

KARAKTERISTIK TEMPERATUR DAN REDUKSI LIMBAH RADIOAKTIF PADAT RUANG BAKAR PROTOTIPE TUNGKU HK - 2010

Henky Poedjo Rahardjo

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri - BATAN
Jl.Tamansari 71 Bandung, 40132
E-mail: henkypr@batan.go.id

Diterima: 14-09-2012
Diterima dalam bentuk revisi: 22-01-2013
Disetujui: 31-01-2013

ABSTRAK

KARAKTERISTIK TEMPERATUR DAN REDUKSI LIMBAH RADIOAKTIF PADAT RUANG BAKAR PROTOTIPE TUNGKU HK-2010. Sebuah prototipe tungku pembakar limbah radioaktif padat berbentuk silinder yang kemudian diberi nama HK – 2010 telah dibuat untuk mengatasi besarnya volume limbah padat di Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR) BATAN, Bandung. Tungku ini berfungsi untuk mereduksi limbah radioaktif padat dengan cara pembakaran. Sebelum tungku digunakan untuk membakar limbah radioaktif secara terus menerus, perlu dilakukan uji pembakaran berbagai jumlah dan jenis limbah untuk mempelajari unjuk kerjanya. Pengujian unjuk kerja tungku dilakukan terhadap besar dan homogenitas temperatur ruang bakar yang dapat dicapai pada saat pembakaran. Dalam penelitian ini dilakukan uji pembakaran 20 kg limbah radioaktif padat campuran dari laboratorium di PTNBR. Pada saat uji pembakaran dilakukan pengukuran temperatur dinding primer dan sekunder tungku, laju alir udara, serta pengukuran berat dan volume limbah sebelum dan sesudah dibakar. Dari hasil uji pembakaran yang telah dilakukan, diperoleh bahwa temperatur maksimum ruang bakar prototipe tungku pembakar limbah radioaktif padat dapat mencapai 783,34 °C. Tungku pembakar limbah radioaktif yang dibuat dapat mengurangi jumlah limbah sebesar 90 – 92 % pada saat pengujian dilakukan dan dapat mereduksi paparan radiasi pengion hingga menjadi rata-rata 0,249 %.

Kata kunci: tungku, limbah, radioaktif, pembakaran, ruang pembakaran

ABSTRACT

TEMPERATURE AND SOLID RADIOACTIVE WASTE REDUCTION CHARACTERISTICS OF COMBUSTION CHAMBER IN HK-2010 INCINERATOR PROTOTYPE. A prototype of cylindrical solid radioactive waste incinerator named HK – 2010 has been created for solid radioactive waste handling in Nuclear Technology Center for Materials and Radiometry (PTNBR) BATAN, Bandung. The incinerator serves to reduce the solid radioactive wastes by burning. The incinerator performance for burning of various amounts and types of solid waste is necessary to be tested before it is continuously used in radioactive waste burning. The temperature value and homogeneity of combustion chamber during combustion process have been tested. An amount of 20 kg of solid radioactive waste mixture from the PTNBR laboratory was burned in the incinerator and the temperature of primary and secondary walls, also the water flow rate were measured. The weight of radioactive waste was measured before and after combustion process. The maximum temperature of combustion chamber wall of the incinerator reach 783.34 °C and the incinerator can reduce the amount of waste until 90% - 92%. The radioactive waste exposure can be reduced to 0.249 %.

Keywords: incinerator, waste, radioactive, burning, combustion chamber

1. PENDAHULUAN

Penelitian di bidang teknologi nuklir di Indonesia sudah sejak lama dilakukan. Hal ini terlihat dengan adanya kegiatan litbang di bidang teknologi pengolahan limbah radioaktif, kimia radiasi dan radioisotop, teknologi keselamatan reaktor, pembuatan elemen bakar serta kegiatan lainnya. Penguasaan bidang teknologi nuklir ini sangat diperlukan dalam rangka persiapan pembangunan PLTN di Indonesia. Tiga buah reaktor penelitian yaitu Reaktor TRIGA Bandung, Reaktor Kartini Yogyakarta dan Reaktor Serbaguna Serpong beserta fasilitas laboratorium penunjangnya, telah digunakan oleh BATAN untuk melakukan kegiatan penguasaan teknologi nuklir. Kegiatan litbang selalu disertai dengan berbagai eksperimen laboratorium yang tidak terlepas dari pemakaian benda-benda kerja, baik berupa peralatan, ataupun bahan yang secara langsung maupun tidak langsung berinteraksi dengan zat radioaktif. Berbagai benda kerja yang dipergunakan dalam kegiatan laboratorium pada saatnya akan tidak dapat dipergunakan lagi, dan menjadi limbah. Limbah yang telah tercemar zat radioaktif digolongkan sebagai limbah radioaktif. Dalam makalah ini limbah radioaktif yang akan ditinjau hanyalah limbah radioaktif padat (LRAP) berupa kertas, tissue, kain, karet dan plastik yang berasal dari laboratorium PTNBR BATAN, yang tergolong sebagai limbah padat radioaktivitas rendah. Limbah radioaktif membutuhkan ruangan yang besar dan mempunyai dinding yang tahan terhadap radiasi pengion untuk tempat penyimpanan dan pengolahannya.

