan bantuan digester maksimum 10 m³ diberikan kepada pengguna empat tabung per bulan, dan seterusnya. Pertimbangan ini diberikan karena daripada memberikan subsidi elpiji secara terus-menerus, pemerintah akan lebih baik memberikan bantuan digester kepada peternak di sentra peternakan sapi.

PENGEMBANGAN PROGRAM BIOGAS

Kendala Pengembangan Biogas

Pengembangan biogas di Indonesia sebagai sumber energi alternatif mulai digalakkan pada awal tahun 1970-an (Haryati 2006), namun jumlahnya hingga saat ini masih terbatas. Salah satu kendala adopsi biogas adalah masalah budaya. Khusus untuk biogas dari kotoran ternak, program demonstrasi dan penyuluhan harus dapat mengubah hambatan psikologis bahwa biogas merupakan gas yang kotor sehingga tidak layak digunakan dalam rumah tangga (Jewitt 2011). Biogas sering disalahkan sebagai penyebab banyaknya nyamuk di suatu komunitas di Nepal (Orskov *et al.* 2014). Adopsi biogas di Etiopia meningkat dengan semakin meningkatnya tingkat

pendapatan dan pendidikan adopter (Walekhwa *et al.* 2009). Daerah yang bahan bakarnya masih bergantung pada kayu bakar akan responsif terhadap teknologi biogas (Subedi *et al.* 2014).

Kegagalan penerapan biogas secara teknis biasanya disebabkan: 1) pemilihan jenis digester yang tidak sesuai dengan metode penanganan kotoran dan tata letak peternakan sehingga pemeliharaan dan perbaikannya menjadi mahal, 2) teknologi biogas yang optimum belum diperoleh, 3) operator tidak mempunyai kecakapan atau waktu agar sistem berjalan baik, serta 4) tidak ada penyuluhan, pelatihan, dan bimbingan teknis yang memadai (Haryati 2006; Melse dan Timmerman 2009; Rustijarno 2009; Hartati *et al.* 2012; Mwirigi *et al.* 2014; Herriyanti 2015).

Orskov *et al.* (2014) menyarankan agar desain digester dibuat sederhana dan terintegrasi sesuai dengan kultur setempat. Nilai tambah biogas akan meningkat bila dipadukan dengan produksi pupuk dan energi listrik. Qi *et al.* (2012) menyarankan agar teknologi optimasi biogas terus dilakukan agar diperoleh efisiensi yang tinggi. Sunaryo (2014) menyarankan penyuluhan terkait dengan biogas kepada warga dan khususnya peternak sapi berupa manajemen perawatan digester, teknik penggunaan dan pemanfaatan biogas untuk memasak, serta pembuatan dan pemasaran pupuk organik. Rosyidi *et al.* (2014) menyatakan pentingnya bimbingan teknis untuk transfer teknologi biogas, baik oleh pemerintah maupun swasta.

Dianawati *et al.* (2014) melaporkan pada awalnya, bantuan biogas dari pemerintah disambut baik oleh peternak di Pangalengan. Namun karena digester biogas terbuat dari plastik dan fiber yang mudah rusak dan kurangnya bimbingan pemeliharaan digester, peternak merasa kapok dan menolak bantuan digester dari pemerintah. Bantuan digester dari pemerintah kemudian diperbaiki berupa digester kubah dari baja disertai bimbingan pemeliharaan dari swasta. Program tersebut berjalan dengan baik dan minat peternak terhadap biogas meningkat. Pada tahun 2009, penerima bantuan biogas sebanyak tujuh orang pada satu kelompok ternak dan berikutnya berkembang ke kelompok ternak lain dan desa lain. Saat ini, peternak sudah merasakan manfaatnya dan menunggu untuk mendapat bantuan program tersebut.

Peluang Pengembangan Biogas

Biogas perlu terus dikembangkan baik secara perorangan maupun kelompok. Pengembangan biogas secara berkelompok dapat dilakukan karena biaya investasi digester tergolong mahal sehingga dengan berkelompok, biaya tersebut dapat ditanggung bersama (Orskov *et al.* 2014). Pengembangan biogas secara berkelompok di Yogyakarta dilaksanakan dengan membangun digester dan bahannya disediakan secara bergotong royong (Rosyidi *et al.* 2014).

Farahdiba *et al.* (2014) melaporkan pada tahun 2009 telah dikembangkan biogas skala rumah tangga di Kabupaten Malang melalui sistem mandiri, arisan, dan yarnen (bayar panen). Sistem yang dibayar mandiri oleh pengguna biogas secara tunai sebesar Rp4 juta. Sistem arisan dengan pembayaran Rp75.000/bulan pengundiannya dilakukan setiap bulan sehingga pengerjaan digester bergantian berdasarkan yang mendapat arisan. Sistem yarnen diterapkan pada petani atau yang memiliki sapi 1–3 ekor. Sistem pembayaran yang paling banyak dilakukan oleh peternak adalah yarnen dengan subsidi oleh LSM, PU Cipta Karya maupun dari Pemerintah Kabupaten sebesar 94%, sedangkan persentase untuk arisan dan mandiri berturut-turut 5% dan 1%.

