

KAJIAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN SAMPAH BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN RUMAH TANGGA (SB3-RT) DI KOTA PADANG

Yenni Ruslinda, Slamet Raharjo, Dina Fathia Putri

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas
Kampus Universitas Andalas, Limau Manis, Padang, 25163
yenni@eng.unand.ac.id

Abstrak

Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun yang dihasilkan dari aktivitas rumah tangga, dikenal dengan istilah SB3-RT, dalam pengelolaannya sering dicampur dengan sampah kota lainnya (non-B3). Hal ini akan berdampak terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan, jika dilakukan pembuangan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis kondisi eksisting pengolahan SB3-RT dan melakukan kajian teknologi yang tepat untuk pengolahan SB3-RT di Kota Padang. Analisis kondisi eksisting dilakukan dengan wawancara dan penyebaran kuisioner kepada masyarakat penghasil SB3RT. Kajian teknis pengolahan SB3-RT dilakukan terhadap pengolahan termal (insinerasi), solidifikasi/stabilisasi dan penimbunan di landfill, yang dilakukan dengan metode skoring. Parameter yang ditinjau meliputi kebutuhan lahan penimbunan, potensi pencemaran, kemampuan destruksi, kemampuan reduksi volume, energy recovery, pemanfaatan hasil pengolahan, jenis limbah yang diolah, persyaratan pengolahan dan karakteristik limbah. Pada kondisi eksisting didapatkan hanya 9% responden yang melakukan pemilahan dan pengolahan SB3-RT yaitu pada sarana kesehatan dan industri. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT masih 16 % dan belum pernah mendapatkan sosialisasi SB3-RT. Berdasarkan hasil skoring, teknologi pengolahan yang direkomendasikan adalah insinerasi untuk semua jenis SB3-RT kecuali jenis kaleng bertekanan, bohlam, dan baterai yang pengelolaannya akan dilakukan oleh pihak ketiga.

Kata kunci: insinerasi, landfill, pengolahan, SB3-RT, solidifikasi/stabilisasi

Abstract

Hazardous solid wastes produced from household activities, known as HHSW, in its management is often mixed with other municipal solid waste (non-HHSW). This will have an impact on public health and environment, if disposal is done in the Final Waste Processing Site. The purpose of this research is to analyze the existing condition of HHSW processing and to conduct appropriate technology studies for HHSW processing in Padang City. Analysis of the existing conditions was carried out by interviewing and distributing questionnaires to the HHSW-producing community. Technical studies of HHSW processing are carried out on thermal processing (incineration), solidification/stabilization and landfill disposal, which is done by scoring method. Parameters reviewed included landfill needs, pollution potential, destruction capability, volume reduction capability, energy recovery, utilization of processing products, type of waste treated, processing requirements and waste characteristics. In the existing condition, only 9% of respondents who did the sorting and processing of HHSW, which were found in health facilities and industries. This is influenced by the low level of public knowledge about HHSW (still 16%) and has never received any HHSW socialization. Based on the scoring results, the recommended processing technology is incineration for all types of HHSW, except for pressurized cans, bulbs, and batteries which its management will be carried out by third parties.

Keywords : HHSW, incineration, landfilling, processing, solidification/stabilization

PENDAHULUAN

Menurut SNI 3242-2008 tentang Pengelolaan Sampah di Permukiman, sampah domestik Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) atau dikenal dengan Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun Rumah Tangga (SB3-RT) adalah sampah yang berasal dari aktivitas rumah tangga yang mengandung bahan dan/atau bekas kemasan suatu jenis bahan berbahaya dan/atau beracun yang karena sifat atau konsentrasinya dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung dapat merusak dan/atau mencemarkan lingkungan hidup dan/atau membahayakan kesehatan manusia. Dari pengertian tersebut, SB3RT termasuk ke dalam golongan limbah B3. Pada dasarnya limbah B3 tidak akan menimbulkan bahaya jika pemakaian, penyimpanan dan pengelolaannya sesuai dengan ketentuan yang berlaku (Damanhuri dan Tripadmi, 2016).

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Padang, jumlah penduduk Kota Padang pada tahun 2016 adalah 914.968 jiwa. Pengelolaan sampah kota ditangani oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Padang. Penanganan sampah masih terbatas pada sampah kota dan belum terdapat pengelolaan SB3-RT, sehingga SB3-RT masih bercampur dengan sampah non-B3. Hal ini berdampak terhadap kondisi lingkungan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah. Hasil penelitian kandungan logam berat di TPA sampah Air Dingin Kota Padang menunjukkan konsentrasi Hg, Pb dan Cd telah melebihi batas maksimum yang ditetapkan secara nasional, dengan nilai sebesar 0,023-2 mg/l (Raharjo, dkk, 2017).

Disamping itu, dari hasil penelitian yang telah dilakukan terhadap timbulan dan komposisi SB3-RT dari sumber domestik, didapatkan persentase SB3RT dalam sampah domestik sebesar 1,88% dengan jumlah timbulan 3,28 ton/hari. SB3RT yang dihasilkan umumnya berasal dari bekas kemasan perawatan tubuh 51% dan produk pembersih 39% seperti kemasan sampo, kosmetik, detergen, pemutih dan pewangi pakaian serta pembersih toilet dan kaca. Karakteristik jenis SB3RT ini bersifat racun, karsinogenik, korosif dan mudah terbakar (Ruslinda, dkk 2013). SB3-RT tidak hanya dihasilkan dari rumah tangga, namun juga dari sumber lain seperti dari sarana komersial seperti salon,

bengkel, hotel dan pertokoan. Persentase SB3-RT dalam total sampah komersil di Kota Padang sebesar 2,58% dengan timbulan rata-rata dalam satuan berat 0,0022 kg/m²/h atau dalam satuan volume 0,0727 l/m²/h. Komposisi SB3-RT juga dominan dari penggunaannya sebagai produk pembersih, perawatan tubuh dan produk otomotif seperti kaleng oli dan aki mobil dengan karakteristik cenderung korosif dan toksik (Ruslinda, dkk 2017). Hasil penelitian Ruslinda, dkk tahun 2017 juga menunjukkan SB3-RT berasal dari sarana institusi, industri dan pelayanan kota. Selain penggunaannya sebagai produk pembersih, perawatan tubuh dan produk otomotif, juga ditemukan SB3-RT dalam bentuk kemasan insektisida dan pestisida, kaleng cat dan thinner serta produk lainnya seperti baterai dan bohlam yang mengandung unsur logam berat.

