

ESTIMASI RADIOLOGIK KEGIATAN RECYCLE LIMBAH RADIOAKTIF DENGAN PERANGKAT LUNAK RESRAD-RECYCLE

Moekhamad Alfiyan¹⁾, Yus Rusdian Akhmad²⁾

1) Staf Bidang Pengkajian Industri dan Penelitian, BAPETEN
Jl. Gajah Mada 8 Jakarta, e-mail: m.alfiyan@bapeten.go.id

2) Kepala Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan FRZR-BAPETEN
Jl. Gajah Mada 8 Jakarta

Abstrak

Perkembangan pemanfaatan tenaga nuklir akan berimbas pada peningkatan limbah radioaktif yang harus dikelola. Mekanisme klierens merupakan suatu upaya untuk mewujudkan konsep reuse, recycle dan recovery yang berakhir pada berkurangnya obyek pengawasan limbah radioaktif. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mengetahui efek radiologis dari kegiatan recycle material baja terkontaminasi Co-60, Cs-137 dan Sr-90 dengan perangkat lunak RESRAD-RECYCLE. Metode penulisan makalah melalui review terhadap literatur terkait, simulasi RESRAD-RECYCLE code dan analisis terhadap hasil keluaran simulasi. Pada kegiatan recycle baja akan dihasilkan produk samping partikulat, baghouse dan slag sebanyak $3 \cdot 10^{-5}$ ton ($6 \cdot 10^3$ Bq), 1 ton ($2 \cdot 10^8$ Bq), dan 1 ton ($3,03 \cdot 10^8$ Bq). Terdapat lima skenario paparan yang tidak dapat memenuhi kriteria yaitu: tool reuse, home furniture, automobile, office furniture dan coil handler sehingga diperlukan modifikasi pada parameter input RESRAD-RECYCLE dengan menambahkan shielding berjenis copper setebal 9,5 cm, 8,9 cm, 8,5 cm dan 8,9 cm untuk tool reuse, home furniture, automobile, office furniture dan shielding lead setebal 2 cm untuk coil handler. Dapat disimpulkan bahwa perangkat lunak RESRAD-RECYCLE dapat digunakan sebagai alat bantu dalam pengambilan keputusan suatu kegiatan recycle baja yang mengandung zat radioaktif.

Kata kunci: recycle, RESRAD-RECYCLE, skenario paparan

PENDAHULUAN

Limbah radioaktif merupakan aspek penting dalam pemanfaatan tenaga nuklir, yang senantiasa mendapat perhatian nasional dan internasional dalam kaitannya dengan upaya mendapatkan solusi yang tepat dalam hal pengelolaan dari hulu sampai hilir atau bahkan mengeliminasi terjadinya untuk mewujudkan tenaga nuklir sebagai teknologi yang berwawasan lingkungan.

Berdasarkan asalnya, limbah radioaktif dihasilkan dari pengoperasian instalasi nuklir, namun perkembangan pemanfaatan tenaga nuklir telah menciptakan sumber limbah lain, misalnya sektor industri dan kesehatan. Perkembangan terkini menunjukkan bahwa limbah radioaktif juga dihasilkan oleh kegiatan yang tidak memanfaatkan tenaga nuklir namun menghasilkan limbah dengan karakteristik radioaktif, yang disebut dengan TENORM.

Untuk mengantisipasi terjadinya beban limbah terhadap generasi masa kini dan yang akan datang, maka upaya konkrit terus dirumuskan dengan penekanan pada upaya meminimalisasi limbah sebagaimana disebutkan dalam PP No. 27 tahun 2002 tentang pengelolaan limbah radioaktif yang mewajibkan kepada penghasil limbah untuk meminimalisasi limbah radioaktifnya. Minimalisasi limbah bukanlah merupakan solusi yang tuntas, karena timbulan limbah radioaktif tetap berlanjut dan tidak ada limitasi yang jelas terhadap batas limbah yang

diperkenankan terhadap penghasil limbah radioaktif.