Putro (2007) menyatakan kendala yang dihadapi dalam pengadaan digester secara berkelompok adalah: 1) biogas belum dapat didistribusikan ke tempat yang lebih jauh karena kapasitas terbatas dan belum ada teknologi untuk mendistribusikan biogas secara aman dan murah, 2) kapasitas terbatas, dan 3) keamanan kurang karena bak digester dan penampung gas berupa kantong plastik yang berisiko terkena benda tajam dan percikan api. Hambatan lain pada pengembangan biogas berkelompok adalah perlunya menyediakan dana untuk pemasangan instalasi ke masing-masing rumah (Rustijarno 2009), sulitnya membagi energi listrik secara proposional antaranggota (Hanif 2010), dan sulitnya pembagian kerja perawatan biogas dan pengolahan limbah (Chadwick *et al.* 2015).

Pengadaan biogas secara individu dapat dilakukan secara tunai maupun kredit. Sugiyono (2012) menyatakan

terdapat dua kemungkinan pendanaan, yaitu pemberian jaminan kredit dan fasilitas pinjaman lunak. Kredit digester biogas dapat berasal dari pemda (misalnya berupa subsidi 50%) maupun swasta berupa kredit bunga rendah. Kredit digester biogas dapat disediakan melalui kerja sama antara peternak, koperasi susu, Bank Perkreditan Rakyat (BPR), dan perusahaan pembangun digester biogas.

Rosyidi *et al.* (2014) melaporkan kerja sama antara PT Biru yang menangani pengadaan digester biogas di Yogyakarta dengan Pemerintah melalui pinjaman lunak Rp2 juta untuk setiap digester ukuran 4 m³. Dianawati *et al.* (2014) juga melaporkan kerja sama PT Biru dengan Koperasi Peternak Garut Selatan (KPGS) dengan bunga kredit 8–10% selama 5 tahun, bergantung pada ukuran digester. Ilustrasi kredit untuk biogas dengan ukuran digester 6 m³ selama 3 tahun disajikan pada Tabel 7. Cicilan kredit dapat dipotong dari hasil penjualan susu per hari selama tahun kredit yang diusulkan.

KESIMPULAN

Biogas bermanfaat sebagai sumber energi alternatif, pupuk organik padat maupun cair, pakan ternak, dan untuk memperbaiki sanitasi lingkungan. Oleh karena itu, biogas perlu dimasyarakatkan terutama di daerah sentra peternakan dengan memanfaatkan secara langsung limbah ternak sebagai bahan biogas.

Biogas dapat menjadi alternatif energi yang murah dibandingkan sumber energi lain yang semakin terbatas, sehingga peternak disarankan membangun digester biogas secara swadaya daripada membeli elpiji setiap bulan. Pemerintah dapat memberikan subsidi digester biogas kepada peternak sapi perah untuk mengurangi ketergantungan pada elpiji. Perbaikan teknologi biogas, integrasi sistem biogas dengan produksi pupuk organik, serta sosialisasi dan bimbingan teknis dapat memperluas pengembangan biogas di masyarakat. Pinjaman kredit lunak secara individu dengan pemerintah maupun swasta dapat mendorong pengembangan biogas.

Tabel 7. Simulasi kredit untuk biogas ukuran 6 m³ selama 3 tahun.

Harga susu/ liter (Rp)	Harga biogas 6 m ³ (Rp)	Cicilan kredit per bulan (Rp)	Total kredit (Rp)	Keterangan
3.500	12.645.000	357.000	12.852.000	Potongan susu ± 3,4 liter per hari selama 3 tahun, belum termasuk bunga kredit
4.000	12.645.000	360.000	12.960.000	Potongan susu ± 3 liter per hari selama 3 tahun, belum termasuk bunga kredit
4.500	12.645.000	351.000	12.636.000	Potongan susu ± 2,6 liter per hari selama 3 tahun, belum termasuk bunga kredit

Sumber Dianawati *et al.* (2014).

