

## PEMANFAATAN BAKTERI *DEINOCOCCUS RADIODURANS* SEBAGAI BIOREMEDIASI PENCEMARAN LIMBAH RADIOAKTIF PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

Riska Ayu Purnamasari, Ayu Arthuria Rizqiyanti, Tiara Dwi Kurniasari  
Institut Pertanian Bogor

### ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik Indonesia meningkat sebesar 18% rata-rata setiap tahun. Namun, pasokan bahan bakar fosil sebagai sumber energi listrik tidak sepadan dengan peningkatan kebutuhan terhadap energi listrik saat ini. Oleh karena itu, perlu adanya alternatif pengganti bahan bakar fosil yakni energi nuklir. Pemerintah bermaksud membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama pada tahun 2016 di wilayah sekitar Muria. Tetapi, Rencana pemerintah ini menghadapi banyak hambatan. Hal ini disebabkan oleh kekhawatiran masyarakat akan dampak buruk dari limbah nuklir. Limbah yang disimpan pada penyimpanan berlapis yang ditempatkan didalam tanah masih memungkinkan terjadi kebocoran. Bocornya limbah radioaktif ini sangat berpengaruh bagi kelestarian lingkungan. Untuk itu, diperlukan suatu inovasi yang tepat untuk mengatasi masalah ini. Hal ini dapat diselesaikan dengan menggunakan bakteri sebagai agen bioremediasi. Bakteri yang digunakan adalah *Deinococcus radiodurans*. Bakteri ini diyakini dapat membantu membersihkan tanah dan air yang terkontaminasi oleh 10 juta kubik yards limbah radioaktif di USA. Mekanisme yang digunakan bakteri ini adalah dengan menyerap radioisotop yakni Fe-55 dan Sr-90 yang mencemari tanah dan air. Oleh karena itu, bakteri *D. radiodurans* akan dijadikan sebagai salah satu elemen dalam pembangunan instalasi penanganan limbah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir dengan sistem bioreaktor basah In Situ dan Sistem Poros Kontak Biologis.

### ABSTRACT

Indonesia requirement of electricity increase by 18% on average each year. However, the supply of fossil fuels as a source of electrical energy is not commensurate with the increasing demand for electricity at this time. Therefore, the need for alternative fossil fuel that is nuclear energy. The government intends to build Nuclear Power Energy (PLTN) in 2016, at the region around the Muria. However, this plan of government face many obstacles. This is caused by fear of people who worried about the bad effects of nuclear waste. Waste stored at the storage layer that placed in the ground is still possible leakage occurs. The leakage of radioactive waste is very influential for the environment. For that, an innovation is needed to solve this issue. This can be done by using the bacteria as the agent bioremediation. The bacteria used is *Deinococcus radiodurans*. This bacteria is believed to clean up soil and water by 10 million cubic yards radioactive contaminant waste in the USA. Mechanisms used by bacteria is adsorp the radioisotop include Fe-55 and Sr-90. Therefore, the bacteria *D. radiodurans* will serve as one element in the development of the installation of waste handling Power Nuclear Power with In Situ bioreactor wet and biological axis system.

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Pertumbuhan ekonomi nasional menyebabkan kebutuhan terhadap energi listrik sebagai penggerak utama pembangunan terus meningkat (Sudarsono 1986). Pada tahun 1990 diprediksi tingkat pertumbuhan kebutuhan energi listrik di Indonesia sekitar 8,2 % setiap tahunnya, kenyataannya ramalan tersebut jauh berbeda dengan kenyataan bahwa di tahun 1992 kebutuhan energi listrik Indonesia justru meningkat secara mengejutkan yakni 18% rata-rata setiap tahun (Rohi 2007).