Perkembangan pengelolaan limbah telah mengalami kemajuan dengan mendekati suatu kegiatan terhadap teknologi bersih. Konsep tersebut mengarah pada usaha tanpa limbah dengan menerapkan prinsip *reuse*, *recycle* dan *recovery*. Begitu pula dibidang tenaga nuklir, IAEA telah merekomendasikan kepada negara anggota untuk menerapkan konsep tersebut dalam mengelola limbah radioaktifnya. Penerapan konsep tersebut tidak seelaluasa bidang non nuklir, karakteristik radioaktif yang mempunyai waktu paro merupakan alasan teknik yang tepat untuk mempertimbangkannya.

Operasionalisasi konsep teknologi bersih di bidang tenaga nuklir akan dicapai apabila disandingkan dengan konsep klierens bersyarat, yaitu pembebasan zat radioaktif, material terkontaminasi atau limbah radioaktif dari pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir, atas pertimbangan tidak memberikan resiko radiologik yang signifikan sehingga dapat diperlakukan sebagai limbah non radioaktif untuk dikelola dengan pilihan teknologi yang sesuai.

Makalah ini akan mensimulasikan material terkontaminasi zat radioaktif dengan perangkat lunak RESRAD-RECYCLE untuk mengetahui dampak radiologik yang ditimbulkan terhadap pekerja dan masyarakat selama kegiatan recycle dan pemanfaatan

produk dari recycle. Keluaran dari makalah ini diharapkan dapat digunakan sebagai pertimbangan pemanfaatan perangkat lunak RESRAD-RECYCLE dalam praktek recycle limbah radioaktif yang merupakan usaha nyata untuk meminimalisasi volumelimbah radioaktif di Indonesia.

Konsep Reuse dan Recycle

Konsep pengelolaan limbah telah mengalami beberapa kali perubahan ke arah sistem yang lebih terpadu. Konsep teknologi bersih merupakan konsep modern yang dicanangkan menuju pembangunan berkelanjutan dan berwawasan lingkungan. Implementasi dari konsep tersebut melalui perhatian secara menyeluruh terhadap fase-fase produksi, yaitu seleksi bahan baku, rekayasa proses dan penanganan hasil samping atau limbah melalui *reuse* (penggunaan ulang), *recycle* (daur ulang) dan *recovery* (pengambilan kembali).

Implementasi konsep *reuse* dan *recycle* telah direkomendasikan oleh IAEA untuk zat radioaktif dan material terkontaminasi sedangkan implementasi *recovery* meskipun tidak direkomendasikan secara eksplisit tetapi penggunaannya telah berjalan, yaitu daur ulang bahan bakar bekas nuklir untuk mengambil bahan fisil dengan tujuan untuk dimanfaatkan kembali atau penempatan akhir. Sedangkan terhadap zat radioaktif atau material terkontaminasi kurang begitu diharapkan berdasarkan tinjauan ekonomi dan teknologi karena karakteristik meluruh dari zat radioaktif.

Reuse dan *recycle* dilakukan terhadap sumber radioaktif bekas oleh pengguna yang sama atau berbeda untuk tujuan pemanfaatan yang sama atau berbeda. *Reuse* juga dapat diterapkan terhadap material terkontaminasi setelah mendapatkan penetapan klierens dari Badan Pengawas dengan catatan penghasil limbah yakin bahwa pemanfaatan limbahnya mampu memenuhi kriteria klierens.

Dengan demikian konsep *reuse* dan *recycle* merupakan opsi pengganti penyimpanan akhir dan sebagai upaya mengurangi produksi dan distribusi zat radioaktif (optimalisasi zat radioaktif) dan pada akhirnya mengurangi obyek pengawasan serta meningkatkan nilai guna dan ekonomi sumber dan limbah radioaktif tersebut.

Recycle Baja

Bahan baku terbanyak dari logam besi yang digunakan dalam produksi baja dan besi tuang adalah besi cor, *direct reduced iron* (DRI) dan scrap. Besi cor dihasilkan melalui

pembakaran biji besi yang mengandung scrap dan DRI dengan kadar rendah. Bahan baku untuk memproduksi baja dilebur dalam *electric arc furnace* (EAF) dengan seperempat dari volume tungku pembakaran (*furnace*) diisi oleh scrap besi dengan besi cor. Besi tuang dan baja dihasilkan dalam EAF, tungku induksi dan cupola dengan muatan terbesar dari tungku terisi oleh scrap.