DAFTAR PUSTAKA

- Abderezzak, B., B. Khelidy, A. Kellaci, and M.T. Abbes. 2012. The smart use of biogas: Decision support tool. AASRI Proc 2: 156–162.
- Abu-Dahrieh, J., A. Orozco, E. Groom, and D. Rooney. 2011. Batch and continuous biogas production from grass silage liquor. *Bioresour. Technol.* 102: 10922–10928.
- Bojesen, M., L. Boerboom, and H. Skov-Petersen. 2015. Towards a sustainable capacity expansion of the Danish biogas sector. *Land Use Policy* 42: 264–277.
- Bond, T. and M.R. Templeton. 2011. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy Sustain. Dev.* 15: 347–354.
- Borges de Oliveira, S.V., A.B. Leoneti, M Caldo GM, and M.M. Borges de Oliveira. 2011. Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property. *Biomass & Bioenergy* 35: 2608–2618.
- Budiyanto, K. 2011. Tipologi pendayagunaan kotoran sapi dalam upaya mendukung pertanian organik di Desa Sumbersari, Kecamatan Poncokusumo, Kabupaten Malang. *J. GAMMA* 7(1): 42–49.
- Chadwick, D., J. Wei, T. Yan'an, Y. Guanghui, S Qirong, and C. Qing. 2015. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.025>. [20 April 2015].
- Dianawati, M. 2014. Penggunaan limbah organik biogas sebagai media tanam pada produksi benih kentang (*Solanum tuberosum* L.) G1. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan dan Pemanfaatan IPTEK untuk Kedaulatan Pangan. Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Dianawati M. S.L. Mulyanti, S. Tedy, A. Yulyatin, Nurmayetti, D. Histifarina. dan Riswita. 2014. Laporan akhir m-P3MI pada agroekosistem lahan kering dataran tinggi Kabupaten Bandung. BPTP Jawa Barat, Bandung.
- Ditjen PKH (Direktorat Jenderal Peternakan dan Kesehatan Hewan). 2015. Populasi sapi perah menurut provinsi. http://www.pertanian.go.id/ap_pages/mod/datanak [15 Juli 2015].
- Elizabeth, R. dan S. Rosdiana. 2011. Efektivitas pemanfaatan biogas sebagai sumber bahan bakar dalam mengatasi biaya ekonomi rumah tangga di pedesaan. Prosiding Seminar Nasional Era Baru Pembangunan Pertanian: Strategi Mengatasi Masalah Pangan, Bioenergi dan Perubahan Iklim. hlm. 220–234. <http://pse.litbang.pertanian.go.id> [20 April 2015].
- Farahdiba, A.A., A. Ramdhaniati, dan E.S. Soedjono. 2014. Teknologi dan manajemen program biogas sebagai salah satu energi alternatif yang berkelanjutan di Kabupaten Malang. *J. Inovasi dan Kewirausahaan* 3(2): 145–159.
- Flotats, X., A. Bonmati, B. Fernandez, and A. Magri. 2009. Manure treatment technologies: onfarm versus centralized strategies, NE Spain as case study. *Bioresour. Technol.* 100: 5519–5526.
- Frac, M., K. Oszust, and J. Lipiec. 2012. Community level physiological profiles (CLPP), characterization and microbial activity of soil amended with dairy sewage sludge. *Sensors* 12: 3253–3268.
- Hanif, A. 2010. Studi pemanfaatan biogas sebagai pembangkit listrik 10 KW kelompok tani Mekarsari Desa Dander Bojonegoro menuju desa mandiri energi. Skripsi. ITS, Surabaya.
- Hartati, R.S., IW. Sukerayasa, IN.S. Winaya, dan K.A. Yasa. 2012. Pemanfaatan limbah kotoran hewan ternak sebagai biogas untuk keperluan rumah tangga di Kecamatan Sidemen Kabupaten Karangasem Bali. *Udayana Mengabdikan* 11(1): 18–20.
- Haryati, T. 2006. Biogas: Limbah peternakan yang menjadi sumber energi alternatif. *Wartazoa* 16(3): 160–169.
- Hermawan, I. 2014. Dasar penetapan harga elpiji 12 kg dan dampaknya terhadap perekonomian Indonesia. *Info Singkat Ekonomi dan Kebijakan Publik* 6(1): 13–16.
- Herryanti, A.P. 2015. Pengelolaan limbah ternak sapi menjadi biogas. *Majalah Ilmiah Pawiyatan* 22(1): 39–48.
- Insam, H., M. Gomez-Brandon, and J. Ascher. 2015. Manure-based biogas fermentation residues: Friend or foe of soil fertility? *Soil Biol. Biochem.* 84: 1–14.
- Jewitt, S. 2011. Poo Gurus? Researching the threats and opportunities presented by human waste. *Appl. Geogr.* 31(2): 761–769.
- Kasworo, A., M. Izzati, dan Kismartini. 2013. Daur ulang kotoran ternak sebagai upaya mendukung peternakan sapi potong yang berkelanjutan di Desa Jagonayan Kecamatan Ngablak Kabupaten Magelang. Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. hlm. 306–311.
- Khalid, A., M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood, and L. Dawson. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Manag.* 31(8): 1737–1744.
- Melse, R. and M. Timmerman. 2009. Sustainable intensive livestock production demands manure and exhaust air treatment technologies. *Bioresour. Technol.* 100: 5506–5511.
- Minde, G.P., S.S. Magdum, and V. Kalyanraman. 2013. Biogas as a sustainable alternative for current energy need of India. *J. Sust. Energy Environ.* 4: 121–132.
- Mwirigi, J., B.B. Balana, J. Mugisha, P. Walekhwa, R. Melamu, S. Nakami, and P. Makenzi. 2014. Socio-economic hurdles to widespread adoption of small-scale biogas digesters in Sub-Saharan Africa: A review. *Biomass & Bioenergy* 70: 17–25.
- Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agron. Sust. Dev.* 34: 473–492.
- Orskov, E.R., K.Y. Anchang, M. Subedi, and J. Smith. 2014. Overview of holistic application of biogas for small scale farmers in Sub-Saharan Africa. *Biomass & Bioenergy* 70: 4–16.
- Pereira-Querol M.A., L. Seppanen, and J. Virkkun. 2014. Exploring the developmental possibilities of environmental activities: On-farm biogas production. *Environ. Sci. Policy* 37: 134–141.
- Putro, S. 2007. Penerapan instalasi sederhana pengolahan kotoran sapi menjadi energi biogas di Desa Sugihan Kecamatan Bendosari Kabupaten Sukoharjo. *Warta* 10(2): 178–188.
- Qi, J., B. Chen, W. Chen, and X. Chu. 2012. Inventory analysis for a household biogas system. *Proc. Environ. Sci.* 13: 1902–1906.
- Rajendran, K., S. Aslanzadeh, and M.J. Taherzadeh. 2012. Household biogas digesters-A review. *Energies* 5: 2911–2942.
- Rosyidi, S.A.P., T. Bole-Rentel, S.B. Lesmana, and J. Ikhsan. 2014. Lessons learnt from the energy needs assessment carried out for the biogas program for rural development in Yogyakarta, Indonesia. *Proc. Environ. Sci.* 20: 20–29.
- Rustijarno, S. 2009. Pemanfaatan biogas sebagai sumber energi alternatif terbarukan di lokasi Prima Tani Kabupaten Kulon Progo. Seminar Nasional Teknologi Peternakan dan Veteriner. Pusat Penelitian dan Pengembangan Peternakan, Bogor. hlm. 831–835.
- Schievano, A., G D'Imporzano, S. Salati, and F. Adani. 2011. On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): an on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance. *Bioresour. Technol.* 102(18): 7737–7744.
- Subedi, M., R.B. Matthews, M. Pogson, A. Abegaz, B.B. Balana, J Oyesiku-Lakemore, and J. Smith. 2014. Can biogas digesters help to reduce deforestation in Africa? *Biomass & Bioenergy* 70: 87–98.
- Sudiarto, B. 2008. Pengelolaan limbah peternakan terpadu dan agribisnis yang berwawasan lingkungan. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Peternakan dan Veteriner. Universitas Padjajaran, Bandung.