Porsi penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama yang cukup besar perlahan-lahan akan menyebabkan krisis energi listrik karena keberadaan bahan bakar fosil yang semakin lama semakin menipis. Oleh karena itu, diperlukan suatu sumber energi listrik yang dapat menggantikan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Energi yang dibutuhkan untuk menggantikan peranan energi fosil harus mempunyai sifat tidak mudah habis, berkelanjutan, efektif dalam menghasilkan bahan bakar yang melimpah dan tidak menimbulkan emisi gas rumah kaca yang mencemari udara seperti gas SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub>, dan NO<sub>x</sub>. Dari berbagai macam sumber energi yang dapat diperbaharui dan energi terbarukan yang telah ada saat ini, sumber energi yang hampir memiliki semua kelebihan yang telah disebutkan di atas adalah energi nuklir.

Pemerintah bermaksud membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama pada tahun 2016. Namun, keputusan ini menuai perdebatan di masyarakat. Perdebatan yang marak tentang keberadaan PLTN di Indonesia membuat masyarakat menjadi ragu akan keamanan energi nuklir sebagai sumber energi berkelanjutan di Indonesia bahkan di dunia. Perdebatan ini difokuskan pada tiga hal antara lain, pemaparan radioaktifitas yang menimbulkan

efek pada manusia dan lingkungan, pengelolaan sampah radioaktif tingkat tinggi, dan keselamatan PLTN (Subki 1986).

Permasalahan pencemaran limbah radioaktif belum dapat diselesaikan seluruhnya dengan cara penyimpanan secara lestari karena kemungkinan kebocoran dapat saja terjadi (Zamroni H *et al* 2007). Jika permasalahan tersebut tidak segera diatasi maka pencemaran lingkungan akibat limbah radioaktif akan menjadi masalah yang lebih besar di kemudian hari. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi yang tepat untuk mengatasi masalah ini. Inovasi yang dibutuhkan bersifat solusi dan tidak menimbulkan masalah baru.

Salah satu bakteri *extremophile* adalah *Deinococcus radiodurans*. *D. radiodurans* adalah mikroba yang dapat bertahan di lingkungan radioaktif berdosisi tinggi yang membunuh hampir semua makhluk hidup lain (Battista 2003). *Deinococcus* memiliki keunikan yang tidak umum, dia tahan terhadap radiasi sinar gamma, yang membuatnya tetap dapat hidup setelah di ekspos sinar gamma dengan dosis beberapa kali dari dosis yang dapat mematikan manusia (Daly 2009). Dosis yang dapat memutus-mutus genom menjadi beberapa fragmen DNA, akan tetapi enzim bakteri ini dapat memperbaiki kerusakan genom yang parah ini. Sehingga dengan rekayasa genetik, bakteri ini diyakini dapat membantu membersihkan tanah dan air yang terkontaminasi oleh 10 juta kubik yards limbah radioaktif yang sudah terkumpul di USA (Brim 2003).

#### Tujuan Penulisan

Karya tulis ini bertujuan menggali gagasan atau ide, mengkaji, serta menganalisis, bahwa bakteri *D. radiodurans* berpotensi sebagai agen pencegah dan bioremediasi bagi pencemaran yang diakibatkan oleh kebocoran limbah radioaktif. Inovasi tersebut ditujukan sebagai alternatif solusi terhadap

permasalahan kebocoran limbah radioaktif yang berbentuk cair hasil PLTN.

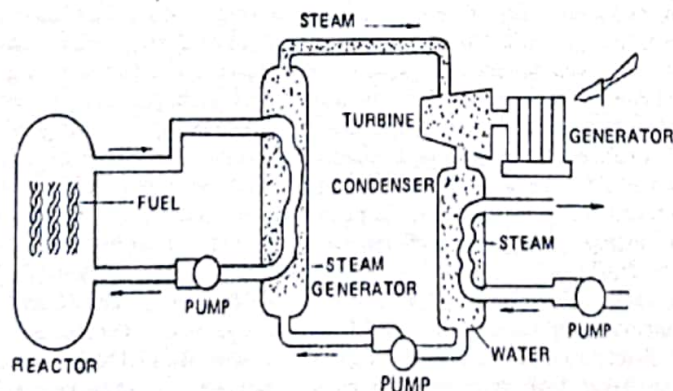
#### Metode Penulisan

Metode penulisan yang digunakan dalam menyusun karya tulis ini terdiri dari penentuan kerangka pemikiran, gagasan, pengumpulan data melalui studi pustaka, pengolahan dan analisis data, rumusan solusi, serta pengambilan kesimpulan dan saran.