Terdapat tiga jenis scrap metal yang digunakan dalam industri baja, yaitu *home*, *new* dan *old*. *Home scrap* terdiri dari logam yang tidak terpakai pada saat pemrosesan atau fabrikasi baja menjadi bahan setengah jadi. Sebagian besar *home scrap* dihasilkan pada saat penggilingan dan penuangan baja yang dapat dianggap sebagai limbah. *New scrap* dihasilkan selama perakitan produk akhir. *New scrap* merupakan logam bernilai tinggi dengan sedikit pengotor. *Old scrap* mencakup produk gagal, bekas, usang. *Old scrap* umumnya berkualitas rendah dan mempunyai komposisi kimia yang buruk. *Scrap* akan direcycle masuk dalam kategori *old scrap*.

Produk samping lain yang dihasilkan selama recycle baja adalah kerak, yang dihasilkan pada waktu *hot rolling* dari baja. Kerak terdiri dari campuran oksida besi sehingga berkadar besi tinggi (55%). Jumlah kerak dapat mencapai 1% dari produk baja pada saat penggilingan baja, namun pada umumnya jumlah kerak pada rentang 0,5%-0,75%. Kerak tersebut harus dihilangkan dari produk akhir baja karena akan mempengaruhi karakteristik dari baja karena berkadar besi tinggi. Namun demikian, kerak merupakan suatu komoditi yang dapat dimanfaatkan.

Selama recycle baja diperlukan sebuah analisis terhadap hasil samping berbentuk residu dari *scrap metal* untuk menentukan konsentrasi radionuklida pada setiap tahap pembakaran. Apabila semua zat radioaktif yang terkandung dalam scrap metal mempunyai sifat kimia sama maka ikutan radioaktif dapat ditentukan dari isotop stabil unsur yang sama atau unsur lain yang datanya tersedia. Faktor ikutan (partisi) didefinisikan sebagai rasio antara jumlah total unsur atau senyawa dalam produk pembakaran dengan jumlah total scrap metal⁽¹⁾.

Exemption dan Klierens

Exemption merupakan suatu proses untuk menetapkan suatu pemanfaatan masuk dalam pengawan atau tidak, sedangkan klierens mengarah pada obyek pengawasan yang akan dibebaskan dari pengawasan. *Exemption* terhadap suatu pemanfaatan

dapat diterima oleh badan pengawas jika badan pengawas yakin bahwa pemanfaatan dapat memenuhi prinsip-prinsip dan kriteria exemption, yaitu: dosis efektif yang ditimbulkan terhadap masyarakat bernilai kurang dari atau sama dengan 10 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ dan dosis efektif kolektif bernilai kurang dari atau sama dengan 1 man-Sv/tahun. Klierens harus memperhitungkan kriteria exemption dan tidak lebih tinggi dari nilai exemption.

Kriteria radiologi pertama dalam menetapkan nilai exemption dan klierens dari material berukuran besar (*bulk*) adalah dosis efektif harus pada tingkat 10 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ atau lebih kecil. Untuk memperhitungkan suatu kejadian yang kemungkinan terjadinya kecil tetapi apabila terjadi dapat menimbulkan paparan yang tinggi maka diperlukan kriteria tambahan yaitu dosis efektif yang ditimbulkan oleh peristiwa tersebut tidak lebih dari 1 mSv/tahun. Kriteria yang kedua dalam menetapkan nilai exemption dan klierens dari materia berukuran besar (*bulk*) adalah dosis efektif kolektif yang bernilai kurang dari atau sama dengan 1 man-Sv/tahun⁽²⁾.

