

## **BAB IV**

### **HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS DATA**

#### **4.1 Pengambilan Sampel Uji**

Klinik kecantikan X merupakan klinik estetika yang telah beroperasi di daerah Jawa tengah dan D.I Yogyakarta. Pada tahun 2019, klinik ini telah membuka 2 *outlet* yang beroperasi di D.I Yogyakarta. Klinik kecantikan X melayani *treatment cauter, facial whitening, facial anti aging, facial acne, peeling, sulam bedak, facial botanical, eye treatment, slimming, spa, totok wajah, dan refleksi*. Klinik kecantikan X juga menjual produk kecantikan berupa *cream, powder, dan produk kecantikan penunjang lainnya*. Semua pelayanan di klinik kecantikan X berpotensi menghasilkan limbah B3 terutama limbah B3 medis padat.

Pengambilan sampel uji dalam penelitian ini dilakukan di dua titik klinik kecantikan X selama 8 hari berturut-turut. Hal ini dilakukan karena siklus timbulan yang bervariasi setiap minggunya. Variasi sampel uji ini dapat dilihat dari perbandingan hari pertama dan kedelapan. Selain itu, timbulan limbah yang dihasilkan bergantung perawatan yang dilakukan setiap harinya. Sampel yang diuji mewakili karakteristik jenis limbah. Tidak semua sampel diambil setiap hari. Sampel yang jenisnya sudah diambil dihari sebelumnya tidak akan diambil dihari berikutnya karena telah dianggap mewakili karakteristiknya.

Pengambilan contoh uji ini diambil secara acak menurut jenis limbah yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, didapatkan 11 jenis limbah B3 padat yaitu Spons, Tissue, Latex, wadah bekas bubuk masker, Jarum akupuntur, Jarum suntik (spuit), masker, wadah bekas serum, wadah bekas enzim plastik, pinset dan pisau bekas pembersih komedo (ekstraktor). Sampel uji yang diteliti karakteristiknya tergolong kedalam limbah medis:

- Limbah benda tajam seperti jarum akupuntur, spuit, pinset, dan ekstraktor

- Limbah farmasi seperti serum dan cream yang telah kadaluarsa, wadah bekas serum, bekas enzim, wadah bekas masker
- Limbah infeksius seperti spons, tisu, masker, dan latex terkontaminasi.

Secara umum, jenis limbah medis yang paling banyak ditemukan pada fasilitas kesehatan adalah jarum suntik, perban bekas, kapas, dan selang infus (Astuti, 2014). Berdasarkan PERMEN LHK No. 56 tahun 2015, limbah B3 yang termasuk dalam Peraturan Menteri ini meliputi: infeksius, benda tajam, patologis, bahan kimia kadaluarsa, tumpahan, atau sisa kemasan, radioaktif, farmasi, sitotoksis, peralatan medis yang memiliki kandungan logam berat tinggi, dan tabung gas atau kontainer bertekanan (KLHK, 2015).

#### 4.2 Karakteristik Fisik

Limbah medis merupakan limbah yang dihasilkan dari kegiatan medis, perawatan kesehatan, dan kegiatan lain yang berhubungan dengan fasilitas pelayanan kesehatan yang memiliki sifat infeksi langsung atau tidak langsung, toksik, serta berbahaya. Pengelolaan limbah medis dibutuhkan karena dapat memutus rantai penyebaran penyakit, kerusakan ekonomi social, dan kerusakan lingkungan. Salah satu manajemen pengelolaan yang teratur adalah pengolahan limbah medis.

Banyak teknologi pengolahan limbah medis yang dapat diterapkan. Masing-masing teknologi memiliki batasannya tersendiri. Dalam menentukan teknologi pengolahan yang tepat, maka dibutuhkan analisis karakteristik untuk mengatur dan mengendalikan sistem pengolahan limbah medis. Adapun karakteristik yang diuji dalam penelitian ini adalah kadar air, *kadar volatile*, kadar abu, dan kadar karbon tetap.

#### 4.2.1 Kadar Air

Nilai kadar air menunjukkan persentase air dalam material limbah. Pengukuran kadar air dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan FTSP UII. Pengujian kadar air dilakukan menggunakan oven pada temperature 105°C selama 2 jam. Hasil uji kadar air dapat dilihat pada tabel dibawah ini dengan perhitungan persamaan 4.1:

**Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Kadar Air**

Sampel	Berat cawan Kosong (g)	Berat sampel+cawan (g)	Berat sampel+cawan 105°C (g)	Kadar air	Kadar kering
Spons	50,83	59,75	53,85	66,1%	33,9%
Latex	49,85	53,73	52,66	27,6%	72,4%
Tissue	49,27	56,02	54,34	24,9%	75,1%
Bekas Masker	53,9	92,41	83,6	22,9%	77,1%
Wadah Enzim	85,58	95,47	94,75	7,3%	92,7%
Wadah Serum Pink	128,78	149,4	148,66	3,6%	96,4%
Wadah Serum Hitam	147	164,8	164,58	1,2%	98,8%
Wadah Bekas Bubuk Masker	49,91	54,03	54	0,7%	99,3%
Jarum Akupuntur	50,87	51,72	51,72	0,0%	100,0%
Jarum Suntik (Sput)	52,24	53,18	53,18	0,0%	100,0%
Pinset	68,14	82,25	82,25	0,0%	100,0%
Ekstractor	73,53	86,03	86,03	0,0%	100,0%

Berdasarkan hasil pengujian di Laboratorim dapat dilihat pada tabel 4.1 kadar air yang diperoleh dari limbah B3 klinik X yaitu spons sebesar 66,1%, latex sebesar 27,6%, tisu dan bekas masker memiliki kadar air 24,9% dan 22,9%. Sementara itu, untuk wadah serum pink memiliki kadar air sebesar 3,2%, wadah serum hitam sebesar 1,2%, wadah enzim sebesar 3,6% dan wadah bekas bubuk masker 0,7%. Sampel jarum akupuntur, jarum suntik, pinset, dan ekstractor tidak mengandung air. Berdasarkan hasil

pengujian spons memiliki kadar air yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis limbah lainnya. Hal ini dikarenakan dalam kegiatan perawatan kecantikan spons biasa digunakan untuk membersihkan kulit dengan air selesai perawatan sehingga spons memiliki kadar air yang lebih tinggi. Sementara itu, limbah benda tajam memiliki kadar air sebesar 0%.

Spons merupakan bahan berpori yang digunakan sebagai alat pembersih. Kemampuan menyerap air dan meloloskan air membuat spons juga dapat digunakan sebagai media filter. Spons merupakan absorben yang memiliki struktur pori-pori halus (Pujiarti, 2014). Kemampuan spons sebagai absorben inilah yang membuat kadar air spons lebih tinggi dibandingkan sampel uji lainnya. Sementara limbah benda tajam memiliki karakteristik sulit untuk menyerap air. Sehingga benda tajam memiliki kadar air terendah yaitu 0%. Berikut adalah kadar air menurut jenis limbah yang diatur dalam Permen LHK no. 56 Tahun 2015 terlihat dalam tabel dibawah ini:

**Tabel 4. 2 Kadar Air Berdasarkan Jenis Limbah**

Kadar Air Menurut Jenis Limbah	
Benda Tajam	0,0%
Infeksius	35,4%
Farmasi	3,2%

Kadar air dipengaruhi oleh komposisi limbah. Tingginya kelembapan menyebabkan limbah harus ditangani secara khusus. Limbah medis infeksius dimana yang terdiri dari spons, tisu, latex, dan masker memiliki kadar air yang tinggi sehingga memerlukan perlakuan berbeda karena dapat menumbuhkan jamur dan bau dalam waktu singkat. Kelembapan yang cukup tinggi dapat menunjang pertumbuhan maksimum pada jenis jamur tertentu. Air merupakan faktor terpenting untuk menjamin

pertumbuhan dan perkembangan misilium membentuk tudung buah dan spora (Djarajah, 2001).