Salah satu cara penanganan limbah radioaktif adalah dengan pengecilan volume (reduksi) melalui pembakaran. Pada tahun 2010 telah selesai dibuat suatu prototipe tungku pembakar limbah radioaktif berbentuk silinder yang kemudian diberi nama HK – 2010. Tungku ini mempunyai dua dinding melingkar sebagai penahan radiasi pengion dan radiasi panas, yaitu dinding primer dan dinding sekunder. Dinding-dinding ini dibuat dari campuran pasir, abu, batu dan semen yang direkatkan dengan air sehingga dapat tahan terhadap api. Sebelum tungku tersebut digunakan perlu dilakukan uji coba karakteristik temperatur ruang bakarnya, sehingga dapat diketahui cara operasi yang optimal. Dalam makalah ini akan ditinjau unjuk kerja ruang bakar tungku HK – 2010 melalui temperatur maksimum yang dapat dicapai, homogenitas temperatur di dalam ruang bakar, serta kemampuan tungku dalam mereduksi jumlah limbah dan besarnya paparan radiasi.

1.1. Prototipe Tungku Pembakar Limbah Radioaktif HK – 2010

Prototipe tungku pembakar limbah radioaktif HK – 2010 adalah tungku yang telah dirancang dan dibuat oleh staf peneliti Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR) BATAN, Bandung. Tungku ini berbentuk silinder dengan diameter 1 m, tinggi ruang bakar 1 m, dan mempunyai dua dinding. Di bagian dalam disebut dinding primer dan di bagian luar disebut dinding sekunder yang berguna sebagai penahan radiasi panas maupun radiasi pengion. Kedua dinding tersebut berupa susunan bata yang dibuat dari

campuran pasir abu batu, semen *portland* dan air dengan komposisi tertentu. Dinding primer dan dinding sekunder dipisahkan oleh kolom udara, yaitu ruang saluran udara tempat masuknya udara sekunder ke dalam ruang bakar yang akan didistribusikan sebagai udara bawah api, udara atas api dan udara sekunder. Kolom udara ini juga berfungsi sebagai lapisan pendingin dan menahan keluarnya panas dari dinding primer ke lingkungan. Kegunaan lain dari dinding sekunder adalah sebagai penyangga tutup ruang bakar dan cerobong gas buang. Gas buang tungku ini ke luar melalui cerobong yang kemudian dilewatkan ke suatu pemisah partikel yang disebut separator. Separator terdiri dari sistem pendingin dan sistem *scrubber* untuk menjebak partikel yang dibawa gas buang agar tidak ke luar ke lingkungan dan larut bersama air pendingin (Gambar 1). Prototipe tungku pembakar limbah radioaktif HK-2010 mempunyai temperatur operasi 750 °C dengan volume ruang bakar 1 m³. Rangka bakar diletakkan di bagian tengah silinder dan di bawahnya dibuat lubang untuk pembuangan material sisa pembakaran.

1.1.1. Proses pembakaran limbah dalam ruang bakar

Proses utama yang berlangsung dalam ruang bakar adalah proses pembakaran. Proses pembakaran merupakan reaksi oksidasi antara bahan bakar dengan gas oksigen yang berlangsung pada kondisi tertentu. Bahan bakar adalah semua senyawa kimia yang dapat terbakar, termasuk unsur-unsur yang terkandung dalam material limbah radioaktif .

Beberapa variabel yang memungkinkan reaksi pembakaran berlangsung adalah: temperatur, tekanan, kontak antar unsur dan penyediaan oksigen.

Pada tahap awal material limbah mengalami pengeringan, yaitu proses pemanasan sehingga temperatur limbah naik sampai di atas 100 °C dan air yang terkandung di dalamnya menguap. Pemanasan ini memerlukan energi dari luar, dalam bentuk panas dari alat pemanas, atau dari nyala api.

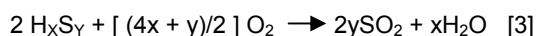
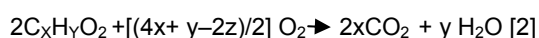
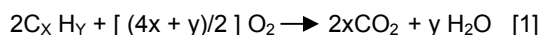
Tahap berikutnya, apabila temperatur mencapai kurang lebih 250 °C maka bahan-bahan dari meterial yang mudah terbakar akan terurai dan kemudian teroksidasi.



Gambar 1. Prototipe tungku pembakar limbah radioaktif HK-2010.

Peristiwa terurainya material sebelum mengalami reaksi oksidasi disebut pirolisis, yaitu proses penguraian baik secara kimia maupun fisika yang disebabkan oleh bertambahnya penyerapan panas oleh material limbah, tanpa adanya gas oksigen. Untuk material yang mengandung hidrokarbon yang mudah terbakar (C_xH_y)_n, pada umumnya dalam reaksi oksidasi

menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂), dan uap air (H₂O). Zat cair yang terbentuk pada pembakaran limbah antara lain berupa air (H₂O), minyak atau ter, sedang zat padat yang dihasilkan berupa abu dan arang (C). Beberapa reaksi oksidasi (1-4) yang terjadi pada peristiwa pembakaran dijelaskan melalui persamaan reaksi [1-3].