Perangkat Lunak Resrad-Recycle

RESRAD- RECYCLE merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk memperkirakan resiko radiologik yang diterima oleh individu selama kegiatan recycle material terkontaminasi. Keluaran dari RESRAD-RECYCLE adalah dosis efektif individu, dosis kolektif dan dosis kumulatif. Skenario paparan terhadap individu melalui jalur inhalasi, injeksi dan radiasi eksternal. Kegiatan recycle dirancang dengan tahapan seperti dalam gambar 1

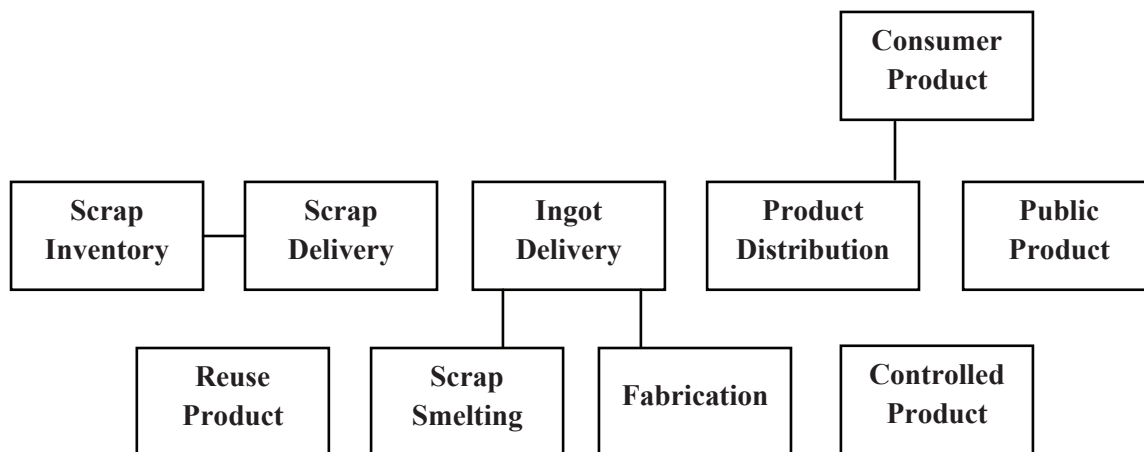
Keterangan terhadap menu input di atas, antara lain: scrap inventory untuk input material yang akan direcycle (opsi material

yang direcycle hanya berbahan baja atau aluminium), produk reuse (parameter input: tool dan build), scrap delivery (dengan parameter input cutter, loader, driver dan publik dose), scrap smelting (processor parameter, worker, loader, operator, baghouse, refinery, ingot, obyek, dan slag parameter), ingot delivery (loader dan driver parameter), fabrikasi (initial dan final fabrication), product distribution (loader, drver, sheet, dan werehouse parameter), controlled product (shielding block parameter dan container parameter), consumer product dan public product.

RESRAD-RECYCLE memberikan keleluasaan kepada pengguna untuk menetapkan skenario recycle sesuai dengan kebutuhan, tidak semua tahapan recycle wajib dipijih. RESRAD-RECYCLE juga membantu dalam merencanakan suatu kegiatan recycle sedemikian rupa sehingga produk akhir, dosis pekerja dan masyarakat dapat memenuhi kriteria.

METODE PENELITIAN

RESRAD- RECYCLE merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk memperkirakan resiko radiolPenyusunan makalah dilaksanakan melalui rangkaian tahapan berikut: pengumpulan dan pemahaman literature yang berupa rekomendasi internasional dan peraturan perundang-undangan nasional terkait. Selanjutnya dilakukan simulasi perangkat lunak RESRAD-RECYCLE dan menganalisis terhadap keluaran hasil simulasi RESRAD-RECYCLE code untuk mengetahui dampak radiologis suatu kegiatan recycle terhadap pekerja, masyarakat dan konsumen pengguna produk akhir.



Gambar 1. Diagram Alir Menu Input RESRAD-RECYCLE

HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan simulasi RESRAD-RECYCLE untuk memperkirakan dosis efektif individu dan dosis efektif kolektif pada setiap tahapan recycle material terkontaminasi zat radioaktif, termasuk efek radiologis terhadap pengguna produk hasil recycle. Pada simulasi diambil beberapa pendekatan yang mengarah pada nilai yang konservatif namun realistis dengan praktek untuk menghindari kesalahan perkiraan melebihi kondisi terantisipasi.