#### 4.2.2 Kadar Volatile

Kadar *volatile* adalah persentase material yang menguap setelah pembakaran pada temperature 600°C. Tujuan penentuan kadar *volatile* dan abu ini adalah untuk memperkirakan besar efektifitas pengurangan (reduksi) limbah dengan metode pembakaran berteknologi tinggi seperti insenerator (Novita, 2010). Pengukuran kadar *volatile* dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan FTSP UII menggunakan *furnace* pada temperature 600°C selama 2 jam. Hasil analisis dihitung menggunakan persamaan 3.3. Berikut adalah hasil uji kadar *volatile* sampel limbah:

**Tabel 4. 3 Hasil Uji kadar Volatile**

Sampel	Berat cawan Kosong (g)	Berat sampel 105°C (g)	Berat sampel 600°C (g)	Kadar Volatil
Spons	50,83	3,02	0,01	99,7%
Latex	49,85	2,81	0,56	80,1%
Tissue	49,27	5,07	0,85	83,2%
Bekas Masker	53,9	83,6	0,07	99,9%
Wadah Enzim	85,58	9,17	8,45	7,9%
Wadah Serum Pink	128,78	19,88	14,86	25,3%
Wadah Serum Hitam	147	17,58	16,15	8,1%
Wadah Bekas Bubuk Masker	49,91	54	0,07	99,9%
Jarum Akupuntur	50,87	0,85	0,85	0,0%
Jarum Suntik (Spuit)	52,24	0,94	0,10	89,4%
Pinset	68,14	14,11	14,11	0,0%
Ekstractor	73,53	12,5	12,46	0,3%

Berdasarkan hasil pengujian uji kadar *volatile* dilakukan menggunakan sampel yang telah melalui uji kadar air. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan spons memiliki kadar volatil sebesar 99,7%, latex

sebesar 80,1%, tisu dan bekas bubuk masker adalah sebesar 83,2% dan 99,9%, wadah enzim 7,9%, wadah serum pink dan wadah serum hitam 25% dan 8,1%. Untuk wadah bekas bubuk masker 99%, jarum suntik 89,4% dan jarum akupuntur, pinset serta *face contractor* memiliki kadar volatile sebesar 0%. Kadar volatile wadah bekas bubuk masker memiliki persentase yang paling tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa wadah bekas bubuk masker memiliki kandungan organik yang tinggi. Pada pengujian kadar volatil, jarum suntik memiliki kadar volatile yang lebih tinggi dibandingkan dengan limbah benda tajam yang lain. Hal ini dikarenakan pada jarum suntik terdapat komponen plastik didalamnya berbeda dengan benda tajam lain yang tidak terdiri dari bahan plastik. Kemudian pada wadah serum pink memiliki kadar volatile yang lebih tinggi dibandingkan dengan wadah serum hitam. Hal ini dikarenakan pada wadah serum pink terdapat komponen plastik dan sejenis aluminium penyusunnya. Berikut adalah kadar volatil menurut jenis limbahnya:

**Tabel 4. 4 Kadar Volatil Berdasarkan Jenis Limbah**

Kadar Volatil Menurut Jenis Limbah	
Benda Tajam	22,4%
Infeksius	90,7%
Farmasi	35,3%

Limbah klinik kecantikan memiliki kadar volatile yang tinggi kecuali limbah benda tajam seperti jarum akupuntur. Kadar volatile tertinggi adalah limbah jenis infeksius dimana komponen penyusun utamanya adalah plastic dan berserat seperti latex, tisu, dan spons yaitu dengan nilai 90,7%. Limbah medis memiliki nilai kalor dan kadar volatile yang lebih tinggi, terutama plastik, bahan berserat dan limbah dari sayatan bedah (Zeng, Huang, & Yu, 2014). Limbah medis seperti sarung tangan, kertas, dan plastik berdasarkan hasil penelitian karakteristik limbah B3 klinik gigi di

Yunani didapatkan hasil dengan kadar volatile yang tinggi (Mandalidis, Topalidis, Voudrias, & Iosifidis, 2018).

#### 4.2.3 Kadar Abu

Kadar abu merupakan persentase material sisa pembakaran pada temperatur tinggi. Penentuan kadar abu bertujuan untuk menentukan efektifitas kinerja proses pembakaran (Novita et al., 2010). Hasil pengujian kadar abu dapat dilihat dari tabel 4.5 dibawah ini:

**Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kadar abu**

Sampel	Kadar Volatil	Kadar Abu
Spons	99,7%	0,3%
Latex	80,1%	19,9%
Tissue	83,2%	16,8%
Bekas Masker	99,9%	0,1%
Wadah Enzim	7,9%	92,1%
Wadah Serum Pink	25,3%	74,7%
Wadah Serum Hitam	8,1%	91,9%
Wadah Bekas Bubuk Masker	99,9%	0,1%
Jarum Akupuntur	0,0%	100,0%
Jarum Suntik (Sput)	89,4%	10,6%
Pinset	0,0%	100,0%
Ekstraktor	0,3%	99,7%

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh hasil yaitu spons sebesar 0,3%, latex sebesar 19,9%, tisu 16,8%, bekas masker sebesar 0,1%, dan wadah enzim 92,1%. Sampel wadah serum pink memiliki kadar abu sebesar 74,4%, wadah serum hitam sebesar 91,9%, wadah bekas bubuk masker 0,1%. Jarum suntik dan ekstraktor memiliki kadar abu 99,7% dan 10,6%. Sementara sampel jarum akupuntur dan pinset memiliki kadar abu sebesar

100%. Kadar abu hasil pengujian menunjukkan bahwa limbah B3 klinik kecantikan memiliki kadar abu yang rendah kecuali bahan stainless dan benda tajam. Hal ini bisa menjadi pertimbangan untuk menggunakan pengolahan dengan teknologi temperature tinggi seperti insenerator. Hal ini terjadi karena didalam sampel terdapat zat-zat yang sulit dibakar dan sulit diuapkan sehingga residu pembakaran lebih banyak yang mengakibatkan abu yang terbentuk semakin banyak. Suhu yang digunakan dalam pembakaran juga bisa menjadi faktor kadar abu benda tajam ini lebih tinggi. Berikut adalah kadar abu berdasarkan jenis limbah:

**Tabel 4. 6 Kadar Abu Berdasarkan Jenis Limbah**

Kadar Abu Menurut Jenis Limbah	
Benda Tajam	77,6%
Infeksius	9,3%
Farmasi	64,7%

Abu terbentuk dari bahan-bahan mineral yang terikat dalam struktur karbon biomassa selama pembakarannya. Disamping itu, abu juga merupakan pengokotor-pengotor dari bahan bakar (Sukarta & Ayuni, 2017). Olehkarena itu, kadar abu yang rendah menunjukkan hasil pengolahan yang baik.