Untuk itu perlu dilakukan penanganan khusus terhadap SB3-RT. Salah satu solusi untuk penanganan SB3-RT adalah dengan mengolahnya. Menurut PP RI No. 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, pengolahan limbah B3 dapat dilakukan dengan cara termal, stabilisasi dan solidifikasi, dan/atau cara lain sesuai dengan perkembangan teknologi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi eksisting pengolahan SB3-RT dan melakukan kajian teknologi yang tepat untuk pengolahan SB3-RT di Kota Padang. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan oleh pemerintah kota dalam perencanaan pengelolaan sampah B3 yang hingga saat ini belum ditangani.

METODE

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data primer dan data sekunder, yang dilanjutkan dengan pengolahan dan analisis data. Pengumpulan data primer diperoleh melalui wawancara dan kuisioner. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data eksisting pengolahan SB3-RT di Kota Padang. Wawancara dilakukan terhadap Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Padang dan UPTD Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah Air Dingin yang merupakan instansi atau kelembagaan yang mengelola persampahan di Kota Padang. Selain itu juga dilakukan wawancara terhadap

salah satu industri dan sarana kesehatan yang mewakili instansi yang sudah melakukan pengolahan terhadap limbah B3 yang mereka hasilkan.

Untuk mendapatkan data tentang eksisting pengelolaan SB3-RT dari masing-masing sumber dilakukan penyebaran kuisioner. Kuisioner diberikan pada sumber penghasil SB3-RT meliputi sumber domestik, komersil, industri, institusi dan pelayanan kota. Hal ini dikarenakan dari penelitian Ruslinda, dkk tahun 2017, SB3-RT ditemukan dari berbagai sumber. Perhitungan jumlah kuisioner didasarkan pada SNI 19-3964-1994 tentang Metode Pengambilan dan Pengukuran Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan. Dari perhitungan diperoleh jumlah kuisioner sebanyak 74 buah yang terdiri dari sumber domestik 30 buah, sumber komersil 14 buah, sumber institusi 15 buah, sumber industri 5 buah dan sumber pelayanan kota 10 buah. Dengan 74 kuisioner tersebut diperoleh nilai keandalan survei 93,75%, yang masih masuk dalam range tingkat keandalan data yang dapat dipercaya yaitu berkisar antara 90%-100%. Informasi yang diambil melalui kuisioner berupa pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT, sosialisasi, pemilahan serta pengolahan SB3-RT yang telah dilakukan oleh masyarakat. Lokasi penyebaran kuisioner didasarkan pada daerah pelayanan sistem pengelolaan sampah Kota Padang.

Pengumpulan data sekunder merupakan hasil pendataan yang telah dilakukan oleh instansi di Kota Padang serta penelitian terdahulu tentang timbulan, komposisi dan karakteristik SB3-RT Kota Padang. Data sekunder yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah jumlah sarana domestik, komersil, institusi, industri dan pelayanan kota di Kota Padang yang digunakan sebagai acuan dalam penentuan jumlah kuisioner. Data ini diperoleh dari Badan Pusat Statistik Kota Padang. Data sekunder berupa hasil penelitian terkait timbulan dan komposisi SB3-RT Kota Padang dari sumber domestik diperoleh dari penelitian Ruslinda dan Yustisia tahun 2013 dan sumber lainnya dari hasil penelitian Ruslinda dkk tahun 2017 serta hasil penelitian terkait uji fisik dan kimia SB3-RT Kota Padang yang juga diperoleh dari hasil penelitian Ruslinda

dkk tahun 2017. Data sekunder ini diperlukan sebagai dasar dalam melakukan kajian pengolahan SB3-RT Kota Padang.

Pengolahan dan analisis data meliputi identifikasi eksisting pengolahan SB3-RT Kota Padang dan kajian teknis pengolahan SB3-RT yang tepat bagi Kota Padang. Identifikasi eksisting pengolahan SB3-RT Kota Padang dilakukan dengan pengolahan data kuisioner dan wawancara. Informasi kondisi eksisting yang ingin diketahui berupa pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT, sosialisasi tentang SB3-RT serta pemilahan dan pengolahan yang telah dilakukan terhadap SB3-RT pada masing-masing sumber.

Kajian kelayakan teknis pengolahan SB3-RT pada penelitian ini dilakukan dengan menganalisis sembilan parameter yaitu: kebutuhan lahan penimbunan, potensi pencemaran, kemampuan destruksi, kemampuan reduksi volume, *energy recovery*, pemanfaatan hasil pengolahan, jenis limbah yang diolah, persyaratan pengolahan, dan karakteristik limbah. Pemilihan teknologi pengolahan SB3-RT Kota Padang dilakukan dengan cara skoring terhadap 9 parameter kelayakan teknis pada masing-masing alternatif pengolahan SB3-RT. Kriteria skoring dapat dilihat pada Tabel 1. Skoring untuk parameter kebutuhan lahan penimbunan dan potensi pencemaran, skor tertinggi diberikan jika teknologi pengolahan masuk kriteria 'kecil' dan skor terendah untuk kriteria 'besar'. Sebaliknya untuk parameter kemampuan destruksi dan kemampuan reduksi volume, skor tertinggi diberikan jika teknologi pengolahan masuk kriteria 'besar' dan skor terendah untuk kriteria 'kecil'. Untuk parameter *energi recovery* dan pemanfaatan hasil pengolahan, skor tertinggi diberikan jika teknologi pengolahan masuk kriteria 'ada' dan skor terendah untuk kriteria 'tidak ada'. Untuk parameter jenis limbah yang diolah, persyaratan pengolahan dan karakteristik limbah, skor tertinggi diberikan jika teknologi pengolahan masuk kriteria 'sesuai dengan kondisi SB3-RT' dan skor terendah untuk yang 'tidak sesuai dengan kondisi SB3-RT Kota Padang'. Teknologi pengolahan yang direkomendasikan adalah teknologi pengolahan SB3-RT dengan skor terbesar.