#### TELAAH PUSTAKA PLTN

Prinsip kerja PLTN melibatkan disiplin ilmu yaitu teknik fisika nuklir. Reaksi fisika yang terjadi adalah reaksi pembelahan inti. Reaksi pembelahan inti uranium terjadi dalam reaktor. Di dalam reaktor reaksi tersebut terjadi secara berantai pada saat inti dari uranium dalam hal ini U-235 atau U-233 terbelah bereaksi dengan neutron yang akan menghasilkan berbagai unsur lainnya dalam waktu yang sangat cepat, proses ini akan menimbulkan panas dan neutron-neutron baru. Panas yang berasal dari inti reaktor dialirkan ke sistem pendingin primer, untuk kemudian dilewatkan pada alat penukar panas dan selanjutnya panas dibuang ke lingkungan melalui sistem pendingin sekunder.

PLTN di Indonesia akan menggunakan reaktor jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*) karena teknologi reaktor ini banyak digunakan di seluruh dunia. Reaktor jenis ini terdiri dari sebuah bejana yang penuh air yang diletakkan bahan bakar yang disusun dalam pipa-pipa yang dipasang berkelompok. Bahan bakar yang dipakai adalah U-235 untuk menghasilkan panas yang akan memanaskan air. Karena bejana terisi penuh, maka tidak terjadi uap melainkan tekanan tinggi yang akan disalurkan ke penghasil uap untuk kemudian memutar turbin bagi menghasilkan energi listrik.



Gambar 1 Skema prinsip kerja PLTN (Rohi, 2007).

Limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari PLTN secara umum dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu aktivitas rendah dan aktivitas sedang. radioaktif cair ini kebanyakan berasal dari pendingin reaktor baik pendingin primer maupun pendingin sekunder, kebocoran-kebocoran pada alve, pompa-pompa, bocoran pada lantai, limbah laundry, limbah dekontaminasi, larutan regenerasi resin, dan personil dekontaminasi. Pada PLTN jenis PWR, limbah terbanyak dalam hal volum dan aktivitasnya adalah berupa cairan, terutama cairan lebihan dari pendingin primer (Djokolelono 1975).

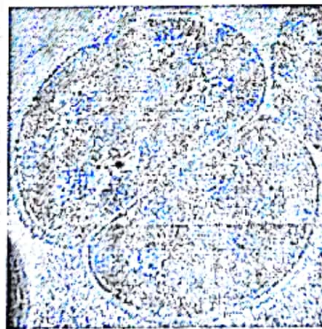
Berbagai usaha pengamanan dilakukan untuk melindungi kesehatan dan keselamatan masyarakat, para pekerja reaktor dan lingkungan PLTN. Usaha ini dilakukan untuk menjamin agar radioaktif yang dihasilkan reaktor nuklir tidak terlepas ke lingkungan baik selama operasi maupun jika terjadi kecelakaan. PLTN mempunyai sistem pengamanan yang ketat dan berlapis-lapis, sehingga kemungkinan terjadi kecelakaan maupun akibat yang ditimbulkannya sangat kecil.

#### *Deinococcus radiodurans*

*D. radiodurans* merupakan bakteri gram positif, tidak membentuk spora, dan membutuhkan media yang kompleks untuk membentuk koloni yang berwarna merah jambu (Battista 2003). Bakteri ini mempunyai beberapa karakteristik yang unik seperti resisten terhadap genotoksik kimia, kerusakan oksidatif, dehidrasi, ionisasi tingkat tinggi dan radiasi ultraviolet (Federikson 2000). Akibatnya *D. radiodurans* disebut sebagai "world's toughest

bacterium". Kekebalan *D. radiodurans* dapat dipaparkan sebagai berikut, dosis dari 10 Gy dari radiasi pengion mampu membunuh manusia dan dosis dari 60 Gy mampu membunuh semua sel dalam kultur *E. coli*, *D. radiodurans* mampu bertahan dari dosis yang seketika itu juga lebih dari 5000, tetapi tetap bisa melangsungkan hidupnya dan dosis lebih 15.000 Gy dengan 37% kemampuan bertahan hidup. Dosis 5000 Gy diperkirakan mampu memperkenalkan beberapa ratus kerusakan yang menyeluruh pada DNA makhluk hidup.