**Tabel 4. 7 Hasil perhitungan berat yang hilang**

Sampel	Berat cawan Kosong (g)	Berat sampel+cawan (g)	Berat sampel+cawan 600°C (g)	Berat yang Hilang (g)
Spons	50,83	59,75	50,84	8,91
Latex	49,85	53,73	50,41	3,32
Tissue	49,27	56,02	50,12	5,9
Bekas Masker	53,9	92,41	53,97	38,44
Wadah Enzim	85,58	95,47	94,03	1,4

Sampel	Berat cawan Kosong (g)	Berat sampel+cawan (g)	Berat sampel+cawan 600°C (g)	Berat yang Hilang (g)
Wadah Serum Pink	128,78	149,4	143,64	5,76
Wadah Serum Hitam	147	164,8	163,15	1,65
Wadah Bekas Bubuk Masker	49,91	54,03	49,98	4,05
Jarum Akupuntur	50,87	51,72	51,72	0
Jarum Suntik (Sput)	52,24	53,18	52,34	0,84
Pinset	68,14	82,25	82,25	0
Ekstractor	73,53	86,03	85,99	0,04

Limbah B3 benda tajam tidak bisa hancur dibakar ketika pengujian pada suhu 600°C seperti sampel uji lainnya. Dapat dilihat pada tabel 4.7 jarum akupuntur tidak kehilangan berat sama sekali setelah dilakukan pemanasan pada suhu 600°C. Sementara untuk jarum suntik hanya kehilangan berat 0,84 gr dari berat awal sampel uji. Suhu ideal untuk pembakaran limbah padat medis untuk mengolah, memusnahkan, ataupun untuk pembuangan akhir adalah insinerasi dengan suhu sekitar 1200°C (McKone & Hammond, 2000).

Hasil penelitian Lemineux et al (2004) mengatakan bahwa beberapa tahun terakhir ini pembakaran sampah pada kondisi pembakaran dan suhu yang rendah dapat menimbulkan gas racun dioksin dan furan. Efek samping dioksin terhadap manusia adalah perubahan kode keturunan (marker) dari tingkat pertumbuhan awal dari hormone (Sumaiku, 2007). Pembakaran pada temperatur yang tidak tepat dapat menyebabkan terjadinya pembakaran yang tidak sempurna sehingga dapat menghasilkan emisi seperti dioksin dan furan. Dampak keracunan dioxin untuk jangka panjang adalah kanker dan aterosklerosis Karena sumber dioxin bisa dari berbagai materi yang ada di sekitar kita, maka dioxin menjadi ancaman serius bagi kesehatan manusia, karena pengaruh negatifnya sudah dapat

dicapai hanya pada dosis yang sangat rendah yaitu beberapa part per trillium dalam lemak tubuh kita (Kodrat, 2013).

#### 4.2.4 Fixed Carbon

*Fixed Carbon* (karbon tetap) merupakan material menguap pada temperature pemanasan 550°C-600°C dan temperature 800°C-950°C (Lubis,2018). Pada penelitian ini, penentuan nilai *fixed carbon* menggunakan *furnace* dengan temperatur 600°C selama 2 jam. Karbon padat (*fixed carbon*) adalah karbon yang tersisa setelah bahan-bahan mudah menguap dilepaskan dari proses pembakaran. Berbeda dengan karbon ultimate yang hilang bersama hidrokarbon karena volatilitasnya. Oleh sebab itu, karbon ultimate akan menentukan jumlah karbondioksida yang dihasilkan selama pembakaran oleh suatu bahan bakar. Nilai karbon tetap ini digunakan sebagai estimasi jumlah arang yang akan dihasilkan dari sampel bahan bakar (Sukarta & Ayuni, 2017).

**Tabel 4. 8 Hasil Pengujian fixed carbon**

Sampel	Fixed Carbon
Spons	33,5%
Latex	52,5%
Tissue	58,3%
Bekas Masker	77,0%
Wadah Enzim	0,6%
Wadah Serum Pink	21,7%
Wadah Serum Hitam	6,9%
Wadah Bekas Bubuk Masker	99,1%
Jarum Akupuntur	0,0%
Jarum Suntik (Sput)	89,4%
Pinset	0,0%
Ekstraktor	0,3%

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium didapat hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan 3.5 yaitu kadar *fixed carbon* spons sebesar 34%, Latex sebesar 52,5%, tisu 58,3%, bekas masker 77%, wadah enzim sebesar 0,6%, dan wadah serum pink 21,7%. Sampel wadah serum hitam memiliki kadar *fixed carbon* sebesar 6,9%, souit dan extractor sebesar 89,4% dan 0,3%, sisanya jarum akupuntur dan pinset memiliki kadar karbon tetap sebesar 0%. Berikut adalah kadar karbon tetap menurut jenis limbah terlihat pada tabel dibawah ini:

**Tabel 4. 9 Kadar *fixed carbon* Berdasarkan Jenis Limbah**

Kadar Fixed Carbon Menurut Jenis Limbah	
Benda Tajam	22,4%
Infeksius	55,4%
Farmasi	32,1%

Limbah padat B3 benda tajam rata-rata memiliki kadar *fixed carbon* yang rendah. Hal ini dikarenakan sebagian besar benda tajam merupakan bahan stainless yang tidak bervolatil. Komponen besi atau stainless merupakan material tidak bervolatil sehingga tidak dapat dilakukan pengolahan berupa pengomposan dan daur ulang (Wulandari, Darmayanti, & Asmura, 2014).

#### 4.3 Nilai Kalor

Nilai kalor dari limbah medis merupakan data dasar dalam menentukan parameter desain dan operasional sistem pengolahan terutama pengolahan yang menggunakan insenerator. Selain itu, nilai kalor merupakan data utama dalam penentuan potensi WtE dalam limbah yang dihasilkan. Saat ini ada dua metode untuk menentukan nilai kalor. Pertama adalah penentuan nilai kalor menggunakan analisis elemen dan kedua adalah penentuan nilai kalor yang lebih praktis menggunakan *Bomb Calorimeter*. Terdapat perbedaan besar antara nilai yang diukur menggunakan kedua metode ini. Metode pertama

sangat dipengaruhi oleh unsur-unsur kimiawi yang kompleks dan sangat rumit dalam proses analisisnya sehingga memerlukan sampel yang sangat banyak. Sementara itu, metode yang kedua lebih praktis namun hasil analisis sangat bergantung dengan keadaan sampel yang akan diuji.

Nilai kalor merupakan besaran dimana menggambarkan kalor yang terkandung dari sebuah bahan. Semakin tinggi nilai kalor, maka semakin mudah bahan tersebut terbakar. Penentuan kandungan energi ini sangat diperlukan dalam pengolahan sampah terutama pengolahan secara *thermal* (Damanhuri & Padi, 2016).

Penentuan nilai kalor dalam penelitian ini menggunakan metode analisis bomb kalorimeter dan perhitungan substitusi menggunakan *proximate analysis*. Hal ini dikarenakan belum adanya data elemen kimia limbah medis baik yang diperoleh secara primer ataupun sekunder. Keterbatasan waktu dan biaya dalam penelitian membuat penelitian ini hanya terbatas pada data karakteristik fisik limbah. Sedikitnya penelitian mengenai karakteristik kimia limbah medis yang dilakukan membuat peneliti kesulitan menemukan data sekunder yang dibutuhkan. Kebanyakan penelitian dan data sekunder yang ada merupakan karakteristik kimia limbah domestik yang mana memiliki karakteristik yang berbeda dengan limbah medis.

Saat penelitian berlangsung terdapat kendala teknis penggunaan alat bomb kalorimeter di Laboratorium Teknik Lingkungan FTSP UII. Alat analisis belum bisa menganalisis sampel berjenis plastik. Hal ini dikarenakan saat memasukkan sampel uji kedalam *chamber* harus berupa gumpalan halus dan padat sehingga sampel perlu dibentuk berupa pellet/pil. Sampel jenis plastik tidak bisa dipadatkan sesuai standart analisis alat. Hal ini menyebabkan sampel uji berjenis plastik tidak dianalisis menggunakan bomb kalorimeter. Selain sampel uji berjenis bahan plastik, sampel uji limbah B3 benda tajam juga tidak dianalisis menggunakan metode ini. Hal ini dikarenakan sampel yang dapat diuji harus lebur dan halus dengan berat  $\pm 1$ g (gram). Kendala lain saat penggunaan bomb kalorimeter adalah *water filter* yang tidak berfungsi dengan baik sehingga sensor tidak terbaca saat analisis sampel uji. Penyebab *water*

*filter* tidak terbaca saat sensing H<sub>2</sub>O *rinse* terjadi karena penyumbatan pada *water filter* sehingga *air input* tidak masuk dengan lancar. Hal ini bisa terjadi karena kurangnya *maintenance* alat bomb kalorimeter yang seharusnya air dalam sistem diganti 3 bulan sekali serta komponen lain dibersihkan secara berkala sesuai dengan SOP (*standart operasional procedure*) alat *bomb calorimeter type* IKA C1. Saran ini penulis sampaikan mengingat banyaknya sensor pada alat bomb kalorimeter.