Reaksi [1-3] masing-masing diikuti dengan perubahan entalpi (ΔH), apabila ΔH berharga negatif, berarti merupakan reaksi yang menghasilkan panas (eksoterm), sebaliknya bila ΔH berharga positif maka merupakan reaksi yang membutuhkan atau menyerap panas (endoterm). Pada tahap akhir, energi yang dihasilkan dari reaksi oksidasi digunakan untuk mempercepat proses pembakaran limbah selanjutnya.

1.1.2. Kandungan unsur dan titik nyala dalam material limbah

Kandungan unsur-unsur kimia dalam material LRA perlu diketahui untuk menentukan kondisi yang diperlukan agar reaksi pembakaran dapat berlangsung sempurna. Unsur-unsur kimia yang terkandung dalam material limbah berikatan membentuk senyawa-senyawa tertentu dengan rumus molekul yang tertentu. Material umumnya, seperti kertas, sebagian besar terbentuk dari senyawa selulosa dengan rumus kimia C₆H₁₀O₅ dan plastik pada umumnya berupa *butadiene styrene*.

Senyawa-senyawa pembentuk material limbah pada temperatur tertentu mengalami penguraian menjadi gas, zat cair atau zat padat, baik yang mudah terbakar atau yang tidak mudah terbakar. Kandungan unsur-unsur kimia material limbah dapat diketahui melalui beberapa cara, yaitu dengan analisis kualitatif dan kuantitatif di laboratorium kimia. Melalui cara ini diperoleh hasil yang akurat. Material limbah berupa kertas, plastik dan karet mengandung unsur-unsur seperti C, H, O, N, S dan abu dengan persentase seperti terlihat pada Tabel 1 (5-9).

Agar material limbah dapat terurai diperlukan temperatur tertentu yang disebut titik nyala. Titik nyala suatu zat bervariasi bergantung pada metode pemanasan, laju pemanasan, penyediaan udara dan lainnya. Untuk mencapai titik nyala diperlukan sejumlah panas sebagai energi awal yang diberikan dari luar. Sumber energi awal prototipe tungku pembakar limbah radioaktif HK-2010 diperoleh dari *3burner* dengan bahan bakar gas LPG. Titik nyala material kertas, plastik dan karet (9,10) diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Kandungan unsur-unsur dalam material limbah

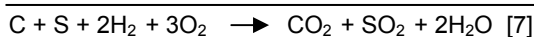
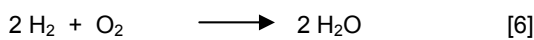
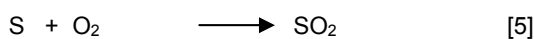
Komponen limbah	Kandungan unsur-unsur dalam prosen berat					Abu
	C	H	O	N	S	
Kertas	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Plastik	60,0	7,2	22,0	-	-	10,2
Karet	77,7	19,4	-	-	2,0	9,9

Tabel 2. Titik nyala material kertas, plastik dan karet

Komponen limbah	Titik nyala (°C)
Kertas	180 - 430
Plastik	140 - 640
Karet	150 - 500

1.1.3. Kebutuhan udara untuk pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi oksidasi, sehingga supaya proses pembakaran dapat berlangsung (terjadi reaksi) dibutuhkan udara sebagai sumber oksigen. Udara diperlukan sebagai pengatur temperatur selama pembakaran dan untuk menciptakan turbulensi di dalam ruang bakar. Jumlah udara total yang dibutuhkan untuk proses pembakaran material limbah dihitung berdasarkan reaksi oksidasi senyawa-senyawa dasar material limbah. Adapun reaksi oksidasi (11-13) dinyatakan melalui persamaan [4-7].



Dengan mengetahui jumlah massa atau volume oksigen yang diperlukan dalam proses pembakaran dapat dihitung jumlah massa atau volume udara yang dibutuhkan.

1.1.4. Perpindahan panas dalam ruang silinder

Prototipe tungku pembakar limbah radioaktif HK-2010 berbentuk silinder sehingga mekanisme proses perpindahan panasnya mengacu pada suatu ruang berbentuk silinder dengan ketebalan dinding tertentu, seperti terlihat pada Gambar 2.

Jika temperatur maksimum atau sumber panas berada di pusat silinder maka laju perpindahan panas (q) dari tengah ke luar silinder dinyatakan dalam persamaan [8] (14,15).

$$q = U_o A_o (T_{maks} - T_{\infty}) \quad [8]$$

dengan

$$A_o = 2 \pi r_o L, \text{ luas permukaan perpindahan panas (m}^2\text{)}$$

$$r_o = \text{jari-jari luar (m)}$$

$$r_i = \text{jari-jari dalam (m)}$$

$$h = \text{koefisien perpindahan panas konveksi (W/m}^2 \text{K)}$$

$$h_r = \text{koefisien perpindahan panas radiasi (W/m}^2 \text{K)}$$

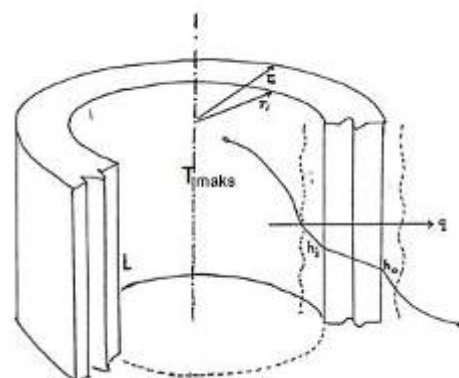
$$k = \text{koefisien perpindahan panas konduksi (W/m K)}$$

Koefisien perpindahan panas keseluruhan (U_o) dirumuskan melalui persamaan [9].