Banyak penelitian telah mengungkapkan penyebab kekebalan pada *D. radiodurans*. Penelitian yang paling awal lebih difokuskan pada mekanisme perbaikan DNA. Mikroba lain dapat memperbaiki DNA hanya tiga sampai lima strain, tetapi *D. radiodurans* bisa memperbaiki lebih dari 200 strain. Selain itu, adanya cincin DNA juga berpengaruh pada kekebalan bakteri ini. Penelitian yang dilakukan pada tahun 2002 oleh Avi Minsky dan rekannya di Weizmann Institute of Science's Organic Chemistry Department. Mereka menemukan bahwa DNA mikroba diatur dalam cincin fragmen DNA yang unik, yang mencegah bagian-bagian DNA rusak oleh radiasi ke dalam cairan sel. Tidak seperti organisme lain yang kehilangan fragmen DNA oleh radiasi, mikroba ini tidak kehilangan informasi genetiknya karena potongannya disimpan rapat di dalam cincin yang jumlahnya ratusan bila hal tersebut perlu dilakukan. Mekanisme pertahanan unik yang muncul berfungsi untuk membantunya dalam menghadapi dehidrasi membuktikan kelebihanannya dalam memproteksi dirinya dari radiasi.



Gambar 2 Bakteri *Deinococcus radiodurans*.

Scanning Electron Microscopy analisis telah menunjukkan bahwa DNA *D. radiodurans* diatur oleh kemasan toroida yang kompak yang memfasilitasi perbaikan DNA. Dua salinan DNA paling tidak dengan kerusakan yang acak bisa membentuk fragmen DNA melewati proses pengkelatan logam. Sebagian fragmen tumpang tindih kemudian digunakan untuk mensintesis

bagian yang homolog melewati D-loop yang akan melanjutkan tambahan sampai menemukan utas pasangan tambahan. Pada tahap akhir, ada pindah silang sebagai rekombinasi homolog yang bergantung pada Rec-A (Omelchenko 2005).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan bakteri *D. radiodurans* dalam proses bioremediasi dikarenakan bakteri ini mampu bertahan dalam radiasi yang disebabkan oleh limbah radioaktif. *D. radiodurans* mempunyai kemampuan untuk mengadsorpsi isotop-isotop radioaktif seperti Sr-90 yang dihasilkan oleh limbah cair. Salah satu penyebab *D. radiodurans* mampu melakukan hal itu karena pada struktur *metal-binding* atau selubungnya terkandung unsure mangan, Mn (II), yang mampu mengadsorpsi sekaligus mereduksi isotop Sr-90 yang terkandung dalam limbah cair.

Inovasi alternatif yang akan coba ditawarkan dari analisis permasalahan di atas adalah pemanfaatan bakteri *D. radiodurans* sebagai agen bioremediasi untuk pencemaran limbah radioaktif cair. Pada aplikasinya, diharapkan bakteri ini dapat digunakan sebagai salah satu elemen dalam pembangunan instalasi penanganan limbah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir berupa Sistem bioreaktor basah In Situ dan Sistem Poros Kontak Biologis. Bakteri ini dalam pengaplikasian sistemnya akan mampu mengadsorpsi kemudian mereduksi limbah cair yang akan tercemar keluar sistem pengamanan.