Dikarenakan faktor kendala tersebut, maka hanya 2 sampel uji yang dianalisis menggunakan metode bomb kalorimeter yaitu masker dan tissue. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

**Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Nilai Kalor**

Sampel	Nilai Kalor (J/g)
Spons	-
Tissue	18320
Latex	-
Wadah Bekas Bubuk Masker	-
Jarum Akupuntur	-
Jarum Suntik	-
Bekas Masker	5424

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh hasil nilai kalor tissue sebesar 18320 J/g dan bekas masker 5424 J/g. Metode lain yang digunakan dalam penentuan nilai kalor ini adalah metode manual dengan menggunakan *proximate analysis*. Hal ini bertujuan untuk membandingkan nilai kalor antara hasil analisis bomb kalorimeter dengan perhitungan manual. Selain itu, kendala teknis saat penggunaan bomb kalorimeter membuat sampel uji yang belum dianalisis menggunakan metode bom kalorimeter dianalisis menggunakan perhitungan manual *proximate analysis* dengan cara substitusi hasil pengujian fraksi volatile dan fraksi *fixed carbon*.

Berikut adalah hasil perhitungan *proximate analysis*:

**Tabel 4. 11 Hasil perhitungan proximate analysis**

Sampel	Volatil	Fixed Carbon	Nilai Kalor (cal/g)
Spons	99,7%	33,5%	12834,7
Latex	80,1%	52,5%	14017,3
Tissue	83,2%	58,3%	15118,9
Bekas Masker	99,9%	77,0%	19164,0
Wadah Enzim	7,9%	0,6%	711,0
Wadah Serum Pink	25,3%	21,7%	5161,2
Wadah Serum Hitam	8,1%	6,9%	1651,0
Wadah Bekas Bubuk Masker	99,9%	99,1%	22365,3
Jarum Akupuntur	0,0%	0,0%	0,0
Jarum Suntik (Sput)	89,4%	89,4%	20106,4
Pinset	0,0%	0,0%	0,0
Ekstraktor	0,3%	0,3%	72,0

Perhitungan *proximate analysis* menggunakan persamaan 3.7 dimana menggunakan data perhitungan hasil uji primer yaitu kadar *volatile* dan *fixed carbon*. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut didapat nilai kalor spons sebesar 12834,7 Kal/g, Latex sebesar 14017 kal/g, tisu 15118,9 kal/g, bekas masker sebesar 19164,0 kal/g, wadah enzim 711,0 kal/g, wadah serum hitam dan pink sebesar 5161,2 kal/g dan 1651,0 kal/g, wadah bekas masker 22365,3 kal/g, serta sampel jarum suntik dan ekstraktor sebesar 20106,4 dan 72 kal/g. Sementara itu, untuk jarum akupuntur dan pinset memiliki nilai kalor 0 kal/g.

Berdasarkan hasil kedua pengujian maka dapat dilihat nilai kalor sampel limbah B3 klinik X sebagai berikut:

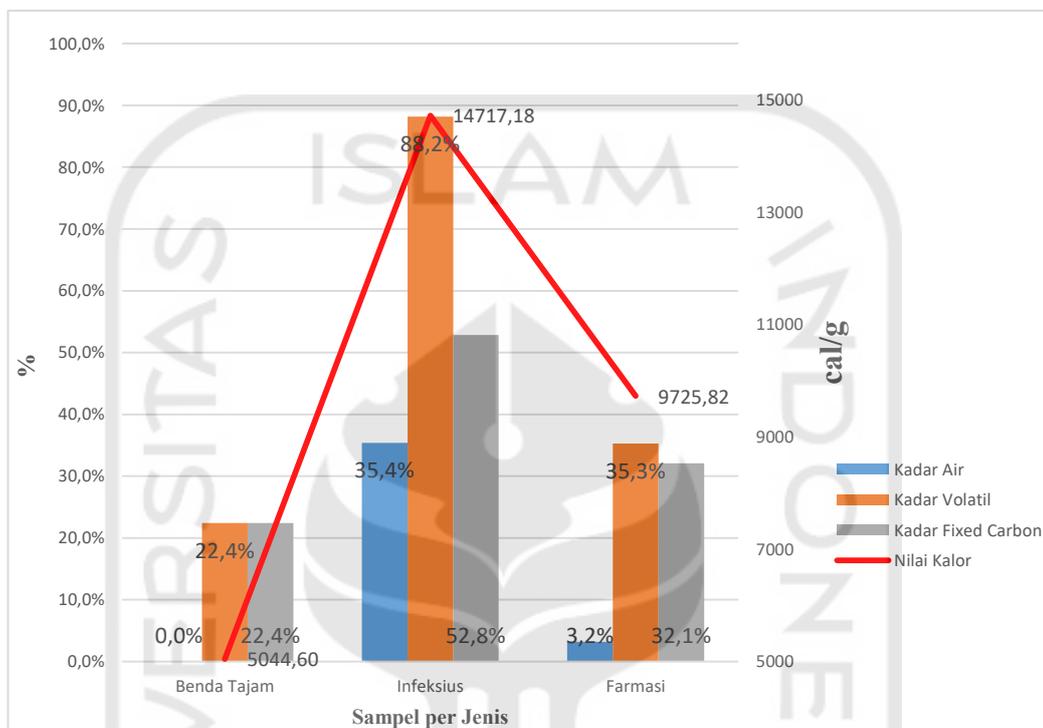
**Tabel 4. 12 Perbandingan metode bomb calorimeter dan proximate analysis**

Sampel	Nilai Kalor (cal/g)	
	Bom Kalorimeter	Proximate Analysis
Spons	-	0,0
Latex	-	14017,3

Sampel	Nilai Kalor (cal/g)	
	Bom Kalorimeter	<i>Proximate Analysis</i>
Tissue	4375,66	15118,9
Bekas Masker	1295,5	16897,8
Wadah Enzim	-	711,0
Wadah Serum Pink	-	5161,2
Wadah Serum Hitam	-	1651,0
Wadah Bekas Bubuk Masker	-	22365,3
Jarum Akupuntur	-	0,0
Jarum Suntik (Spuit)	-	20106,4
Pinset	-	0,0
Ekstraktor	-	72,0
<b>Min</b>		<b>0,0</b>
<b>Max</b>		<b>22365,3</b>

Dari tabel diatas, dapat dilihat perbandingan hasil nilai kalor menggunakan metode *proximate analysis* dengan *bomb calorimeter* dimana satuan telah di konversi menjadi kal/g. Berdasarkan tabel konversi energi didapat 1 Joule sama dengan 0,238846 Kalori (convertlive.com, 2019). Hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil analisis *proximate analysis* dan *bomb calorimeter* perbedaan yang signifikan. Hasil pengujian dengan menggunakan *bomb calorimeter* untuk sampel bekas masker dan tissue memiliki nilai kalor yang lebih besar yaitu 1295,5 kal/g dan 4375,66 kal/g dibandingkan dengan perhitungan *proximate analysis* nilai kalor masker dan tissue sebesar 19164 kal/g dan 15118 kal/g. Hal ini dapat dipengaruhi oleh faktor temperature yang digunakan dalam pengambilan data primer. Dimana kadar abu datanya diambil berdasarkan pengurangan 100% terhadap kadar volatil. Dalam analisis nilai kalor dengan metode *proximate analysis* lebih baik pendekatan perhitungan nilai kalor menggunakan kadar abu yang telah melalui pengujian tersendiri menggunakan rumus pengukuran kadar abu sampah (Lubis, 2018). Nilai kalor berbanding lurus

dengan kadar volatile dan karbon tetap. Hubungan ketiganya dapat dilihat dari grafik dibawah ini:



**Gambar 4. 1 Grafik Hubungan Nilai Kalor dan nilai proximate analysis**

Berdasarkan grafik yang diatas dapat dilihat bahwa nilai kalor per kategori limbah berbanding lurus dengan nilai kadar air, kadar volatile, dan kadar karbon tetap. Dimana limbah infeksius memiliki nilai kalor yang paling tinggi dan kemudian diikuti dengan limbah farmasi. Nilai kalor paling rendah dihasilkan dari limbah medis benda tajam. Kandungan kadar volatil dan karbon tetap merupakan komponen utama yang mempengaruhi nilai kalor yang dihasilkan. Seakim tinggi karbon tetap dan volatil yang dihasilkan maka menggambarkan bahan tersebut mudah terbakar sehingga nilai kalor akan meningkat (District, et al., 2018).

#### 4.4 Waste To Energy

Dalam kaitannya dengan energy, nilai kalor sampah menjadi parameter penting. Dibutuhkan energi alternative yang dapat menggantikan sumber daya tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil. Energi ini dapat digantikan oleh energi yang terkandung didalam sampah dimana dikenal dengan konsep *WtE* (Novita, 2010 dalam Lubis, 2018). Limbah dapat menjadi sumber daya energi yang berharga. Sumber energy dari limbah dapat menyelesaikan dua masalah sekaligus yaitu mengolah jumlah limbah yang tidak dapat didaur ulang dan menghasilkan sejumlah besar energi yang dapat dimasukkan dalam bauran produksi energi. Interaksi antara solusi pengelolaan limbah dan teknologi produksi energi dapat sangat bervariasi, tergantung beberapa faktor. Negara yang berbeda memilih strategi yang berbeda tergantung pada kriteria dan kendala social, ekonomi, dan lingkungan. Jika teknologi WtE dikembangkan dan diimplementasikan mengikuti prinsip-prinsip keberlanjutan, maka strategi pengolahan limbah yang tepat dan produksi energi yang ramah lingkungan dapat dicapai pada saat yang sama untuk mengatasi tantangan disektor pengelolaan limbah dan energi. Saat ini ada beberapa teknologi yang diterapkan dalam konversi limbah menjadi energy yaitu *thermochemical conversion* dan *biological conversion*. *Thermochemical conversion* terdiri dari teknologi combustion, gasification, dan pyrolysis (*World Energy Council*, 2016).

Limbah medis memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dan bahan yang mudah menguap (Zeng et al., 2014). Nilai kalor yang dibutuhkan dalam perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) yaitu 2500 kkal/kg dengan kadar air 30% (Damanhuri & Padi, 2010). Berdasarkan hasil pengujian nilai kalor sampah yang di peroleh dari limbah B3 padat klinik kecantikan cukup tinggi yaitu dengan nilai tertinggi 4375 cal/g serta nilai kadar air rata-rata dibawah 30%. Hal ini dapat dipertimbangkan untuk alternatif pengolahan limbah secara termal. Namun, penelitian ini perlu ditindaklanjuti mengenai timbulan limbah yang dihasilkan. Dalam pengolahan thermal menjadi energi dibutuhkan jumlah potensi limbah tertentu. Kadar air yang tinggi akan mengurangi efisiensi konversi dan kinerja karena sejumlah energi

akan digunakan untuk menguapkan air tersebut. Selain itu juga mencegah pemabakaran lebih lanjut. Begitupula sebaliknya, kadar air yang rendah akan meningkatkan kinerja dan melancarkan keberlanjutan pembakaran (Oberberger, et al., 2004 dalam Sukarta, 2016).

Berdasarkan hasil analisis kadar *volatile*, sampel uji memiliki kemampuan untuk menjadi bahan bakar. Hal ini terlihat dari kadar *volatile* yang tinggi yaitu berkisar antara 70%-99%. Bahan-bahan *volatile* menentukan kemampuan pembakaran dari suatu bahan bakar. Bahan bakar dengan kandungan *volatile* tinggi berarti sebagian besar nilai kalor yang dimiliki akan dilepaskan sebagai uap pembakaran (Oberberger, et al., 2004 dalam Sukarta, 2016).

Dilihat dari kadar abu yang dihasilkan, limbah B3 padat klinik kecantikan memiliki potensi menjadi energi. Hal ini dapat dilihat dari kadar abu yang rendah. Semakin tinggi kandungan abu pada bahan bakar maka nilai kalor dari bahan bakar tersebut semakin rendah. Begitupula sebaliknya, semakin rendah kandungan abu pada bahan bakar maka nilai kalor bahan bakar tersebut semakin tinggi (Sukarta, 2016). Sebagai aturan umum, insenerasi WtE hanya dapat dipertimbangkan jika aliran limbah yang masuk memiliki nilai kalor bersih rata-rata minimal 7 MJ/kg. Selain itu, dalam pengoperasian yang optimal, pasokan limbah yang mudah terbakar setidaknya harus berjumlah 100.000 ton/tahun (untuk skala energi yang lebih besar) (World Energy Council, 2016).

**Tabel 4. 13 Perbandingan Emisi**

	MSW inseneration	Coal combustion
Carbon dioxide	1355,33	2030,13
Sulphur dioxide	0,36	5,9
Nitrogen oxides	2,45	2,72

Sumber: World Energy Council (2016)

Namun, untuk menyelesaikan perbandingan ini, harus diingat bahwa ada emisi tambahan yang cukup besar untuk menambang, membersihkan, dan mengangkut batubara ke pembangkit listrik. Pertimbangan serupa juga dapat dibuat untuk emisi partikulat, yang telah menjadi perhatian besar terutama untuk instalasi pembakaran yaitu tingkat emisi dioxin dan furan. Untuk mengurangi emisi fasa partikulat dan gas, baik batu bara dan pabrik insinerasi telah mengadopsi serangkaian unit proses untuk membersihkan aliran gas buang, dan ini telah menyebabkan peningkatan yang signifikan dalam hal kelestarian lingkungan. Saat ini, tanaman insinerasi tidak lagi menjadi sumber dioksin dan furan yang signifikan. Hal ini karena penerapan peraturan pemerintah tentang strategi pengendalian emisi, yang telah menyebabkan pengurangan total emisi dioksin terkait insinerasi tahunan dari 10.000 gram pada tahun 1987 menjadi 10 gram pada tahun 2013, suatu pengurangan sebesar 99.9% (United States Environmental Protection Agency, 2015). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 70 Tahun 2016 disebutkan bahwa emisi dioksin dan furan yang diperbolehkan dari hasil pengolahan termal adalah  $0,1 \text{ ng/Nm}^3$  (KLHK, 2016).

Berdasarkan data karakteristik fisik limbah B3 klinik kecantikan X yaitu kadar air, kadar volatile dan abu, kadar *fixed carbon* dan nilai kalor, maka dapat dilihat bahwa limbah B3 padat klinik kecantikan memiliki potensi yang tinggi untuk dimanfaatkan menjadi energi dengan konsep WtE menggunakan teknologi thermal. Limbah Infeksius non tajam merupakan bahan yang direkomendasikan yang memiliki peluang paling tinggi menjadi WtE dengan nilai kalor tinggi. Namun, keterbatasan dalam penelitian membuat penentuan teknologi yang cocok untuk digunakan belum bisa ditentukan karena tidak adanya data karakteristik kimia limbah B3 klinik kecantikan. Selain itu, sedikitnya penelitian mengenai limbah B3 klinik kecantikan, khususnya yang membahas karakteristik fisik-kimia menjadi kendala dalam mempertimbangkan teknologi dalam mengkonversi limbah B3 klinik kecantikan menjadi energy. Faktor lain yang menjadi keterbatasan dalam penelitian ini adalah mengenai timbulan limbah B3 klinik kecantikan dan potensi emisi yang dihasilkan juga

perlu dipertimbangkan dalam penentuan perencanaan konversi limbah menjadi energy. Sehingga perlu adanya penelitian yang lebih mendetail terkait hal ini.