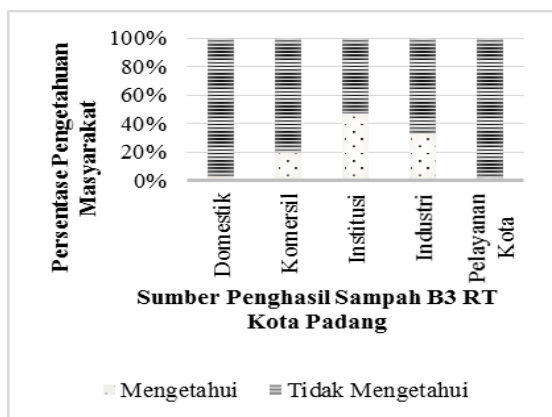
Tabel 1. Kriteria Skoring

Parameter	Kriteria	Skor
1 Kebutuhan lahan penimbunan	Kecil	3
2 Potensi pencemaran	Sedang	2
	Besar	1
3 Kemampuan destruksi	Besar	3
4 Kemampuan reduksi volume	Sedang	2
	Kecil	1
5 Energy recovery	Ada	2
6 Pemanfaatan hasil pengolahan	Tidak Ada	1
7 Jenis limbah yang diolah	Sesuai dengan kondisi SB3-RT	2
8 Persyaratan pengolahan		
9 Karakteristik limbah	Tidak sesuai dengan kondisi SB3-RT	1

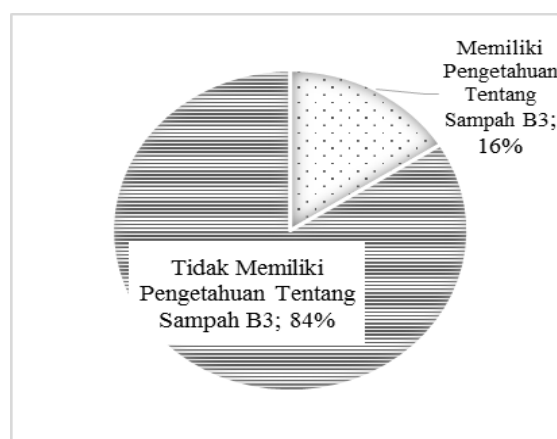
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Eksisting Pengolahan SB3-RT Kota Padang

Data kondisi eksisting pengolahan SB3-RT meliputi pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT, sosialisasi SB3-RT, perlakuan pemilahan dan pengolahan SB3-RT yang sudah dilakukan di masing-masing sumber. Berdasarkan Gambar 1 diketahui bahwa persentase pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT terbesar secara berturut-turut adalah dari sumber institusi 47%, industri 33%, komersil 19%, domestik 3%, sedangkan untuk sumber pelayanan kota sama sekali belum memiliki pengetahuan tentang SB3-RT. Pengetahuan ini diperoleh karena latar belakang pendidikan atau pekerjaan responden. Dari data tersebut didapatkan persentase rata-rata pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT di Kota Padang hanya 16%, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1 Pengetahuan Masyarakat tentang SB3-RT dari Masing-masing Sumber

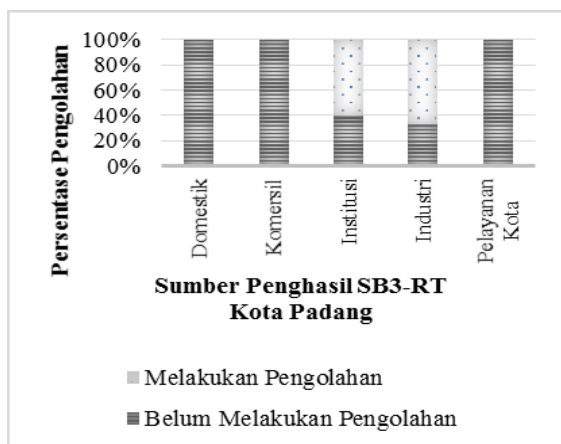


Gambar 2 Rata-rata Pengetahuan Masyarakat tentang SB3-RT di kota Padang

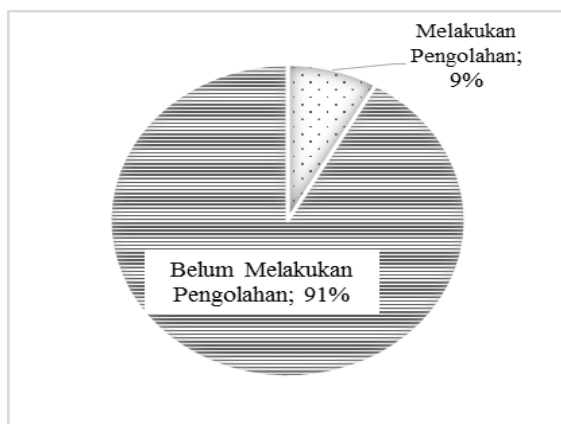
Persentase pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT yang masih rendah dikarenakan belum pernah dilakukan sosialisasi tentang SB3-RT. Dari hasil pengolahan kuisisioner didapatkan tidak satupun responden yang ada di masing-masing sumber mendapatkan sosialisasi tentang SB3-RT. Hal ini dikarenakan belum ada pengelolaan SB3-RT di Kota Padang. Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak DLH diketahui pengelolaan sampah di Kota Padang masih fokus pada pengembangan pengelolaan sampah kota dengan konsep 3R.

Belum adanya sosialisasi tentang SB3-RT ini menyebabkan masyarakat tidak melakukan pemilahan dan pengolahan terhadap SB3-RT. Berdasarkan Gambar 3, pemilahan dan pengolahan SB3-RT pada kondisi eksisting baru dilakukan oleh sarana kesehatan dan industri besar, namun masih terbatas pada beberapa jenis SB3-RT seperti lampu, *toner*, *cartridge* dan aki bekas.

Pengolahan terhadap SB3-RT ini dilakukan oleh pihak ketiga. Hasil pengolahan data menunjukkan hanya 9 % responden yang melakukan pemilahan dan pengolahan terhadap SB3-RT di Kota Padang, seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 3 Persentase Masyarakat yang Melakukan Pemilahan dan Pengolahan SB3-RT di masing-masing Sumber



Gambar 4 Rata-rata Persentase Masyarakat yang Melakukan Pemilahan dan Pengolahan SB3-RT di Kota Padang

Kajian Pengolahan SB3-RT Kota Padang

Kajian kelayakan teknis teknologi pengolahan SB3-RT Kota Padang dilakukan berdasarkan hasil penelitian tentang SB3-RT Kota Padang serta kajian literatur. PP 101 Tahun 2014 digunakan sebagai acuan dalam mengkaji alternatif pengolahan SB3-RT dikarenakan belum adanya peraturan khusus SB3-RT di Indonesia. Berdasarkan PP 101 Tahun 2014, terdapat tiga alternatif pengolahan untuk limbah B3 yaitu termal, solidifikasi/stabilisasi dan cara lain sesuai

perkembangan teknologi. Dalam penelitian ini, kajian teknologi pengolahan SB3-RT dilakukan terhadap pengolahan termal (insinerasi), solidifikasi/stabilisasi dan *landfill*.