- Sugiyono, A. 2012. Pemberdayaan ekonomi masyarakat melalui pengembangan desa mandiri energi di Kabupaten Lampung Selatan. *J. Quality* 2(8): 50–58.
- Sunaryo. 2014. Rancang bangun reaktor biogas untuk pemanfaatan limbah kotoran ternak sapi di Desa Limbangan Kabupaten Banjarnegara. *J PPKM UNSIQ I*: 21–30.
- Susilaningsih, I., P. Erik, dan V. Oktaviyanto. 2007. Pemanfaatan limbah kotoran sapi sebagai pengganti bahan bakar rumah tangga yang lebih memberikan keuntungan ekonomis. Universitas Muhammadiyah Malang.
- Syamsuddin, A.R. Mappangaja, dan A. Natsir. 2012. Analisis manfaat program biogas asal ternak bersama masyarakat (BATAMAS) Kota Palopo (Studi Kasus Kelompok Tani Kampulung Kecamatan Wara Selatan Kota Palopo): 18 hlm.
- Tumwesige, V., D. Fulford, and G.C. Davidson. 2014. Biogas appliances in Sub-Saharan Africa. *Biomass & Bioenergy* 70: 40–50.
- Wahyuni, S. 2008. Analisa kelayakan pengembangan biogas sebagai energi alternatif berbasis individu dan kelompok. Tesis Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Walekhwa, P.N., J. Mugisha, and L. Drake. 2009. Biogas energy from family-sized digesters in Uganda: critical factors and policy implications. *Energy Policy* 37(7): 2754–2762.
- Widodo, T.W., A. Nurhasanah, A. Asari, dan R. Elita. 2009. Pemanfaatan limbah industri pertanian untuk energi biogas. Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian, Serpong, Tangerang. 12 hlm.