#### 4.5 Alternatif Pengolahan

Data timbulan, komposisi, dan karakteristik limbah adalah hal yang menunjang penyusunan sistem pengelolaan persampahan di suatu wilayah. Data tersebut harus tersedia agar tersusunnya alternatif sistem pengelolaan sampah yang baik (Damanhuri & Padmi, 2016). Ada beberapa jenis teknologi pengolahan dan pembuangan limbah medis seperti gelombang elektromagnetik, disinfeksi kimia, sanitary landfill dan insinerasi suhu tinggi. Setiap teknologi memiliki batasannya tersendiri (Zeng et al., 2014). Teknologi incinerator adalah teknologi pembakaran yang menggunakan temperatur tinggi tetapi yang sering jadi masalah ialah emisi udara dari incinerator tersebut yang dapat mencemari udara apabila tidak memiliki pengendalian udara yang baik. Insinerasi merupakan proses pembakaran yang terorganisir untuk mengurangi limbah padat sehingga berbentuk abu dan dilakukan netralisasi dan solidifikasi abu hasil bakaran dan dikuburkan didalam tanah. Proses pengoperasian insinerasi juga sangat berpengaruh pada eektivitas dari pemusnahan limbah medis rumah sakit sehingga diperlukan standar pengoperasian yang baik (Leonard, 2013). Pemanasan gelombang mikro adalah teknik yang menarik karena memberikan proses pemanasan volumetrik dengan efisiensi pemanasan yang lebih baik dibandingkan dengan teknik konvensional. Namun, bahan yang berbeda memberikan respon yang berbeda terhadap pemanasan gelombang mikro. Beberapa bahan mencerminkan atau tampak transparan untuk gelombang mikro dan dikenal sebagai dielektrik (T.J. Appleton, Colder, Kingman, & Lowndes, 2005).

Dalam penentuan alternatif pengolahan limbah B3 klinik kecantikan digunakan metode multi kriteria analisis. Dalam analisis ini diambil berdasarkan aspek teknis (merujuk kepada data *proximate analysis*), sosial, biaya dan ekonomi, dan lingkungan. Bobot setiap point kriteria berjumlah 100%. Skoring masing-masing kriteria ditentukan atas faktor data primer dan

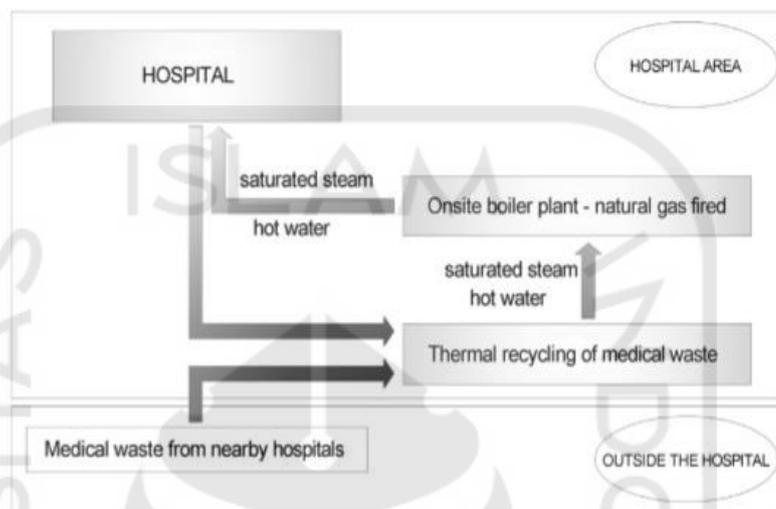
sekunder terkait pengolahan limbah B3 medis dan berdasarkan tingkat kepentingannya. Sementara itu pemilihan teknologi berdasarkan kriteria karakteristik limbah klinik kecantikan, biaya investasi dan operasi, kemudahan operasi, dan faktor emisi. Skoring ditetapkan dengan range nilai 0 sampai 5. Nilai 0 berarti paling rendah dan nilai 5 adalah skor paling tinggi. Dimana artinya skor 5 akan diberikan kepada teknologi yang paling baik dan direkomendasikan. Alternatif teknologi yang dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah teknologi menggunakan pengolahan temperature tinggi (insinerasi) dan teknologi microwave. Berikut adalah tabel multi kriteria analisis alternative pengolahan:

**Tabel 4. 14 Multi Kriteria analisis**

Kriteria	Bobot (0%-100%)	Skoring (0-5)		Hasil	
		Insinerasi	Microwave	Insinerasi	Microwave
Kesesuaian dengan karakteristik limbah	15%	5	3	0,75	0,45
Biaya investasi	10%	3	5	0,3	0,5
Biaya operasional	12%	3	5	0,36	0,6
Kemudahan operasional	12%	4	5	0,48	0,6
Emisi	12%	5	2	0,6	0,24
Efisiensi	15%	5	3	0,75	0,45
WtE	12%	5	0	0,6	0
Kebutuhan energi	12%	2	3	0,24	0,36
<b>Total</b>				<b>4,08</b>	<b>3,2</b>

Alternatif teknologi yang pertama adalah teknologi yang menggunakan temperatur suhu tinggi atau dikenal juga dengan incinerator. Tujuan incinerator adalah untuk mengurangi volume limbah B3 sebelum dibuang dan juga dapat menghilangkan sifat berbahaya limbah itu sendiri (Kodrat, 2013). Insinerator ini adalah tipe batch dan tidak memiliki sistem kontrol polusi udara. Frekuensi

operasional insinerator ini adalah 3 jam setiap hari dan kapasitas pengolahannya adalah 120 kg / hari (Abd El-Salam, 2010).



**Gambar 4. 2 Skema alir Pengolahan Insinerator**

Pada kriteria analisis potensi WtE, teknologi insinerator memiliki poin 5. Hal ini dikarenakan pengolahan menggunakan metode ini memiliki potensi konversi limbah yang sangat besar untuk dimanfaatkan sebagai energi. Teknologi pembakaran suhu tinggi memiliki tingkat minimalisasi limbah dan regenerasi sumber daya yang lebih tinggi. Selain itu, pengolahan limbah medis dengan pembakaran sangat bermanfaat tidak hanya bagi lingkungan tetapi juga bagi ekonomi. Insenerasi saat ini juga digunakan untuk pengolahan limbah medis di Tiongkok (Duan, Huang, Wang, Zhou, & Li, 2008). Pembakaran limbah medis dalam insenerator tidak stabil karena komposisi kompleks dalam limbah medis, proporsi komponen yang berbeda, nilai kalor dan berbagai karakteristik lain. Analisis fisik-kimia dan nilai kalor dari limbah medis adalah yang paling penting untuk mengatur dan mengendalikan sistem pembakaran limbah medis (Zeng et al., 2014).