Insinerasi merupakan pengolahan termal yang dilakukan pada temperatur yang tinggi. Selama proses insinerasi, sampah yang akan diolah dikonversi menjadi gas, partikel dan panas. Sebelum dilepaskan ke atmosfer, gas-gas ini diolah terlebih dahulu dengan tujuan menghilangkan polutannya. Massa sampah berkurang hingga 95-96 % melalui proses insinerasi. Pengurangan massa ini bergantung pada komposisi materi dan tingkat *recovery*. Insinerasi tidak menggantikan kebutuhan akan *landfilling* namun hanya bertujuan untuk mengurangi jumlah yang akan diurug (Soniya, 2014). Proses insinerasi bertujuan untuk menghancurkan senyawa B3 menjadi senyawa yang tidak mengandung B3 (KEP-03/BAPEDAL/09/1995).

Proses solidifikasi/stabilisasi adalah suatu tahapan proses pengolahan limbah B3 untuk mengurangi potensi racun dan kandungan limbah B3 melalui upaya memperkecil/membatasi daya larut, pergerakan/penyebaran dan daya racunnya (imobilisasi unsur yang bersifat racun) sebelum limbah B3 tersebut dibuang ke tempat penimbunan akhir (*landfill*) (KEP-03/BAPEDAL/09/1995). Tujuan utama dari proses solidifikasi/stabilisasi adalah menciptakan suatu padatan yang mudah ditangani dan tidak meluluhkan kontaminan ke dalam lingkungan. Umumnya proses solidifikasi/stabilisasi digunakan untuk menangani limbah-limbah dari logam (Utomo dan Laksono, 2007).

Berdasarkan PP No. 101 Tahun 2014 yang dimaksud dengan penimbunan limbah B3 (*landfill*) adalah kegiatan menempatkan limbah B3 pada fasilitas penimbunan dengan maksud tidak membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan hidup. Kajian *landfill* dilakukan karena teknologi pemrosesan akhir sampah di Indonesia masih menerapkan penimbunan. Kajian kelayakan teknis teknologi pengolahan SB3-RT Kota Padang dilakukan dengan memperhatikan sembilan parameter. Hasil kajian teknis tersebut diuraikan sebagai berikut:

1. Kebutuhan lahan penimbunan

Di negara berkembang, *landfill* secara luas digunakan sebagai opsi dalam penanganan sampah termasuk SB3-RT. Penimbunan merupakan tahapan akhir dalam pengelolaan sampah namun dipertimbangkan sebagai opsi pengolahan untuk sampah yang tidak dapat di *recycle* ataupun *recovery* (Patwary et al, 2011). Terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam melakukan penimbunan sampah yang salah satunya adalah lahan atau area penimbunan. Dari perbandingan ketiga opsi teknologi pengolahan diketahui pengolahan sampah dengan *landfill* membutuhkan lahan penimbunan lebih besar dikarenakan tidak adanya usaha reduksi ukuran sampah sehingga SB3-RT yang terdiri dari berbagai macam ukuran dan material harus ditimbun bersamaan.

Menurut PP 101 Tahun 2014, penimbunan juga perlu dilakukan terhadap hasil olahan solidifikasi/stabilisasi dan insinerasi namun kebutuhan lahan penimbunannya tidak sebesar *landfill* yang tanpa proses pengolahan. Hasil olahan solidifikasi/stabilisasi umumnya berupa blok monolitik sehingga diperlukan juga lahan untuk penimbunannya namun tidak seluas untuk *landfill* sampah tanpa pengolahan. Sampah yang melalui proses pengolahan insinerasi akan mengalami reduksi volume hingga >90 % (Manyele, 2008) dan hanya menyisakan residu berupa abu yang tentunya mengurangi kebutuhan lahan penimbunan serta dapat dimanfaatkan. Hal lain yang harus diperhatikan dalam penimbunan SB3-RT adalah kemungkinan pencemaran yang diakibatkan oleh kandungan B3 dari sampah. Untuk itu berdasarkan kebutuhan lahan penimbunan, insinerasi merupakan teknologi yang membutuhkan lahan yang lebih kecil dibandingkan dengan kedua teknologi lainnya. Berdasarkan kriteria skoring, skor 3 diberikan pada teknologi pengolahan dengan insinerasi karena membutuhkan lahan yang paling kecil, skor 2 diberikan pada teknologi solidifikasi/stabilisasi yang tergolong pada kriteia sedang dan skor 1 untuk *landfill* karena membutuhkan lahan penimbunan paling luas.

2. Potensi pencemaran

Tujuan dari pengolahan adalah untuk mengurangi atau membatasi sifat bahaya dan/atau sifat racun dari sampah B3. Pengolahan SB3-RT yang kurang tepat akan

menyebabkan pencemaran pada lingkungan sekitar. Pengolahan dengan insinerasi dilakukan dengan pembakaran sampah pada temperatur yang tinggi sehingga dapat menghancurkan fisik sampah dan menghilangkan karakteristiknya. Namun kemungkinan pencemaran tetap ada karena terdapat senyawa ataupun residu dari proses insinerasi yang tidak dapat hilang hanya dengan pembakaran seperti gas dan partikulat. Pada insinerator modern, masalah ini ditangani dengan penggunaan alat tambahan pada insinerator seperti alat kontrol polusi udara (Tcobanoglous and Kreith, 2002).

Teknologi solidifikasi/stabilisasi diperkirakan memiliki potensi pencemaran terkecil dikarenakan proses ini dapat mengunci karakteristik limbah B3 dalam suatu matriks padatan melalui penambahan senyawa pengikat sehingga dapat menghambat pergerakan senyawa B3 dari limbah. Selain itu juga dilakukan serangkaian uji terhadap hasil olahan solidifikasi/stabilisasi untuk memastikan kandungan B3 limbah tidak luruh ke lingkungan. *Landfill* menjadi opsi pengolahan terakhir karena tidak dapat membatasi sifat bahaya dan/atau sifat racun dari SB3-RT yang berkontak langsung dengan tanah. Desain ataupun pengoperasian *landfill* yang tidak tepat dapat menyebabkan pencemaran terhadap udara, tanah dan air tanah. Berdasarkan kajian terhadap teknologi pencemaran, teknologi solidifikasi/stabilisasi memberikan potensi pencemaran terkecil dibandingkan dengan kedua teknologi lainnya. Teknologi solidifikasi/stabilisasi memperoleh skor 3 karena memiliki potensi pencemaran paling kecil, skor 2 untuk pengolahan dengan insinerasi dan skor 1 untuk *landfill* karena memiliki potensi pencemaran paling besar.