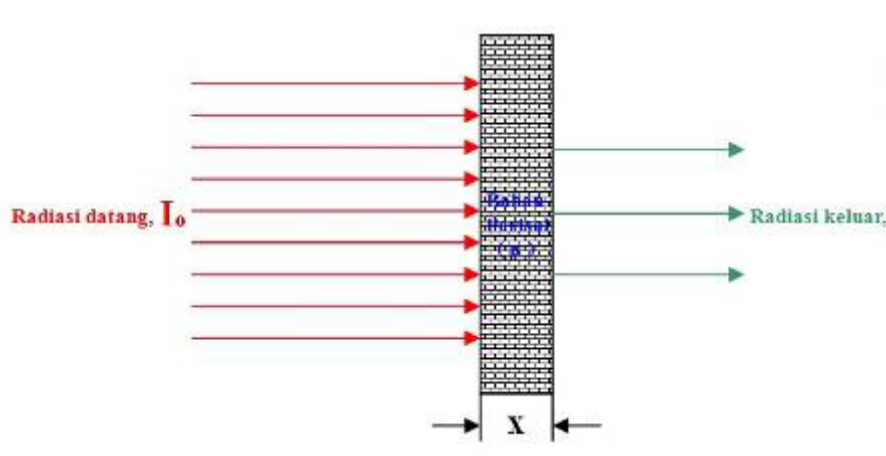
$$U_o = \frac{1}{r_o / r_i h_i + [r_o \ln(r_o / r_i)] / k + 1 / h_o + 1 / h} \quad [9]$$

1.1.5. Peredaman paparan radiasi oleh bahan perisai

Paparan radiasi dapat dikendalikan melalui 3 cara, yaitu: jarak dari sumber, waktu dan perisai. Pada kasus-kasus tertentu, sering kali faktor jarak dan waktu tidak memungkinkan untuk dikendalikan, sehingga penggunaan perisai radiasi (*shielding*) sangat diperlukan. Perisai radiasi berfungsi untuk memperlemah atau mengurangi intensitas radiasi (Gambar 3).



Gambar 2. Perpindahan panas dalam ruang berbentuk silinder.



Gambar 3. Intensitas radiasi yang melalui bahan perisai.

Bila intensitas radiasi mula-mula yang datang pada permukaan bahan perisai adalah I_0 , maka intensitas radiasi setelah melalui bahan perisai dengan tebal x dapat dinyatakan dengan persamaan [10] dan [11].

$$I = B I_0 \exp(-\mu X) \quad [10]$$

atau dalam bentuk dosis serap,

$$D = D_0 \exp(-\mu X) \quad [11]$$

dengan,

B = faktor *buildup*

μ = kemungkinan terjadinya interaksi, dikenal sebagai koefisien atenuasi linier (cm^{-1})

Jadi kemampuan suatu bahan perisai dalam meredam radiasi dapat dinyatakan dengan koefisien atenuasi (μ) dengan satuan cm^{-1} . Pada beberapa macam bahan, seperti air, udara, besi, timah hitam, tembok (beton), atenuasi radiasi dinyatakan dengan koefisien atenuasi massa (μ/ρ) yaitu hasil bagi koefisien atenuasi linier dengan massa jenis bahan.

2. TATA KERJA

Metode yang digunakan di dalam penelitian ini adalah eksperimental, yaitu dengan melakukan pengukuran distribusi

temperatur tungku pada saat pembakaran limbah, pengujian kemampuan untuk mereduksi limbah dan pengujian kemampuan untuk mereduksi paparan radiasi pengion.

2.1. Pengukuran Distribusi Temperatur Tungku

Pengukuran distribusi temperatur dilakukan dengan cara memasang beberapa termokopel secara vertikal maupun horizontal pada dinding bata primer dan sekunder, seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pemasangan termokopel di dinding bata primer dan sekunder.

Data temperatur dinding dicatat secara kontinu dalam data logger. Hasil pengukuran temperatur dinding kemudian