Pada simulasi, jenis material yang direcycle adalah baja sebanyak 100 ton, atas pertimbangan bahwa baja banyak banyak digunakan di instalasi nuklir atau bidang industri dan medic, material ini cukup mahal, sehingga sangat disayangkan apabila tidak dimanfaatkan, padahal material ini mempunyai potensi untuk dimanfaatkan kembali. Baja dianggap terkontaminasi zat radioaktif Cs-137, Sr-90 dan Co-60, mengingat Cs-137 dan Sr-90 merupakan produk fisi sehingga sangat mungkin material dari fasilitas nuklir akan terkontaminasi zat radioaktif tersebut. Sedangkan Co-60 meskipun bukan produk fisi, namun penggunaan zat radioaktif ini sangat tinggi, baik pada bidang penelitian, industri dan medik. Diasumsikan material terkontaminasi zat radioaktif Co-60 dengan konsentrasi 3 Bq/gram, Cs-137 3 Bq/ gram dan Sr-90 3 Bq/gram yang merupakan nilai diatas tingkat klierens sehingga opsi klierens bersyarat dapat menjadi tawaran.

Skenario paparan terhadap pekerja, masyarakat, dan konsumen melalui jalur radiasi eksternal, inhalasi dan injeksi dengan jarak kontak dengan material untuk individu selain driver dan werehouse diambil nilai paling dekat yaitu: 0 cm untuk arah linier dan 60 cm arah tegak lurus dengan sumber, kepadatan penduduk yang dilintasi sebanyak 5000 jiwa/km². Material hasil recycle dirancang untuk tiga produk konsumen, yaitu bahan automobile, home furniture, dan office furniture yang memiliki masa pakai selama 10 tahun dengan jumlah konsumen untuk setiap produk 1000 orang.

Fase recycle yang telah ditetapkan RESRAD-RECYCLE code yang tidak digunakan dalam simulasi ini adalah produk publik. Pada semua fase, individu yang terlibat dskenariokan tidak dilengkapi dengan shielding (perisai radiasi) untuk mendekatkan dengan konsep klierens bahwa material terkontaminasi zat radioatif yang telah mendapat penetapan klieren maka dibebaskan dari pengawasan, atau dapat dianggap sebagai limbah non radioaktif

sehingga perlakuannya mengikuti kaidah penanganan limbah non radioaktif.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kegiatan recycle baja akan dihasilkan tiga produk samping, yaitu partikulat, baghouse dan slag yang masing-masing berjumlah $3 \cdot 10^{-5}$ ton ($6 \cdot 10^3$ Bq), 1 ton ($2 \cdot 10^8$ Bq), dan 1 ton ($3,03 \cdot 10^8$ Bq) sehingga memerlukan disposal untuk penempatan akhir baghouse dan slag. Hal ini merupakan tantangan, bahwa recycle yang dilakukan belum memberikan solusi yang tuntas dan membutuhkan strategi lain untuk mengoptimalkan hasil recycle, antara lain recovery radionuklida dalam limbah untuk meminimalkan volume limbah dan mengolah radionuklida yang terambil sedemikian rupa menjadi bahan baku/sumber radioaktif. Dengan demikian, dalam menetapkan klierens terhadap suatu material, penilaian tidak hanya berdasarkan skenario paparan tetapi juga memperhitungkan hasil samping dari recycle material yang di klierens.

Tabel 1 menampilkan keluaran RESRAD-RECYCLE untuk berbagai skenario individu dalam bentuk dosis individu, dosis kolektif dan dosis kolektif.

Berdasarkan nilai yang ditampilkan pada table 1, terdapat lima skenario yang tidak memenuhi kriteria exemption ($>10 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$), yaitu: tool reuse, home furniture, automobile, office furniture dan coil handler. Dosis yang diperkirakan diterima oleh pengguna peralatan baja terkontaminasi (tool reuse), home furniture, automobile, office furniture dan coil handler masing-masing sebesar $232.000 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$, $1.570 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$, $400 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$, $53,7 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$ dan $27,9 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$.