3. Kemampuan destruksi

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam pemilihan teknologi pengolahan adalah kemampuan destruksi sampah. Dilihat dari kemampuan destruksi atau penghancuran sampah, insinerasi merupakan opsi pengolahan terbaik karena dapat mendestruksi sampah hingga 99 % melalui proses pembakaran pada temperatur tinggi (Manyele, 2008). Berbeda dengan insinerasi, pengolahan dengan *landfill* dilakukan dengan cara membatasi sifat bahaya sampah dalam tanah. Destruksi sampah dapat terjadi namun membutuhkan waktu yang lama.

Hal ini dikarenakan material sampah yang di dominasi oleh bahan yang sulit terurai seperti plastik. Plastik membutuhkan waktu hingga lebih dari 50 tahun untuk dapat terdegradasi sempurna (Müller et al, 2001).

Proses solidifikasi/stabilisasi mampu mengunci kontaminan tersebut di dalam matriks dan menghambat mobilitasnya (USEPA, 1993). Pada teknologi solidifikasi/stabilisasi diperkirakan tidak terjadi destruksi karena prosesnya yang mengunci limbah dalam suatu padatan. Dari kajian di atas, skor 3 diberikan pada teknologi insinerasi karena memiliki kemampuan destruksi yang besar, skor 2 untuk *landfill*, dan skor 1 untuk pengolahan dengan solidifikasi/stabilisasi karena tidak terjadi destruksi sampah dalam prosesnya.

2. Kemampuan reduksi volume

Reduksi volume sampah akan berbanding lurus dengan kemampuan destruksinya. Jika dilihat dari kemampuan destruksi sampah, insinerasi memiliki kemampuan destruksi sampah yang lebih besar sehingga dapat mereduksi volume sampah hingga 99 % (Manyele, 2008). *Landfill* memiliki kemampuan destruksi sampah yang kecil karena membutuhkan waktu yang lama sehingga reduksi volume sampah juga akan terjadi dalam waktu yang lama. Pada teknologi solidifikasi/stabilisasi tidak ada reduksi volume karena tidak terdapat kemampuan destruksi sampah. Berdasarkan tabel 1, skor 3 diberikan untuk teknologi insinerasi karena memiliki kemampuan reduksi volume yang besar, skor 2 untuk *landfill* dengan kriteria sedang, dan skor 1 pada S/S karena tidak terjadi reduksi volume.

4. Energy recovery

Salah satu keuntungan dari pengolahan dengan insinerator adalah *energy recovery* dimana panas dari pembakaran sampah dapat diubah menjadi energi listrik. Untuk dapat melakukan *energy recovery* ini dibutuhkan insinerator khusus dikenal dengan WTE (*Waste to Energy*) incinerator yang dilengkapi dengan alat yang dapat mengubah energi panas menjadi energi listrik. Kemampuan *energy recovery* ini tidak dimiliki oleh S/S dan *landfill*. Komponen utama sampah yang berperan dalam pembakaran adalah kadar air, nilai kalor dan kadar abu. Insinerasi dengan fasilitas *recovery energy* menghasilkan panas

1.430 MW/h dan energi listrik sebesar 480 MWh/h dari 100 ton/h sampah (Gupta dan Mishra, 2015). Berdasarkan kriteria skoring, adanya *energy recovery* pada teknologi pengolahan diberi skor 2 dan teknologi pengolahan yang tidak ada *energy recovery* diberi dengan skor 1. Untuk itu, nilai 2 diberikan pada insinerasi dan nilai 1 untuk pengolahan dengan S/S dan *landfill*.

5. Pemanfaatan hasil olahan

Selain *energy recovery*, keuntungan lain dari proses pengolahan dengan insinerasi adalah pemanfaatan hasil olahan. Residu proses insinerasi berupa *bottom ash* dan *fly ash* dapat dimanfaatkan kembali sebagai material substitusi seperti pemanfaatan *bottom ash* sebagai pengganti semen pada pembuatan batako (Ristinah,dkk., 2012) ataupun sebagai pengganti semen pada pembuatan genteng beton (Zacoeb dkk., 2013) serta penggunaan *fly ash* sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton berlubang (Sulistyowati, 2013). Residu proses insinerasi ini juga dimanfaatkan sebagai bahan campuran semen dan pembuatan aspal. Sifat bahaya serta kebutuhan lahan penimbunan dapat dikurangi melalui pemanfaatan residu ini.

Keberhasilan hasil olahan S/S dapat diketahui dengan cara melakukan uji standar dan uji termodifikasi. Tiga hal yang umumnya dilakukan dalam pengujian proses S/S adalah uji fisik (kelembaban, kerapatan, kepadatan, kekuatan dan daya tahan), uji kimiawi (pH, reaksi redoks, kapasitas penetralan asam, kebasaaan, dan kandungan senyawa organik), dan uji peluluhan (TCLP, prosedur ekstraksi bertingkat, peluluhan dinamis prosedur peluluhan pengendapan asam sintetis/*Synthetic Acid Precipitation Leaching Procedure* dan ekstraksi berurutan) (Utomo dan Laksono, 2007).

Hasil S/S yang memenuhi uji standar dan uji termodifikasi dapat secara aman dibuang ke *landfill* atau dimanfaatkan untuk tujuan lain. Hasil olahan S/S umumnya berupa blok monolitik yang dapat digunakan sebagai bahan konstruksi. Pada *landfill* sampah kota, lahan *landfill* yang sudah tidak aktif dapat dimanfaatkan atau dialih fungsikan untuk tujuan lain. Namun hal ini tidak berlaku untuk *landfill* B3 karena sifat bahaya dari sampah B3 yang ditimbun di *landfill* tidak hilang melainkan hanya dibatasi dengan tujuan

meminimalisasi dampak terhadap manusia dan lingkungan hidup.

Skoring pada parameter pemanfaatan hasil olahan diberikan dengan melihat ada atau tidaknya pemanfaatan hasil olahan masing-masing teknologi pengolahan. Skor 2 diberikan pada teknologi yang hasil olahannya dapat dimanfaatkan yaitu insinerasi dan S/S dan skor 1 pada teknologi yang hasil olahannya tidak dapat dimanfaatkan yaitu *landfill*.

6. Jenis limbah yang diolah

Berdasarkan studi literatur diketahui proses insinerasi banyak digunakan dalam pengolahan limbah B3 dari industri dan sarana kesehatan yang umumnya terdiri dari limbah padat dan semi padat. Selain insinerasi, teknologi S/S juga banyak digunakan dalam penanganan limbah B3. S/S adalah proses yang didesain untuk mengubah limbah semi-padat, *sludge* atau limbah padat reaktif menjadi padatan yang tidak meluluhkan kontaminan ke lingkungan dan dapat dibuang ke *landfill* secara aman (Tangri dan Awasthi, 2011).