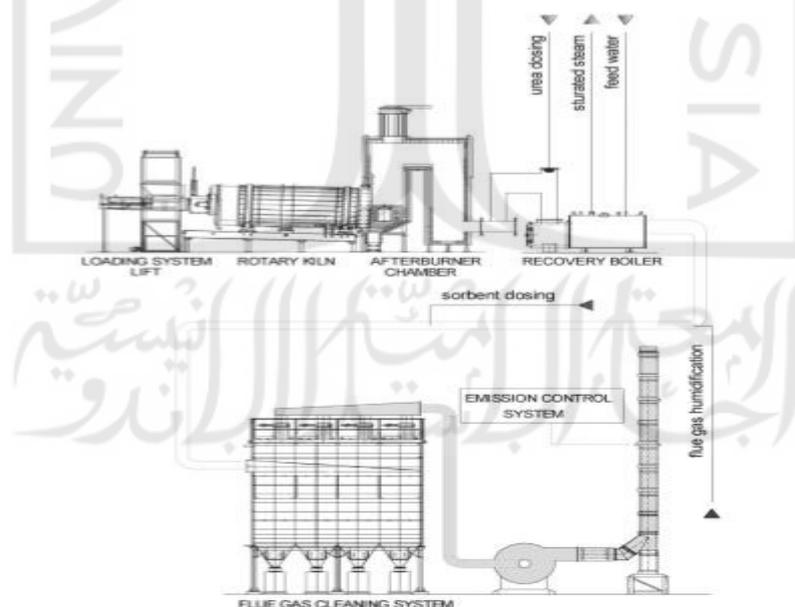
Adanya komponen *cleansing fuel* pada incinerator membuat residu yang dikeluarkan menjadi tidak berbahaya jika pembakaran terjadi secara sempurna.

Sehingga pada kriteria analisis point 5 diberikan untuk teknologi ini. Emisi ke atmosfer sesuai dengan persyaratan hukum yang berlaku. Sistem pembersihan gas buang dalam jenis instalasi ini harus menjamin efisiensi dan keandalan yang tinggi. Analisis aspek lingkungan menunjukkan bahwa emisi aktual ke atmosfer, yang dihasilkan dari pengolahan termal limbah medis, lebih rendah selama periode studi daripada standar emisi saat ini di Uni Eropa (J. Bujak, 2015). Insinerasi MSW tidak sepenuhnya menghilangkan, tetapi secara signifikan mengurangi volume limbah yang harus diisi tanah. Pengurangan sekitar 75% berat dan 90% volume. Residu yang timbul dari pengendalian polusi udara (APC). Bagaimanapun masalah lingkungan, karena memberikan ancaman yang parah terhadap air tanah dan air permukaan (World Bank, 1999).

Efisiensi yang besar membuat teknologi insinerator mendapat point 5 untuk kriteria ini jika dibandingkan dengan teknologi elektromagnetik menggunakan *microwave*. Penelitian ekperimental dari fluks energi telah menunjukkan bahwa aliran energi yang berguna dan efisiensi energi tergantung pada beban insinerator. Peningkatan beban insinerator menghasilkan peningkatan aliran energi bermanfaat dan peningkatan rasio efisiensi energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembuangan panas limbah medis menghasilkan manfaat lingkungan, energi dan ekonomi yang signifikan (J. W. Bujak, 2015). Hal ini dapat menjadi pemanfaatan potensi energi limbah yang sangat efisien yang sederhana dan tidak terlalu memberatkan lingkungan.

Insinerasi limbah medis memungkinkan menghasilkan uap menggunakan panas limbah dari pembakaran limbah medis. Dia menunjukkan bahwa penggunaan sistem pemulihan panas seperti itu secara signifikan mengurangi biaya operasi tahunan ruang boiler rumah sakit (Dean, 1996). Menurut dokumen yang dikembangkan oleh Uni Eropa, insinerasi limbah medis dalam tanur putar saat ini merupakan teknik terbaik yang tersedia (BAT). Sistem eksperimental yang dipelajari menggunakan konstruksi unik ruang bakar (*rotary kiln*). Karena nilai kalori yang relatif tinggi dari limbah (sekitar 25 MJ/kg) dan kebutuhan untuk pembakaran sekunder (*afterburn*) dari abu dasar yang sesuai (European IPPC Bureau, 2006). Secara sistem kerja, insinerasi

memiliki beberapa elemen yaitu sistem pembuatan limbah, ruang pembakaran, Ruang pembakaran sekunder, HRSG, dan sistem pembersihan gas. Sistem pemuatan limbah diisi secara otomatis dan ditimbang oleh sistem computer. Sistem pemuatan otomatis mencegah pemuatan limbah dalam kasus selama start-up, ketika suhu yang dibutuhkan dalam insinerator dan ruang pembakaran sekunder terlalu rendah dan selama operasi, ketika suhu yang dibutuhkan telah melebihi nilai maksimum atau nilai batas emisi udara yang diizinkan telah terlampaui. Pengaturan kecepatan dalam ruang pembakaran menentukan efisiensi sistem dan tingkat kejenuhan abu dasar. Pengaturan ini juga berdampak pada emisi *fly ash* (debu). Pada ruang pembakaran sekunder dilengkapi dengan sistem pembuangan abu dasar otomatis. Sementara itu, pada pembangkit uap pemulihan panas (HRSG) Area pertukaran panas yang besar memungkinkan pendinginan gas buang yang cepat, sehingga mengurangi emisi dioksin (J. Bujak, 2015). Berikut adalah contoh elemen incinerator model Rotary Kiln:



**Gambar 4. 3 Contoh Desain Insinerator**  
Sumber: Bujak (2015)

Dilihat dari aspek analisis kelayakan ekonomi, total pengeluaran modal dan biaya pemeliharaan telah ditentukan. Selain itu, total biaya perawatan dibagi menjadi beberapa item. Biaya perbaikan diberikan dengan penggantian refraktori sebagai item biaya utama. Item biaya perawatan lainnya termasuk pembelian reagen (kalsium sorben dengan zat karbon aktif) dan urea. Item ini juga mencakup elemen-elemen lain yang terkait dengan operasi, seperti pembersihan atau persediaan kantor dll. Karena personel yang sangat berkualifikasi diperlukan, upah bulanan yang relatif tinggi yaitu \$3000 diasumsikan. Indikator ekonomi yang disebutkan di atas menunjukkan bahwa sistem yang diuji juga menguntungkan dan menarik. Sistem pengujian juga hemat biaya dan menarik dari sudut pandang ekonomi (J. Bujak, 2015). Secara lebih rinci dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

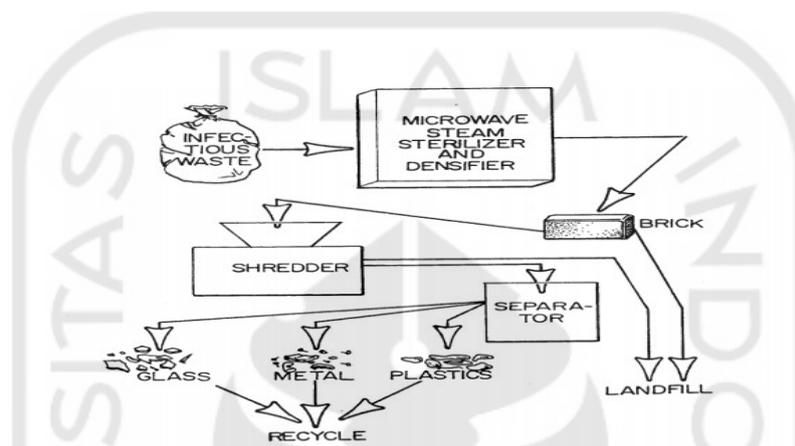
Economic analysis module	
1. CAPEX (capital expenditures), \$	2,500,000
2. OPEX (operating expenditures), \$	642,000
2.1 Price for recycling 1 kg of medical waste, \$	0.7
2.2 Price of 1 Nm <sup>3</sup> of natural gas as additional fuel, \$	0.6
2.3 Employment rate – number of people per 8 h	2
2.4 Gross pay rate, \$/person and month	3000
2.5 Repairs, \$/year	187,000
2.6 Other maintenance costs, \$/year	167,000
3. Net Present Value (NPV), \$ (for $r = 0$ , after 15 years)	2,593,257
4. Simple Payback (SPB), years	4.0
5. Internal Rate of Return (IRR), %	18.6

**Gambar 4. 4 RAB Insinerator technology**

Sumber: Bujak (2015)

Berdasarkan tabel diatas dapat dilihat bahwa biaya investasi dan operasi teknologi pengolahan menggunakan incinerator memiliki biaya yang sangat besar dibandingkan dengan teknologi pembandingnya. Dikarekan hal tersebut, skor yang digunakan untuk kriteria ini adalah 3. Skor 3 diberikan karena teknologi incinerator berpotensi menghasilkan energi yang dapat menjadi penghematan biaya dalam pengoperasiannya secara ekonomi.