Ada dua sistem yang ditawarkan dalam menangani limbah PLTN ini,

### 1. Sistem pertama

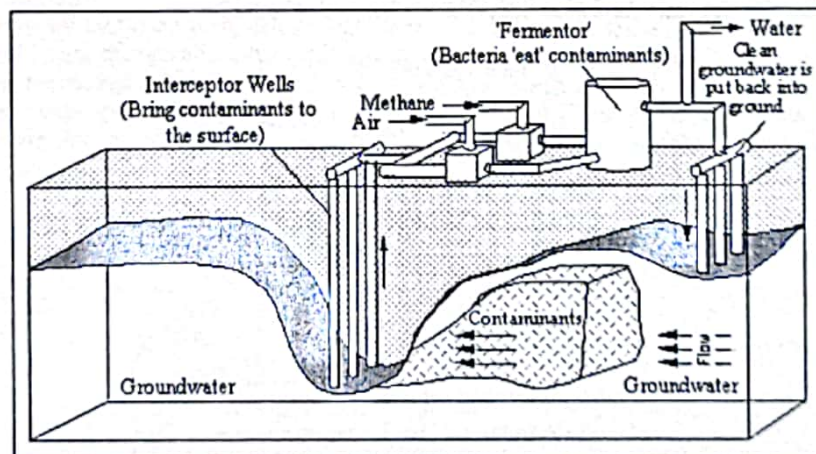
#### Bioreaktor basah In Situ

Bioreaktor dalam sistem ini akan berfungsi sebagai bejana bioremediasi. Konteks bioreaktor dalam hal penanganan limbah di dalam tanah dan air

berhubungan dengan sebuah bejana raksasa sebagai tempat pendegradasian limbah Sr<sup>90</sup> yang sudah disolasi dan dikontrol. Bioreaktor dalam hal ini akan memisahkan kontaminan berbahaya di dalam tanah untuk dimasukkan ke dalam tangki penampungan tahap dua yang keadaan lingkungannya yang bisa diawasi dan dikontrol keadaannya. Mekanisme perlakuan yang paling penting dalam bioreaktor ini adalah degradasi alami dari populasi tangkiteri *Deinococcus radiodurans*. Bioreaktor ini telah terbukti sangat efektif dalam meremediasi limbah di dalam tanah, dan juga beberapa kasus limbah di dalam air. Selain itu bioreaktor ini juga telah mampu menyelesaikan permasalahan polusi oleh bahan tangkiar hidrokarbon (minyak, bensin, dan diesel).

### Desain dari Bioreaktor In Situ Bioremediasi

Desain bioreaktor ini bergantung oleh limbah yang akan di remediasi, media yang telah terkontaminasi, dan kendala dalam masalah dana. Ada dua tipe bioreaktor ini, yaitu bioreaktor kering dan basah(slurry). Pada kesempatan ini, fokus limbahnya adalah limbah cair yang ditampung di dalam tanah, sehingga sistem yang memang sesuai adalah bioreaktor basah. Bioreaktor untuk penanganan limbah cair ini biasanya berupa lapisan atau sebuah bentukan dari endapan reaktor teraktivasi. Endapan reaktor teraktivasi merupakan sebuah bejana yang akan menjadi tempat bercampurnya mikroba dan nutriennya dengan limbah Sr<sup>90</sup>. Bioreaktor ini dapat dioperasikan dalam pada tempat yang menjadi aliran dari limbah tersebut. Sistem bioreaktor dapat diamati pada skema di bawah ini :



Gambar 5. Sistem Bioreaktor Basah In situ.