Pada awalnya proses S/S digunakan untuk menangani limbah nuklir, kemudian dikembangkan untuk menangani limbah berbahaya lainnya. Karena senyawa organik tidak mengubah sifat semen, maka limbah-limbah dari senyawa organik jarang yang ditangani dengan proses S/S. Umumnya proses S/S digunakan untuk menangani limbah-limbah dari logam (Utomo dan Laksono, 2007). S/S menjadi alternatif pengolahan karena kemampuannya yang dapat membatasi pergerakan senyawa B3 ke lingkungan. *Landfill* umumnya dilakukan untuk mengolah sampah berwujud padat sehingga dapat dengan mudah di timbun di lahan penimbunan. Berdasarkan kajian parameter jenis limbah yang diolah, teknologi insinerasi dan *landfill* adalah teknologi yang tepat untuk pengolahan SB3-RT karena limbahnya berwujud padat.

Skoring parameter ini diberikan dengan memperhatikan kesesuaian parameter dengan kondisi SB3-RT Kota Padang. Skor 2 diberikan pada insinerasi dan *landfill* karena jenis limbahnya sesuai dengan kondisi SB3-RT Kota Padang yaitu limbah padat sedangkan skor 1 pada S/S karena jenis limbah yang diolah tidak sesuai dengan SB3-RT Kota Padang dimana S/S umumnya dilakukan pada limbah semi padat dan limbah padat reaktif.

7. Persyaratan pengolahan

Dalam memilih teknologi pengolahan SB3-RT perlu diperhatikan persyaratan pengolahan sehingga dapat ditentukan pengolahan yang tepat untuk menangani permasalahan SB3-RT di Kota Padang. Persyaratan pengolahan yang perlu diperhatikan untuk insinerasi adalah karakteristik sampah yang cocok untuk dibakar. Menurut CPCB (2016) dalam *Selection Criteria of Waste Processing Technologies*, insinerasi merupakan pengolahan yang paling cocok diterapkan untuk sampah dengan nilai kalor >1.500 kkal/kg serta kadar air <45 %. Kriteria ini juga diatur dalam PP RI No. 101 Tahun 2014 yaitu nilai kalor >2.500 kkal/kg dan kadar air <15%.

Persyaratan pengolahan pada S/S yaitu lolos uji TCLP, kuat tekan memenuhi standar dan *paint filter test* yang diterapkan setelah sampel hasil olahan terbentuk. Pada *landfill* sebaiknya dipastikan terlebih dahulu limbah yang akan dibuang sudah aman ditimbun di *landfill*. Dari hasil uji fisik dan kimia SB3-RT Kota Padang didapatkan nilai kadar air SB3-RT sebesar 0,557 % dan nilai kalor 5.598,87 kkal/kg (Ruslinda, dkk., 2017). Nilai ini memenuhi persyaratan pengolahan menurut CPCB dan PP 101 Tahun 2014. Nilai kadar air SB3-RT Kota Padang yang tergolong kecil ini dikarenakan SB3-RT Kota Padang didominasi produk pembersih dan perawatan badan yang umumnya dalam kemasan berbahan plastik.

Skoring pada persyaratan pengolahan diberikan seperti pada parameter jenis limbah yang diolah, yaitu dengan memperhatikan kesesuaian parameter dengan kondisi SB3-RT Kota Padang. Skor 2 diberikan pada insinerasi karena SB3-RT Kota Padang telah memenuhi persyaratan pengolahan untuk insinerasi. Skor 1 pada S/S dan *landfill* karena SB3-RT Kota Padang tidak memenuhi persyaratan pengolahan.

8. Karakteristik limbah

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ruslinda (2017) diketahui SB3-RT Kota Padang terdiri dari kombinasi karakteristik toksik, korosif dan mudah terbakar. Karakteristik dari SB3-RT ini dapat menimbulkan dampak negatif baik bagi manusia, lingkungan ataupun makhluk hidup lainnya. Berdasarkan KEP-03/BAPEDAL/09/1995, insinerasi cocok digunakan untuk

mengolah sampah dengan karakteristik mudah meledak, mudah terbakar, toksik, infeksius, dan korosif.

Teknologi S/S cocok digunakan untuk menangani karakteristik sampah mudah meledak, reaktif, dan toksik. *Landfill* dapat menangani semua karakteristik sampah namun dalam penerapannya *landfilling* harus dilakukan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Hal ini karena kegiatan *landfilling* rentan terhadap pencemaran pada lokasi penimbunan. Oleh karena itu perlu dipastikan sampah atau limbah B3 aman dibuang ke *landfill* (Tangri dan Awasthi, 2011).

Skoring pada parameter karakteristik limbah diberikan dengan memperhatikan kesesuaian parameter dengan kondisi SB3-RT Kota Padang. Skor 2 diberikan pada insinerasi dan *landfill* karena SB3-RT Kota Padang memiliki karakteristik yang dapat diolah dengan kedua teknologi tersebut sedangkan skor 1 pada S/S karena tidak sesuai dengan karakteristik yang dapat diolah oleh S/S.

Hasil data skoring menunjukkan bahwa insinerasi merupakan teknologi yang memiliki nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan dua teknologi pengolahan lainnya. Nilai skor untuk insinerasi berjumlah 21, untuk S/S 13 dan untuk *landfill* 13. Berdasarkan hasil skoring ini, rekomendasi teknologi pengolahan yang memenuhi kelayakan teknis adalah insinerasi. Tabel 2 menampilkan evaluasi kelayakan teknis pengolahan SB3-RT Kota Padang dengan metode skoring.

Rekomendasi Pengolahan SB3-RT Kota Padang

Teknologi insinerasi mampu menghancurkan karakteristik SB3-RT Kota Padang yaitu toksik, korosif dan mudah terbakar. Hasil uji fisik dan kimia SB3-RT Kota Padang juga menunjukkan bahwa SB3-RT Kota Padang memiliki nilai kadar air dan nilai kalor yang cocok untuk pengolahan termal (insinerasi), karena memiliki nilai kadar air yang kecil yaitu 0,546 % (kriteria: <15 %) serta nilai kalor sebesar 5.031,798 kkal/kg (kriteria: >2.500 kkal/kg). Selain itu, berdasarkan hasil wawancara dengan pihak Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Padang diketahui bahwa pengadaan insinerator juga sedang dipertimbangkan oleh pemerintah Kota Padang sebagai teknologi pengolahan sampah di Kota Padang. Teknologi ini juga banyak

dimanfaatkan dalam pengolahan sampah baik di negara maju ataupun berkembang. Selain itu beberapa jenis industri juga menggunakan insinerasi untuk mengolah limbah B3 yang dihasilkan.