Alternatif pengolahan yang kedua selain insinerasi adalah teknologi pengolahan gelombang mikro. Microwave menggunakan teknologi gelombang mikro sebagai pengganti energi efisien untuk teknologi pemanasan dimana saat ini digunakan dalam pengolahan limbah. Berikut adalah skema pengolahan menggunakan teknologi microwave:



**Gambar 4.5 Skema Microwave technology**

Sumber: Google Patent (2005)

Aplikasi proses yang dipertimbangkan adalah perawatan dan kontrol aliran limbah spesifik dan sering bermasalah, termasuk ban bekas dan plastik, dan remediasi tanah dan air tanah yang terkontaminasi. Ada beberapa teknologi elektro-panas seperti induksi, frekuensi radio, hambatan langsung, inframerah dan pemanasan gelombang mikro yang semuanya memanfaatkan bagian spesifik dari spektrum elektromagnetik. Microwave efektif mensterilkan 20% dari total berat limbah. Bagian tertentu dari limbah infeksius ditempatkan ke dalam bejana bertekanan sterilisasi gelombang mikro dan kemudian sterilisasi ditutup. Sejumlah air yang dipilih kemudian dimasukkan ke dalam bejana bertekanan yang disegel untuk memfasilitasi pengolahan limbah infeksi yang terkandung di dalamnya, dan alat sterilisasi gelombang mikro digerakkan untuk mengubah air dalam bejana tekan menjadi uap untuk meningkatkan suhu di dalam bejana tekan ke setidaknya 150°C (T.J. Appleton et al., 2005).

Pemanasan gelombang mikro adalah teknik yang menarik karena memberikan proses pemanasan volumetrik pada efisiensi pemanasan yang lebih baik dibandingkan dengan teknik konvensional. Jika proses gelombang mikro dikontrol dengan benar, pemanasan seragam dalam material dapat diperoleh. Panas dihasilkan secara volumetrik di dalam material dari sumber eksternal. Namun, setiap bahan berbeda dalam responnya terhadap pemanasan gelombang mikro. Bahan memiliki frekuensi optimal yang berbeda yang dapat diukur dan tidak semua bahan menyerap gelombang mikro. Beberapa bahan mencerminkan atau tampak transparan terhadap gelombang mikro dan karenanya kurang responsif terhadap pemanasan (Oespchuck JM, 1984). Dalam teknologi microwave terdapat proses pirolisis. Pirolisis adalah proses yang menggunakan panas tidak langsung untuk mengubah bahan organik padat menjadi gas dan cairan. Dekomposisi ini biasanya terjadi tanpa oksigen, di bawah tekanan dan pada suhu operasi di atas 450°C (800°F). Pirolisis gelombang mikro menggunakan panas yang dihasilkan oleh gelombang mikro untuk mencapai suhu ini dalam waktu teknik pemanasan konvensional. Namun sejumlah masalah potensial melekat dalam pemanasan cepat ini, termasuk fenomena hotspot. Sebuah hotspot adalah jenis ketidakstabilan termal yang muncul karena ketergantungan nonlinear dari sifat elektromagnetik dan termal dari material (minzoni, 1996).

Meskipun pengobatan dengan berkas elektron dipercepat dianggap sebagai salah satu metode yang paling efektif untuk pengurangan simultan NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub>, konsumsi energi listrik untuk pemurnian gas-gas buangan yang efektif sangat tinggi. Pengurangan konsumsi energi listrik untuk pembersihan gas-gas api dapat diselesaikan dengan penerapan metode-metode seperti gabungan berkas elektron dipercepat (EB) dan gelombang mikro yang diiradiasi radiasi non-termal. Microwave memiliki biaya 60 US/kg sudah termasuk transportasi, disposal, dan perencanaan. Microwave mampu mengolah limbah 100L/hari. Namun, microwave membutuhkan penanganan bahan infeksi melalui beberapa operasi (T.J. Appleton et al., 2005).

Hasil analisis teknologi menggunakan gelombang mikro memiliki total skor yang lebih rendah dibandingkan dengan incinerator kecuali pada kriteria biaya investasi dan operasional. Berdasarkan studi literature yang didapatkan disebutkan bahwa biaya teknologi ini secara keseluruhan hanya mencapai 60 US. Oleh karena itu, skor 5 diberikan kepada teknologi ini untuk kriteria biaya. Namun, untuk kriteria lainnya teknologi gelombang mikro terlalu sederhana untuk mengolah limbah B3 klinik kecantikan. Perbandingan kedua teknologi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

**Tabel 4. 15 Perbandingan Teknologi Berdasarkan Metode Skoring**

Kriteria	Insineration	Microwave	Referensi
Kesesuaian dengan karakteristik limbah	Sesuai untuk pengolahan limbah medis padat dengan kadar abu rendah <sup>(1)</sup>	Sesuai untuk limbah padat <sup>(2)</sup>	
Biaya investasi	Biaya investasi tinggi <sup>(6)</sup>	Biaya investasi rendah <sup>(2)</sup>	<sup>1)</sup> Leon201
Biaya operasional	Biaya operasional tinggi <sup>(6)</sup>	Biaya operasional rendah <sup>(2)</sup>	<sup>2)</sup> T.J. Appleton, Colder, Kingman, & Lowndes, 2005
Kemudahan operasional	Memiliki banyak komponen <sup>(6)</sup>	Lebih sedikit komponen	<sup>3)</sup> Abd El-Salam, 2010
Emisi	Dapat terjadi emisi udara dari insinerator apabila tidak dikelola dengan baik karena insinerator tidak memiliki sistem kontrol polusi udara <sup>(3)</sup>	Belum ada kontrol emisi <sup>(7)</sup>	<sup>4)</sup> Duan, Huang, Wang, Zhou, & Li, 2008
Efisiensi	Efisiensi tinggi <sup>(1)</sup>	Efisiensi rendah untuk	<sup>5)</sup> Zeng et al., 2014
			<sup>6)</sup> J. W. Bujak, 2015
			<sup>7)</sup> Oespchuck JM, 1984

Kriteria	Insineration	Microwave	Referensi
		infeksius karena membutuhkan operasi lain <sup>(7)</sup>	
WtE	Memiliki potensi limbah menjadi energi <sup>(4)</sup>	Hampiiir tidak memiliki potensi WtE	
Kebutuhan Energi	Membutuhkan banyak energi <sup>(5)</sup>	Membutuhkan sedikit energi <sup>(2)</sup>	

Sehingga berdasarkan hasil data analisis yang dilakukan, teknologi alternatif pengolahan limbah B3 yang dipilih adalah teknologi dengan menggunakan temperature tinggi atau insinerasi dengan total skor penilaian 4,08. Namun, diperlukan studi lebih lanjut mengenai spesifikasi tipe incinerator yang digunakan untuk pengolahan limbah B3 klinik kecantikan ini. Meskipun teknologi microwave lebih unggul dari segi biaya, namun hal itu tidak bisa ditandingi dari total skor insenerator yang lebih unggul di lebih banyak kriteria.