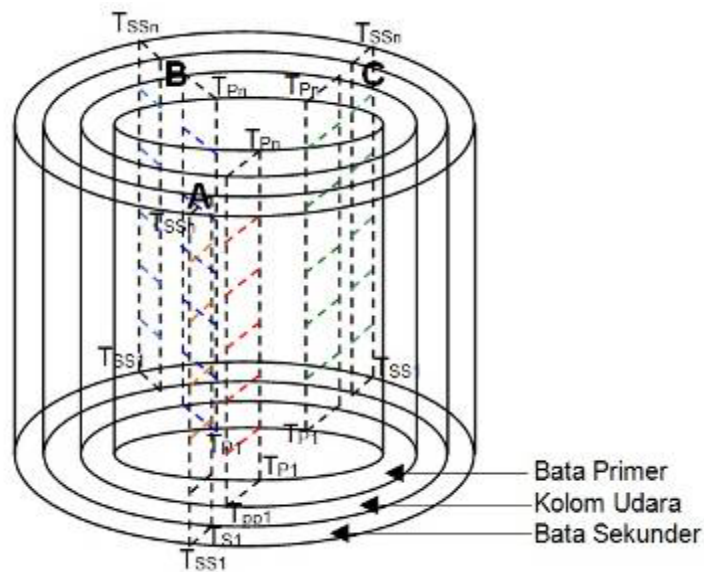
digunakan sebagai masukan untuk menghitung temperatur ruang bakar. Adapun letak titik-titik pengukuran temperatur dinding bata dapat dilihat pada Gambar 5. Titik A_p merupakan titik bagian dalam bata primer dan titik A_{pp} merupakan titik bagian luar bata primer. Titik A_s merupakan titik bagian dalam bata sekunder dan titik A_{ss} merupakan titik bagian luar bata sekunder. Sedang angka 1,2,3, dst merupakan urutan titik pengukuran dari bawah ke atas. Demikian pula titik B dan C yang merupakan titik pengukuran di dinding bata pada sisi bagian lain (Gambar 5). Selain pengukuran temperatur dinding, pada eksperimen ini dilakukan pula pengukuran berat dan volume limbah sebelum dan sesudah pembakaran untuk mengetahui kemampuan reduksi berat dan volume limbah.

Penentuan distribusi temperatur pada dinding tungku dilakukan dengan cara menyambungkan termokopel yang telah

terpasang di dinding bata ruang bakar daerah A ke data logger. Selanjutnya, data logger dinyalakan untuk mencatat dan menyimpan data temperatur dinding bata secara kontinu setiap 3 menit sebelum tungku dinyalakan. Sistem pengolah gas buang dan *blower* dioperasikan, kemudian tungku dinyalakan melalui tiga *burner* sampai api berwarna biru, seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kondisi ruang bakar sebelum limbah dimasukkan.



Gambar 5. Letak titik-titik pengukuran di dinding primer dan sekunder prototipe tungku.

Tungku dipanaskan sampai kurang lebih 30 menit agar terjadi keseimbangan temperatur di dalam ruang bakar. Sebanyak 20 kg LRA dimasukkan secara bertahap (per 5 kg) ke ruang bakar dalam keadaan *burner* tetap menyala.

Data logger yang digunakan hanya mampu untuk mencatat 12 data temperatur pada termokopel (12 kanal). Oleh karena itu pengukuran temperatur dinding ruang bakar di daerah A, B dan C dilakukan secara bergantian dengan jumlah dan jenis LRA yang dibakar sama, serta hanya dipilih 12 titik yang mewakili temperatur dinding dalam, dinding luar dari bata primer dan bata sekunder (titik 2,3,4 dinding dalam dan luar bata primer serta titik 2,3,4 dinding dalam dan luar bata sekunder).

Setelah temperatur dinding ruang bakar di daerah A, B, dan C diukur, data yang diperoleh diolah untuk mengetahui distribusi temperatur dinding ruang bakar.

2.2. Pengujian Kemampuan Tungku Mereduksi Limbah

Faktor reduksi merupakan perbandingan volume limbah setelah

dibakar dengan volume limbah sebelum dibakar, atau perbandingan berat setelah dibakar dengan sebelum dibakar. Oleh karena itu dalam pengujian ini limbah diukur volume dan beratnya sebelum dibakar, kemudian volume dan berat sisa abu hasil pembakaran diukur kembali.

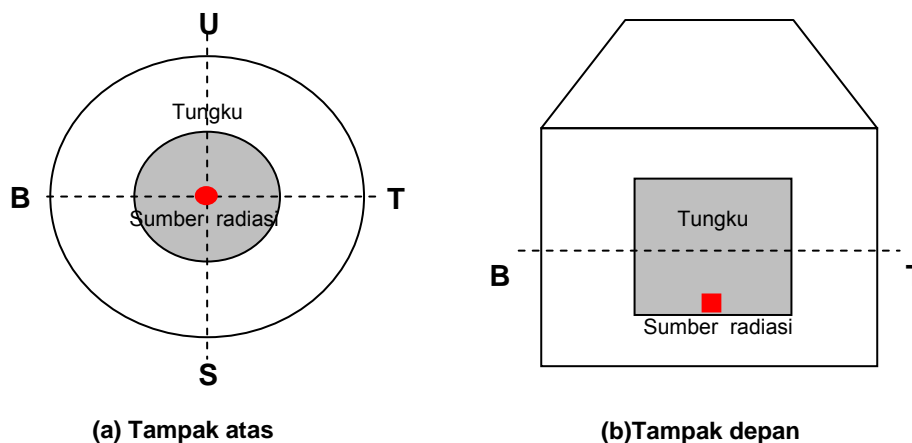
2.3. Pengujian Kemampuan Dinding Bata Mereduksi Paparan Radiasi Pencion

Kemampuan dinding bata dalam mereduksi paparan radiasi pencion diuji dengan meletakkan sumber radiasi berupa ^{134}Cs dengan laju paparan sebesar 1000 $\mu\text{Sv/h}$ pada posisi tepat di tengah ruang bakar (Gambar 7). Laju paparan radiasi diukur pada dinding luar ruang bakar tungku.