### 2. Sistem kedua

#### Sistem Poros Kontak Biologis

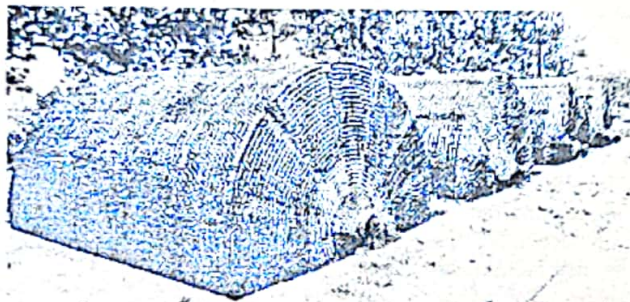
Sistem Poros Kontak Biologis ini merupakan teknologi bioremediasi limbah cair tahap ke dua

yang melibatkan kontak dengan medium biologis yang memfasilitasi pembersihan limbah SR<sup>90</sup> ini. Laporan paling awal tentang penanganan limbah cair ini dengan menggunakan teknik perendaman telah

dicobakan pada tahun 1929, akan tetapi tidak sampai tahun 1965, penggunaan sistem inilah dikomersialkan. Ada beberapa desain yang sampai sekarang dibuat, tetapi sistem yang paling sederhana yang ditujukan sebagai solusi adalah sistem Poros Kontak Biologis. Sistem ini terdiri dari gabungan cakram-cakram yang menjulang, membentuk poros batang yang digerakkan oleh mesin sehingga gulungan cakram tersebut berputar ke arah kanan sehingga menghasilkan gelombang menuju ke aliran pembuangan limbah cair.

Gulungan cakram tersebut terbuat dari plastik (Polietilena, PVC, dan Polistirena) dan 40% dari

gulungan tersebut dibenamkan ke dalam aliran air. Gulungan cakram tersebut disusun menjadi beberapa kelompok dengan memberikan jarak antara kelompok untuk meminimalisasi arus gelombang atau hubungan singkat arus. Tangki penampungan mencakup beberapa unit kecil dan unit besar yang biasanya ditempatkan di dalam sebuah gedung tersendiri. Hal ini dilakukan untuk mengurangi dampak dari cuaca terhadap lapisan biofilm aktif yang dapat berikatan dengan permukaan cakram.



Gambar 6 Sistem Poros Kontak Biologis

Sistem Poros Kontak Biologis ini dibuat pada tangki beton, sehingga permukaan limbah cair yang melewati tangki ini mencapai poros biologis ini. Gulungan poros cakram ini berputar dengan kecepatan 1 sampai 2 rpm, dan lapisan mikroba akan ditumbuhkan dengan ketebalan 2 sampai 4 mm pada permukaan yang basah pada setiap cakraanya. Pertumbuhan mikroba ini akan menjadi solusi ketika berasimilasi dengan material  $Sr^{90}$  yang ada dalam limbah cair. Pengupuan dilakukan pada saat pemutaran poros cakram setelah kontak dengan limbah cair tersebut.

Penulisan karya tulis ini diharapkan dapat memberikan manfaat yakni dengan menginformasikan kepada masyarakat mengenai inovasi pada sistem penyimpanan limbah radioaktif yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir. Informasi yang telah disampaikan dapat mengurangi kekhawatiran terhadap dampak dari rencana pembangunan PLTN yang akan dilakukan pemerintah untuk menanggulangi masalah krisis energi.

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Nuklir memiliki potensi yang besar sebagai sumber energi, sehingga diharapkan mampu mengatasi permasalahan krisis energi di dunia lewat pembangunan Pusat Listrik Tenaga Nuklir. Hal

tersebut masih menjadi polemik di kalangan masyarakat karena pemikiran akan bahaya yang ditimbulkan jika terjadi kebocoran. Solusi yang dibutuhkan adalah suatu sistem yang mampu menjamin kebocoran itu terjadi dan mampu meremediasi hasil limbahnya. Inovasi yang kami tawarkan yaitu dengan menggunakan bakteri *Deinococcus radiodurans* sebagai salah satu elemen dalam pembangunan instalasi penanganan limbah pembangkit Listrik Tenaga Nuklir berupa Sistem Bioreaktor Basah In Situ dan Sistem Poros Kontak Biologis. Bakteri ini dalam pengaplikasian sistemnya akan mampu mengadsorpsi kemudian mereduksi limbah cair yang akan tercemar keluar sistem pengamanan.