Nilai dosis di atas sangat bergantung dengan lama paparan yang diterima oleh individu akibat kontak dengan sumber dalam setiap tahunnya. Lama paparan terhadap individu untuk kelima scenario pada disain input parameter, ditetapkan masing-masing: 2000 jam/tahun, 3650 jam/tahun, 730 jam/tahun, dan 2000 jam/tahun dan 80 jam/tahun.

Dengan tidak dapat dipenuhinya kriteria exemption, maka terhadap produk konsumen (tool reuse, home furniture, automobile dan office furniture), pihak manajemen wajib melakukan modifikasi dengan memberikan zat aditif yang berfungsi sebagai shielding untuk mengurangi laju paparan yang ditimbulkan oleh produk tersebut. Sedangkan untuk scenario pekerja coil handler, pihak manajemen dapat menurunkan dosis yang diterima melalui dua pilihan, yaitu penggunaan shielding atau

Tabel 1 Hasil Simulasi RESRAD-RECYCLE CODE
(uSv & person-Sv)

Scenario	Individual		Collective		Cumulative	
	Dose	Rank	Dose	Rank	Dose	Rank
Scrap Delivery: Scrap Cutter	4.42E+00	11	2.21E-05	11	2.21E-05	11
Scrap Delivery: Scrap Loader	1.47E+00	15	7.37E-06	14	7.37E-06	14
Scrap Delivery: Scrap Truck Driver	4.92E-03	28	9.84E-09	29	9.84E-09	29
Scrap Smelting: Scrap Processor	4.42E+00	12	4.42E-05	9	4.42E-05	9
Scrap Smelting: Smelter Yard Worker	9.21E+00	7	8.84E-04	5	8.84E-04	5
Scrap Smelting: Smelter Loader	1.55E+00	14	7.75E-06	13	7.75E-06	13
Scrap Smelting: Furnance Operator	2.13E-01	27	6.38E-07	25	6.38E-07	27
Scrap Smelting: Baghouse Processor	3.91E-01	21	1.17E-06	22	1.17E-06	24
Scrap Smelting: Refinery Worker	1.84E+00	13	5.53E-06	16	5.53E-06	16
Scrap Smelting: Ingot Caster	8.71E-01	17	4.36E-06	17	4.36E-06	17
Scrap Smelting: Slag Worker	7.63E-01	18	7.63E-07	24	7.63E-07	26
Ingot Delivery: Ingot Loader	6.96E-01	20	3.48E-06	20	3.48E-06	20
Ingot Delivery: Ingot Truck Driver	7.14E-01	19	3.57E-06	18	3.57E-06	18
Initial Fabrication: Storage Yard Worker	6.96E+00	9	5.57E-05	8	5.57E-05	8
Initial Fabrication: Sheet Maker	3.48E-01	22	3.48E-06	19	3.48E-06	19
Initial Fabrication: Coil Maker	3.48E-01	22	1.05E-06	23	1.05E-06	25
Final Fabrication: Sheet Handler	3.48E-01	25	3.48E-06	20	3.48E-06	20
Final Fabrication: Coil Handler	2.79E+01	5	8.36E-05	6	8.36E-05	6
Product Distribution: Product Loader	6.96E+00	9	3.48E-05	10	3.48E-05	10
Product Distribution: Product Truk drv	1.14E+00	16	5.71E-06	15	5.71E-06	15
Product Distribution: Sheet Assembler	6.96E+00	9	6.96E-05	7	6.96E-05	7
Product Distribution: Warehouse Worker	9.34E+00	6	1.87E-05	12	1.87E-05	12
Consumer Product: Automobile	4.00E+02	3	4.00E-01	3	2.37E+00	3
Consumer Product: Office Furniture	5.37E+01	4	5.37E-02	4	3.18E-01	4
Consumer Product: Home Furniture	1.57E+03	2	1.57E+00	2	9.28E+00	2
Controlled Products: Shield Block	3.48E-01	25	3.48E-07	26	2.06E-06	22
Controlled Products: Radwaste Container	3.48E-01	25	3.48E-07	26	2.06E-06	22
Reuse Product: Tool Reuse	2.31E+03	1	2.31E+00	1	1.47E+01	1

penambahan jumlah individu (karyawan) sehingga akan mengurangi durasi paparan setiap individunya. Melalui RESRAD-RECYCLE code, dapat ditentukan jenis dan ukuran shielding yang diperlukan. Terdapat 8 jenis shielding yang disediakan dalam RESRAD-RECYCLE, yaitu concrete, water, aluminium, steel, cooper, tungsten, lead dan uranium.