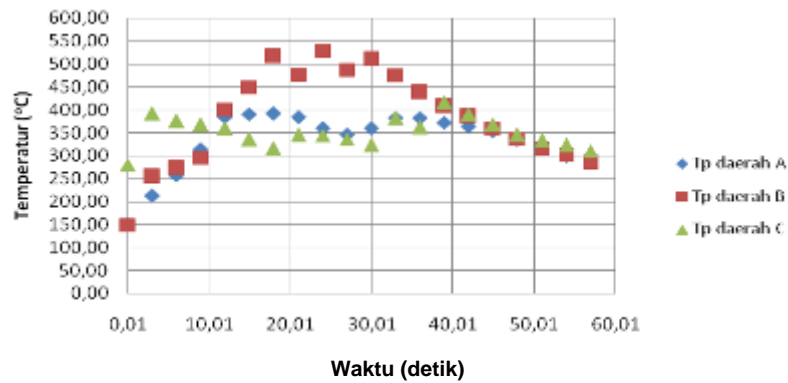
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengukuran Distribusi Temperatur Tungku

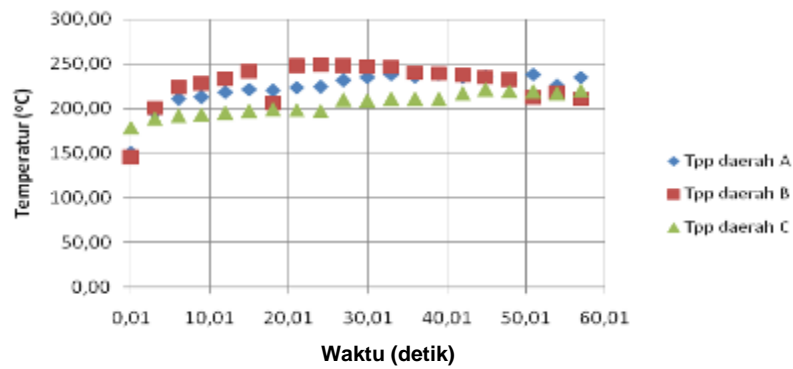
Hasil pengukuran temperatur dinding primer dan sekunder ruang bakar pada daerah A, B, dan C diplotkan sebagai fungsi waktu seperti diperlihatkan pada Gambar 8 - 10.



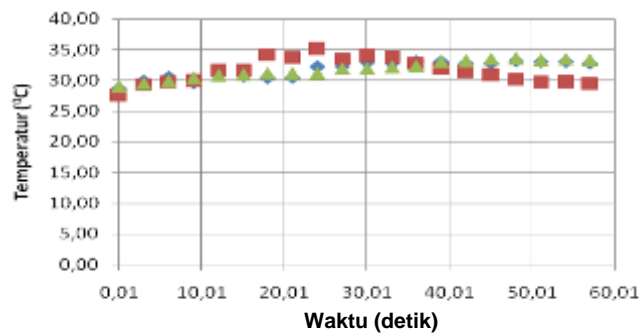
Gambar 7. Letak titik-titik pengukuran.



Gambar 8. Temperatur dinding primer dalam vs waktu.



Gambar 9. Temperatur dinding primer luar vs waktu.



Gambar 10. Temperatur dinding sekunder dalam vs waktu.

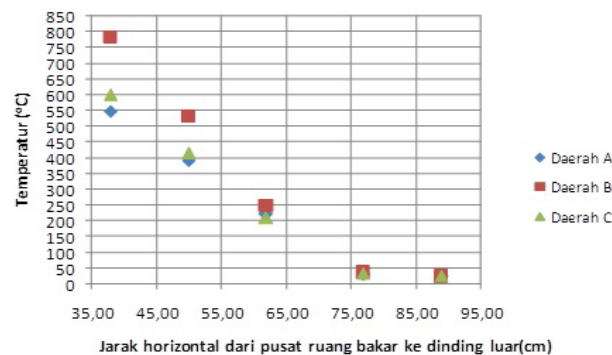
Dari Gambar 8 terlihat bahwa temperatur tertinggi dinding primer dalam yang dicapai di daerah A, B dan C tidak bersamaan waktunya, yaitu masing-masing 18 menit, 24 menit dan 39 menit setelah pembakaran. Demikian pula hasil pengukuran temperatur dinding primer luar dan temperatur dinding sekunder dalam (Gambar 9 dan 10). Terlihat bahwa

temperatur tertinggi dinding primer luar dan dinding sekunder dalam dicapai pada waktu tidak bersamaan. Hal ini membuktikan bahwa pembakaran di setiap titik sangat bergantung pada jenis material limbah yang dibakar, titik nyala limbah yang dibakar dan oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran, seperti yang telah diuraikan di Sub Bab 2.2 dan 2.3. Pada Gambar 8, terlihat bahwa di