### Saran

Penelitian jenis bakteri *Deinococcus radiodurans* ini sudah banyak dipublikasikan di media massa maupun jurnal-jurnal ilmiah, hanya saja pengaplikasiannya sebagai solusi permasalahan limbah nuklir dari PLTN maupun bioreaktor, sejauh ini belum dapat ditemukan sebuah mekanisme yang efisien. Oleh karena itu, pengajuan gagasan melalui penulisan karya tulis ilmiah ini diharapkan mampu menstimulus berbagai pihak terkait untuk memberi dukungan berupa moril dan materiil, sehingga inovasi ini dapat diwujudkan demi kebaikan umat manusia dan sebagai solusi permasalahan krisis energi dunia.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Brim A, Venkateswaran A, Kostandarithes HM, Fredrickson JK, and Daly MJ. 2003. Genetic development of *D. geothermalis* for bioremediation of high temperature radioactive waste environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, 69, 4575-4582.
2. Daly MJ. 2009. A new perspective on radiation resistance based on *Deinococcus radiodurans*. *Nat Rev Microbiology* 7(3):237-45
3. Djokokelelono M. 1975. *PWR sebagai jenis PLTN paling laku saat ini* [prosiding]. Jakarta : Prosiding Teknologi Pusat Listrik Tenaga Nuklir, BATAN.
4. Fredrickson JK. 2000. Reduction of Fe(III), Cr(VI), U(VI), and Tc(VII) by *Deinococcus radiodurans*. *Appl. Environ. Microbiol* 66:2006-2011.
5. Krane KS. 1988. *Introductory Nuclear Physics*. Canada : John Wiley&Sons, Inc.
6. Daly MJ. 2006. Modulating radiation resistance: Insights based on defenses against reactive oxygen species in the radioresistant bacterium *Deinococcus radiodurans*. *Clin Lab Med* 26(2):491-504.
7. Omelchenko EK *et al.* 2005. How Radiation Kills Cells: Survival of *Deinococcus radiodurans* and *Shewanella oneidensis* Under Oxidative Stress. *FEMS Microbiology Reviews* 29:361-375.
8. Pelczar & Chan. 2007. *Mikrobiologi Dasar*. Depok : UI Press.
9. Rohi D. 2007. Mengkaji Kontroversi Penggunaan Energi Nuklir dalam Mendukung Kelistrikan Nasional [Makalah]. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra Surabaya.
10. Subki I. 1986. Keselamatan Reaktor Nuklir Suatu Pendekatan Komprehensif. Di dalam: *Prosiding Seminar Teknologi Reaktor dan Pusat Listrik Tenaga Nuklir*, Bandung, 2-4 September 1986. Bandung: Badan Teknologi Atom Nasional; 1986. hlm 33-37.
11. Sudarsono, Budi. 1986. Prospek Energi Nuklir di Indonesia. Di dalam : *Prosiding Seminar Teknologi Reaktor dan Pusat Listrik Tenaga Nuklir*; Bandung, 2-4 September 1986. Bandung: Badan Teknologi Atom Nasional. hlm 18-33.
12. Zamroni, Husen, Rachmadetin J. 2007. Limbah Radioaktif yang ditimbulkan dari operasional AL PLTN PWR 1000 MWe. Di dalam : *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengolahan Limbah VI*. Tangerang : Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN.

## DISKUSI

1. Penanya : Sumijanto – PTRKN

**Pertanyaan :**

- Permasalahan limbah radioaktif itu apanya ?
- Konsep solusinya degradasi dengan bakteri setelah degradasi hasilnya bagaimana ? prediksi saja

**Jawaban :**

- Limbah cairnya yang dapat diurai dengan bakteri *Deinococcus radiodurans*.
- Hanya berdasarkan literatur saja, karena belum ada penelitian lanjutan.

2. Penanya : Asep Saepulloh

**Pertanyaan :**

- Limbah radioaktif ada padat, cair wacana di radiodurans selain untuk limbah cair apakah untuk semi cair/padat ada teknik lain atau tidak

**Jawaban :**

- Belum tahu, perlu studi literatur lanjutan.