Dengan memodifikasi data input awal, diperoleh hasil bahwa untuk menurunkan dosis individu sampai mencapai nilai dibawah nilai exemption, maka terhadap tool reuse, home furniture, automobile, office furniture diperlukan shielding dengan jenis cooper setebal 9,5 cm, 8,9 cm, 8,5 cm dan 8.9 cm sedangkan untuk pekerja coil handler dibutuhkan shielding berjenis lead setebal 2 cm.

Pada semua skenario jalur paparan yang memberikan kontribusi terhadap dosis efektif yang diterima oleh individu adalah radiasi eksternal kemudian injeksi dan yang paling kecil memberikan kontribusi adalah jalur inhalasi. Jalur eksternal memberikan kontribusi terbesar karena radionuklida Co-

60 dan Cs-137 dan Sr-90 merupakan pemancar gamma dan beta yang bersifat eksternal sedangkan untuk jalur inhalasi dan injeksi berkontribusi melalui intake langsung atau dari media airborne yang mengandung partikulat ketiga radionuklida tersebut.

SIMPULAN

1. Recycle terhadap baja yang terkontaminasi radionuklida Co-60, Cs-137 dan Sr-90 akan menghasilkan produk samping partikulat, baghouse dan slag yang masing-masing berjumlah 3.10^{-5} ton (6.10^3 Bq), 1 ton (2.10^8 Bq), dan 1 ton ($3.03 .10^8$ Bq) sehingga dalam penetapan klerens terhadap material yang terkontaminasi juga harus memperhitungkan produk samping selain skenario paparan.
2. Terdapat lima skenario paparan yang tidak dapat memenuhi kriteria, yaitu tool reuse, home furniture, automobile, office furniture dan coil handler yang nilainya bergantung pada lama individu kontak dengan sumber.

3. Untuk menurunkan dosis efektif yang diterima oleh individu maka terhadap tool reuse, home furniture, automobile, office furniture perlu ditambahkan shielding berbahan copper dengan tebal masing-masing: 9,5 cm, 8,9 cm, 8,5 cm dan 8.9 cm sedangkan untuk pekerja coil handler diperlukan shielding lead setebal 2 cm atau menambah jumlah karyawan/individu untuk mengurangi lama paparan tiap tahun untuk setiap individu.
4. RESRAD-RECYCLE dapat digunakan sebagai alat bantu dalam mengambil keputusan pilihan recycle terhadap baja atau aluminium yang terkontaminasi zat radioaktif.

DAFTAR PUSTAKA

- R. Aningsten, 2003, *Radiological Assessment for Clearance of Materials from Nuclear Facilities, Division of System Analysis and Regulatory Effectiveness Office of Nuclear Regulatory Research USNRC*
- IAEA, 2004, RS-G 1.7, *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*
- IAEA, 2001, SRS-19, *Generic Models for Use in the Assessing the Impact of Discharge of Radioactive Substance to the Environment*

TANYA JAWAB

1. Penanya : Siswoyo (Universitas Jember)

Pertanyaan :

Rekomendasi untuk menambah jumlah pekerja terkait dengan radiasi yang diterima pekerja?

Jawaban :

Jumlah pekerja untuk mengurangi kontak tiap pekerja dengan material terkontaminasi.

2. Penanya : Umi Nur Sholokah (UGM)

Pertanyaan :

Produk samping dari hasil dan cara mengantisipasi produk? Rencana ke depan dalam pengolahan limbah?

Jawaban :

1. Produk samping yang ditampilkan oleh hasil simulasi sebagai indikator dampak kegiatan yang perlu diantisipasi, misalnya untuk partikulat dengan menambah HEPA filter.

2. Sampai saat ini belum diterapkan di Indonesia karena volume limbah radioaktif di Indonesia masih dapat ditangani dengan cara disimpan di BATAN