Menurut Prüss et al (1999) sebaiknya tidak dilakukan pembakaran terhadap kontainer gas bertekanan, sejumlah besar limbah kimia reaktif, garam perak dan limbah fotografik atau radiografik serta limbah dengan kadar merkuri dan kadmium yang tinggi seperti termometer dan baterai. Jika dilihat dari komposisi SB3-RT Kota Padang maka SB3-RT yang tidak dapat diolah dengan insinerasi yaitu kaleng bertekanan, baterai dan bohlam. Kaleng bertekanan umumnya digunakan sebagai kemasan pada produk pestisida-insektisida serta pada beberapa produk pembersih, pewangi ruangan dan kemasan parfum (kosmetik). Kaleng bertekanan umumnya digunakan sebagai kemasan pada produk pestisida-insektisida serta pada beberapa produk pembersih, pewangi ruangan dan kemasan parfum (kosmetik). Penelitian yang dilakukan oleh Bigum et al (2017) menunjukkan bahwa pembakaran terhadap lampu dan kabel menimbulkan dampak yang tinggi terhadap *ecotoxicity* (ET). Hal ini disebabkan karena adanya kandungan Cu yang tinggi pada kedua sampah tersebut. Kandungan Cu juga terdapat pada baterai, namun Ni merupakan elemen utama yang menyebabkan dampak dari pembakaran baterai. Nilai kalor dari ketiga jenis SB3-RT Kota Padang ini tidak dapat dideteksi waktu uji fisik dan kimia SB3-RT Kota Padang. Selain itu, ketiga jenis sampah ini juga memiliki nilai kadar abu yang tinggi sehingga dapat disimpulkan bahwa ketiga sampel tersebut sulit terbakar (Ruslinda, dkk., 2017)

Daur ulang dan *recovery* merupakan alternatif lain yang dapat dilakukan dalam penanganan kaleng bertekanan, bohlam, dan baterai. Minimum 25 % logam yang membentuk kaleng bertekanan dapat didaur ulang. Pengolahan yang dapat dilakukan pada bohlam dan baterai adalah *recovery*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Wijesekera et al (2011) diperkirakan sebanyak 8000 mg logam merkuri dapat di peroleh dari *recovery* bohlam per ton. Namun, nilai ini akan berbeda tergantung pada ukuran serta kadar merkuri yang terdapat pada

Tabel 2 Evaluasi Kelayakan Teknis Pengolahan SB3-RT Kota Padang

No.	Parameter	Insinerasi		S/S		Landfill	
		Evaluasi Kelayakan Teknis	Skor	Evaluasi Kelayakan Teknis	Skor	Evaluasi Kelayakan Teknis	Skor
1.	Kebutuhan Lahan Penimbunan	Hanya membutuhkan lahan penimbunan yang kecil	3	Lahan penimbunan cukup besar karena hasil olahan yang umumnya berupa blok monolitik	2	Mebutuhkan lahan penimbunan yang besar karena tidak ada pengurangan volume sampah	1
2.	Potensi Pencemaran	Pencemaran udara oleh senyawa yang dilepaskan dari hasil pembakaran namun dapat ditangani dengan alat kontrol polusi udara.	2	Tidak ada pencemaran selama hasil olahan S/S telah memenuhi rangkaian uji yang disyaratkan	3	Pencemaran terhadap air, tanah dan udara	1
3.	Kemampuan Destruksi	Destruksi sampah hingga 99 % dalam sekali pengolahan	3	Sampah tidak terdestruksi	1	Destruksi sampah membutuhkan waktu yang lama karena SB3-RT didominasi produk berbahan plastik dan logam	2
4.	Kemampuan reduksi volume	Pengurangan volume sampah hingga 90 %	3	Tidak ada pengurangan volume	1	Pengurangan volume membutuhkan waktu yang lama karena SB3-RT didominasi produk berbahan plastik dan logam	2
5.	<i>Energy Recovery</i>	<i>Energy recovery</i> melalui pemanfaatan panas dari insinerator	2	Tidak ada <i>energy recovery</i>	1	Tidak ada <i>energy recovery</i>	1
6.	Pemanfaatan Hasil Pengolahan	Residu abu dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran aspal	2	Hasil olahan yang memenuhi uji TCLP dapat digunakan sebagai bahan konstruksi	2	Tidak ada pemanfaatan	1
7.	Jenis Limbah yang Diolah	Umumnya limbah Padat dan semi padat	2	Umumnya limbah semi-padat, <i>sludge</i> atau limbah padat reaktif	1	Umumnya limbah padat	2
8.	Persyaratan Pengolahan	Nilai kadar air <15 % Nilai kalor >2.500 kkal/kg	2	-	1	Limbah yang akan diolah harus dipastikan aman dibuang di <i>landfill</i>	1
9.	Karakteristik Limbah	Mudah meledak, mudah terbakar, toksik, infeksius, korosif	2	Mudah meledak, reaktif, toksik	1	Semua karakteristik	2
Total Skor			21		13		13

bohlam (Raposo et al, 2003). Untuk itu, dalam pengolahan jenis sampah yang tidak dapat dibakar ini diperlukan kerja sama dengan pihak ketiga untuk menangani jenis sampah ini lebih lanjut.

SB3-RT Kota Padang telah memenuhi syarat sampah yang dapat diinsinerasi berdasarkan uji fisik dan kimianya. Selain persyaratan tersebut, perlu diperhatikan juga kriteria insinerator untuk sampah B3. Kriteria desain insinerator sampah B3 menurut CCME (1992) adalah memiliki temperatur operasi minimum 1.000 °C dan waktu retensi 2 detik serta dilengkapi dengan alat kendali gas untuk menghindari pencemaran udara.