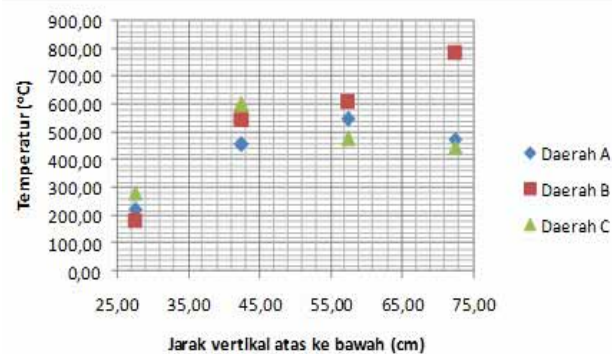
daerah B terjadi kenaikan temperatur dinding primer yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah A dan C, karena titik nyala limbah di daerah B lebih cepat dan limbah mudah terbakar. Apabila masing-masing material limbah mengandung unsur-unsur kimia yang berbeda maka kecepatan dan banyaknya limbah yang terbakar serta temperatur yang dicapainya juga akan berbeda. Untuk jumlah oksigen yang sama, plastik akan lebih cepat terbakar dan temperturnya lebih tinggi dibandingkan karet maupun kertas, karena plastik mempunyai *range* temperatur nyala yang paling lebar, yaitu dari (140 – 640) °C, sehingga akan lebih cepat terbakar dan temperatur pembakarannya bisa lebih tinggi. Demikian juga karet yang mempunyai *range*

temperatur nyala (150 – 500) °C, akan lebih cepat dan lebih tinggi temperturnya dibandingkan kertas yang mempunyai *range* temperatur nyala lebih rendah (180 – 430) °C. Jadi dapat diambil kesimpulan bahwa pada daerah A, B dan C limbah yang terbakar tidak sama jenis dan jumlahnya, karena sangat tergantung pada homogenitas limbah yang dimasukkan ke ruang bakar, sehingga menyebabkan temperatur tertinggi dinding yang dicapai antara daerah A, B dan C tidak sama.

Berdasarkan hasil pengukuran temperatur dinding kemudian dilakukan perhitungan temperatur ruang bakar melalui persamaan perpindahan panas [9] dan hasilnya dapat dilihat pada kurva di Gambar 11 dan 12.



Gambar 11. Temperatur horizontal ruang bakar vs jarak.



Gambar 12. Temperatur vertikal ruang bakar vs jarak.

Gambar 11 memperlihatkan distribusi temperatur arah horizontal dari pusat ruang bakar ke dinding luar dengan temperatur maksimum sebesar 783,34 °C pada bagian tengah ruang bakar, kemudian menurun ke arah dinding luar. Fenomena ini menunjukkan bahwa limbah yang terbakar berada di tengah, sehingga kalor tertinggi yang dihasilkan dari pembakaran akan berada di tengah dan mengakibatkan temperatur tertinggi ruang bakar juga berada di tengah.

Temperatur tertinggi untuk daerah A, B dan C berbeda-beda, dengan urutan daerah B merupakan daerah yang mencapai temperatur tertinggi, diikuti daerah C dan A. Temperatur yang tidak homogen dapat disebabkan oleh perbedaan jumlah dan jenis limbah yang terbakar; perbedaan banyaknya oksigen untuk pembakaran; kurangnya turbulensi dalam ruang bakar; serta pelaksanaan percobaan yang tidak serentak pada daerah A, B dan C.

Daerah B merupakan daerah dengan jumlah limbah terbakar paling banyak, kebutuhan oksigen paling terpenuhi, yang berarti turbulensinya paling bagus dan banyak jenis limbah yang mempunyai titik nyala yang lebar, seperti bahan anorganik.

Pada Gambar 12 terlihat bahwa temperatur ruang bakar arah vertikal makin ke bawah makin tinggi. Temperatur maksimum terjadi pada ruang bakar bagian

bawah (± 70 cm dari atas) untuk pengukuran di daerah B, sedangkan hasil pengukuran di daerah A dan C, menunjukkan temperatur maksimum dicapai pada bagian tengah (± 60 cm dari atas). Hasil pengukuran di daerah A dan C mempunyai kecenderungan yang sama, sedang daerah B berbeda.

3.2. Hasil Pengujian Kemampuan Mereduksi Limbah

Hasil pengukuran volume dan berat limbah sebelum dan sesudah dibakar dapat dilihat pada Tabel 3. Sisa pembakaran adalah sisa berat atau sisa volume sesudah dibakar dibagi dengan berat atau volume sebelum dibakar.

Pada Tabel 3 terlihat bahwa tungku pembakar mampu untuk mereduksi limbah sampai menjadi antara 0,08 – 0,1. Ini berarti dengan pembakaran menggunakan tungku tersebut jumlah limbah bisa berkurang sekitar 90 - 92 %.

Semakin besar jumlah limbah yang terbakar semakin besar pula limbah yang tereduksi. Apabila limbah yang terbakar jumlahnya besar maka panas yang dihasilkan juga besar, artinya temperatur yang dihasilkan akan tinggi dan mudah mencapai titik nyala, sehingga memudahkan proses pembakaran selanjutnya, akibatnya limbah yang tereduksi menjadi besar. Hasil unjuk kerja tungku dapat dilihat pada Gambar 13.