Untuk menentukan kapasitas pengolahan insinerator dibutuhkan data jumlah SB3-RT yang akan diinsinerasi setiap harinya, yang diperoleh dari pengolahan data timbulan dan komposisi SB3-RT. Timbulan SB3-RT B3 Kota Padang sebesar 11.875 kg/hari, dimana 15% dari timbulan tersebut dapat diminimasi dengan konsep 4R (*reduce, reuse, recycle dan recovery*). Hasil pengukuran komposisi sampah untuk bohlam, baterai, dan kaleng bertekanan berturut-turut sebesar 3 %, 2 % dan 4 %, sehingga diperoleh total timbulan sampah untuk ketiga jenis sampah tersebut sebesar 1069 kg/hari. Sampah ini tidak bisa diinsinerasi, sehingga pengelolanya akan dikirim ke pihak ketiga (Ruslinda, dkk., 2017). Dengan demikian setelah dikurangi dengan timbulan SB3-RT yang dapat diminimasi dan timbulan SB3-RT yang tidak dapat diinsinerasi, didapatkan timbulan SB3-RT yang dibakar dalam insinerator sebesar 9025 kg/hari atau 376 kg/jam. Untuk itu spesifikasi insinerator yang dibutuhkan untuk pengolahan SB3-RT Kota Padang adalah kapasitas pengolahan sebesar 500 kg/jam, nilai kalor sampah ≤ 40 MJ/kg atau $\leq 9.560,23$ kkal/kg, temperatur operasi minimum 1.000 °C, waktu retensi sebesar 2 detik dan memiliki sistem gas buang dan peralatan tambahan.

SIMPULAN DAN SARAN

Hasil evaluasi kondisi eksisting pengolahan SB3-RT di Kota Padang didapatkan hanya 9% responden yang berasal dari sarana kesehatan dan industri besar yang telah melakukan pemilahan dan pengolahan SB3-RT. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat

pengetahuan masyarakat tentang SB3-RT. masih rendah dan belum pernah mendapatkan sosialisasi. Untuk itu perlu dilakukan kajian terhadap pengolahan SB3-RT. Berdasarkan kajian kelayakan teknis dengan metode skoring, direkomendasikan teknologi pengolahan insinerasi dapat dilakukan untuk pengolahan SB3-RT Kota Padang, kecuali untuk jenis kaleng bertekanan, bohlam dan baterai yang akan dikirim ke pihak ketiga untuk pengolahan lanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah membantu mendanai kegiatan penelitian ini dalam skim Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi Tahun 2018 dengan Kontrak Penelitian No. 050/SP2H/LT/DRPM/2018.

DAFTAR PUSTAKA

- Bigum, M., Damgaard, A., Scheutz, C., and Christensen, T.H. 2017. Environmental impacts and resource losses of incinerating misplaced household special wastes (WEEE, batteries, ink cartridges and cables). *Resources, Conservation and Recycling* 122:251-260.
- Central Pollution Control Board (CPCB). 2005. *Guidelines for Common Hazardous Waste Incineration*. Ministry of Environment and Forests. India.
- Damanhuri, E. dan Padmi, T. 2016. *Pengelolaan Sampah Terpadu*. Penerbit ITB, Bandung
- Gupta, S. and Mishra, R. S. (2015). Estimation of Electrical Energy Generation From Waste to Energy Using Incineration Technology. *International Journal of Advance Research and Innovation* 3(4): 631-634.
- Manyele, S. V. 2008. Toxic Acid Gas Absorber Design Considerations for Air Pollution Control in Process Industries. *Educational Research and Reviews* 3(4):137-147
- Müller, R. J., Kleeberg, I., and Deckwer, W. D. 2001. Biodegradation of polyesters

- containing aromatic constituents. *Journal Biotechnol* 86:87–95.
- KEP-03/BAPEDAL/09/1995 tentang *Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*
- Patwary, M.A., O'Hare, W.T., Sarker, M.H. 2011. Assessment of occupational and environmental safety associated with medical waste disposal in developing countries: A qualitative approach. *Safety Science* 49:1200–1207
- PP RI No. 101 Tahun 2014 tentang *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*.
- Prüss, A., Giroult, E., and Rushbrook, P. 1999. *Safe Management of Wastes from Health-care Activities*. Geneva: World Health Organization.
- Raharjo, S. Bachtiar V. S, Ruslinda, Y., Dwi Rizki, I., Matsumoto, T., Rachman, I. and Abdulhadi. D. 2017. Improvement of Municipal Solid Waste Management Using Life Cycle Assessment Approach for Reducing Household Hazardous Waste Contamination to Environment in Indonesia: A Case Study of Padang City, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 1(20):5692-570
- Raposo, C., Windmoller, C.C., and Junior, W.A.D. 2003. Mercury speciation in Fluorescent Lamps by Thermal Release Analysis. *Waste Management* 23:379-886.
- Ristinah, Zacoeb, A., Soehardjono, A., dan Setyowulan, D. 2012. Pengaruh Penggunaan Bottom Ash Sebagai Pengganti Semen Pada Campuran Batako Terhadap Kuat Tekan Batako. *Jurnal Rekayasa Sipil* 6(3):264-271
- Ruslinda, Y. dan Yustisia, D. 2013. Analisis Timbulan dan Komposisi Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) Rumah Tangga Di Kota Padang Berdasarkan Tingkat Pendapatan. *Jurnal Lingkungan Tropis* 7(1):21-30
- Ruslinda Y., Raharjo S. dan Dewilda Y. 2017. *Kajian Sistem Pengelolaan Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) di Kota Padang sebagai Upaya dalam Konservasi Energi*. Laporan Penelitian, Padang
- Soniya, S. 2014. Management of Hazardous Waste: Opium Marc. *International Research Journal of Environmental Sciences* 3(8):64-66.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 3242-2008 tentang *Pengelolaan Sampah di Pemukiman*
- Sulistiyowati, N. A. 2013. Bata Beton Berlubang dari Abu Batu Bara (Fly Ash dan Bottom Ash) yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan* 15(1):87-96
- Tangri, A. and Awasthi, S. 2011. Green Chemistry Series Module I: *Solid Waste Management & Handling*. WWF-India.
- Tchobanoglous, G. and Kreith, F. 2002. *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill. New York
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1986. *Handbook for stabilization/solidification of Hazardous Waste*.
- Utomo, M. P. dan Laksono, E. W. 2007. *Kajian Tentang Proses Solidifikasi/ Stabilisasi Logam Berat dalam Limbah dengan Semen Portland*. Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA Yogyakarta
- Wijesekara, R.G.S., Navarro R.R., dan Matsumura, M. 2011. Removal and Recovery of Mercury From Used Fluorescent Lamp Glass by Pyrolysis. *Journal National Science Foundation Sri Lanka* 39(3):235-241
- Zacoeb, A., Dewi, S. M., dan Jamaran, I. 2013. Pemanfaatan Limbah Bottom Ash Sebagai Pengganti Semen Pada Genteng Beton Ditinjau Dari Segi Kuat Lentur dan Perembesan Air. *Jurnal Teknik Sipil* 7(1):81-87