Tabel 3. Hasil uji coba reduksi limbah

Percobaan ke	Limbah sebelum dibakar		Limbah setelah dibakar		Faktor Reduksi	
	(kg)	(cm ³)	(kg)	(cm ³)	Untuk berat	Untuk Volume
1	6	98125	0,6	10794	0,1	0,11
2	15	235500	1,2	19311	0,08	0,082
3	26	502400	2,2	40152	0,079	0,080



Gambar 13. Ruang bakar saat operasi dan abu hasil pembakaran.

Tabel 4. Hasil pengukuran paparan radiasi pengion

Posisi Pengukuran	Sumber Radiasi	Posisi Utara	Posisi Selatan	Posisi Barat	Posisi Timur
Dinding ruang bakar	C ₁₃₄ (1000 μSv/h)	2,47 μSv/h (0,247 %)	2,36 μSv/h (0,236 %)	2,53 μSv/h (0,253 %)	2,61 μSv/h (0,261 %)

3.3. Hasil Pengujian Kemampuan Dinding Bata Mereduksi Paparan Radiasi Pengion

Hasil pengukuran aktivitas radiasi pengion di dinding luar ruang bakar tungku, diperlihatkan pada Tabel 4. Dari Tabel 4 terlihat bahwa paparan radiasi setelah melewati dinding bata primer maupun sekunder, dapat direduksi hingga mencapai rata-rata 0,249 %. Jika digunakan persamaan [10, 11], yaitu $D = B D_0 \exp(-\mu x)$, maka untuk $B = 1$ dan tebal bata 24 cm akan diperoleh koefisien atenuasi rata-ratanya adalah $\mu = \ln(2,49/1000)/24 \text{ cm}^{-1} = 0,24 \text{ cm}^{-1}$. Hal ini bisa dianggap cukup memadai untuk meredam radiasi limbah radioaktif rendah yang boleh dibakar dalam tungku.

4. KESIMPULAN

Dari hasil uji coba yang telah dilakukan, diperoleh bahwa temperatur ruang bakar prototipe tungku pembakar limbah radioaktif dapat mencapai 783,34 °C dan dapat mengurangi jumlah limbah antara

90 – 92 %, serta mempunyai kemampuan mereduksi radiasi pengionnya hingga menjadi rata-rata 0,249 %.

Untuk meyakinkan hasil unjuk kerja prototipe pembakar limbah radioaktif yang telah dibuat perlu dilakukan beberapa kali operasi pembakaran. Walaupun prototipe tungku ini telah dibuat dan telah sesuai rancangan, tetapi gas buang yang dihasilkan belum sempurna pengolahannya. Oleh karena itu di tahap berikutnya perlu dilakukan penyempurnaan sistem pengolah gas buang agar lebih ramah lingkungan, terutama jika digunakan untuk pembakaran plastik atau zat anorganik lainnya

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada para personil group Incinerator dan keselamatan kerja yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. United States Nuclear Regulatory Commission. Radioactive waste:

- production, storage disposal.
NUREG/BR-0216 Rev. 2: May 2002.
U.S. Nuclear Regulatory Commission;
2002.
2. Robert CB. Thermochemical processing of biomass conversion into fuels chemicals and power. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 2011.
 3. Incinerators for hospital, animal and industrial waste. ATI Incinerators Muller. [Online]. [diunduh 16 Desember 2010]; Available from: <http://www.incinerators-ati.com>.
 4. Incinerators operation incinco. [Online]. [diunduh 16 Desember 2010]; Available from: <http://www.Incinco.com/index.pbp>.
 5. Incinerator umum alat pengolahan limbah maxpell technology, solusi alternatif penanganan limbah. [Online]. [diunduh 29 Oktober 2009]; Available from: <http://www.maxpelltechnology.com>
 6. Thermo Q: solid and waste incinerator IC series. [Online]. [diunduh 23 November 2009]; Available from: <http://www.metalindoengineering.com>.
 7. Teknologi pengolahan limbah gas. [Online]. [diunduh 16 Desember 2010]; Available from: <http://majamagazine.com>.
 8. Kurdi MY. Pengelolaan limbah dengan pembakaran (Incinerator Mini). [Online]. [diunduh 29 Oktober 2009]; Available from; <http://docs.google.com/www.diskimrum.jabarprov.go.id>.
 9. Corey RC. Principles and practices of incineration. New York: John Willey & Son Inc; 1969.
 10. Incinerators: animal, medical and waste incineration R8 international. [Online]. [diunduh 23 November 2009]; Available from: <http://www.incinerator8.com>.
 11. Crocker M. Thermochemical conversion of biomass to liquid fuels and chemicals. Cambridge: Royal Society of Chemistry; 2010.
 12. Lubis R. Mengatasi limbah tanpa masalah. Majalah Pengusaha – Peluang Usaha dan Solusinya 23 September 2008.
 13. Sunardi. Incinerator solusi untuk menyelesaikan masalah limbah. Komunikasi melalui e-mail. Posted by: Migas Indonesia; 14 Juni 2004.
 14. Gultom O. Pengelolaan limbah padat perkotaan secara terpadu. Buletin Limbah 2000;5(1).

