

Pengaruh Pengoperasian Reaktor Kartini terhadap Kadar DO, BOD, dan COD Air Pendingin Primer

Agus Budhie Wijatna¹⁾, Tri Wulan Tjiptono²⁾, dan Tony Dwi Susanto³⁾

¹⁾Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik UGM, Jln. Grafika No. 2 Yogyakarta

²⁾Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju - BATAN, Jln. Babarsari, Yogyakarta

³⁾Fakultas Teknik Industri, UPN Veteran, Jln. Babarsari, Yogyakarta

Abstract

In light water reactor (LWR) systems, water coolant passes through reactor core to remove heat generated by fission processes. Therefore, the temperature of water coolant raise and the water coolant is irradiated by neutrons from reactor core. The research was directed to explore the influences of both of them to the contents of Dissolved Oxygen (DO), Biological Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD).

The research was done by chemical titration method to measure the content of DO, BOD₅, and COD in the water coolant in which the reactor was operated at critical condition and constant power. Water sampling were done after 45', 90', 135', 180', 225', and 270', reactor operation.

The results of this research are: (1) the temperature of the coolant is increasing as operating time function, (2) the content of DO is also increasing, while BOD₅ and COD tends to be constant, and (3) in general the reactor water coolant is safe to be released to the environment.

Keywords: water coolant, heat, irradiation, chemical titration, DO.

1. Pendahuluan

Filosofi keselamatan reaktor nuklir selalu menggunakan dua pendekatan, yakni pendekatan deterministik dan pendekatan probabilistik. Pendekatan deterministik diimplementasikan dalam angka-angka keselamatan yang bersifat optimistik, sedangkan pada pendekatan probabilistik, konsep keamanan diwujudkan dalam angka-angka probabilistik yang bersifat pesimistik guna memperhitungkan kemungkinan terjadinya kecelakaan yang tidak diinginkan. Sebagai contoh, meskipun sistem pendingin primer Reaktor Kartini merupakan sistem kalang tertutup (*closed loop*) sehingga air pendingin primernya tidak terbuang ke lingkungan, namun dalam kondisi darurat, tidak terlepas kemungkinan air pendingin primer dapat terlepas ke lingkungan. Karena pembuangan air pendingin reaktor termasuk kategori pembuangan limbah industri, maka pelepasannya ke lingkungan terikat dengan ketentuan baku mutu *effluent*. Oleh

karena itu sebelum dibuang ke lingkungan, kualitas air pendingin primer harus diketahui; apakah memenuhi baku mutu *effluent* yang diperkenankan atau tidak. Parameter-parameter utama yang digunakan untuk mengukur kualitas air adalah (a) parameter fisik, (b) parameter kimia, (c) parameter bakteriologis, dan (d) parameter radioaktivitas. Kadar *Dissolved Oxygen (DO)*, *Biological Oxygen Demand (BOD)*, dan *Chemical Oxygen Demand (COD)* merupakan tiga dari sejumlah parameter kimia air yang harus diketahui nilainya sebelum air pendingin primer dilepas ke badan air.

Pada reaktor nuklir berpendingin air, fluida pendingin akan bersinggungan langsung dengan kelongsong bahan bakar dan struktur material reaktor. Akibatnya ketika reaktor beroperasi, maka suhu air pendingin akan naik dan air akan mengalami irradiasi. Salah satu bentuk irradiasi adalah terjadinya interaksi antara neutron cepat

dengan oksigen yang terkandung dalam air pendingin reaktor melalui reaksi $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$. Radioisotop ^{16}N merupakan sumber radiasi pemancar β^- dengan tenaga maksimum 4,26 MeV yang dalam proses peluruhannya selalu diikuti emisi radiasi γ dengan tenaga 6,13 MeV dan 7,13 MeV. Emisi radiasi γ di samping sangat berbahaya juga dapat menyebabkan terjadinya proses radiolisis molekul air pendingin. Namun karena umur paronya (*half life*) pendek, yakni 7,35 detik, maka proses radiolisis ini hanya berlangsung ketika reaktor beroperasi; dan proses tersebut akan berhenti dengan sendirinya ketika reaktor berhenti operasi (*shutdown*). Sedangkan pengaruh radiasi γ terhadap air berupa perubahan kadar oksigen terlarut maupun terbentuknya radikal-radikal bebas di dalam air pendingin akan terus berlanjut, meskipun reaktor telah berhenti beroperasi.

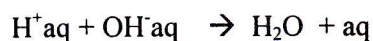
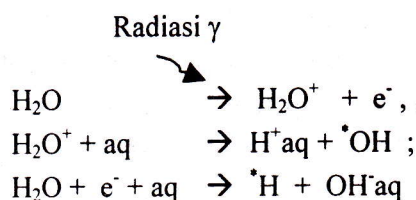
Perubahan kadar oksigen terlarut dan terbentuknya radikal bebas dalam air pendingin dapat mempengaruhi: (a) laju korosi bahan bakar dan struktur material reaktor; (b) aras radioaktivitas (*radioactivity level*) air pendingin reaktor; (c) kualitas air pendingin reaktor; dan (d) menjadi indikator aman-tidaknya air pendingin reaktor bagi kehidupan biota akuatik jika dibuang ke lingkungan.

Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian perubahan kadar oksigen terlarut dalam air pendingin baik yang disebabkan oleh pengaruh kenaikan suhu air pendingin, maupun pengaruh iradiasi bahan-bahan radioaktif terhadap air pendingin ketika reaktor sedang beroperasi maupun setelah di-*shutdown*.

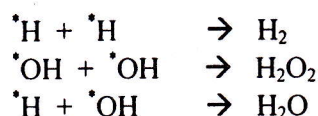
2. Fundamental

Pengaruh irradiasi

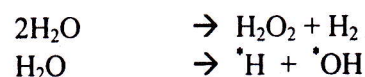
Irradiasi terhadap air akan menyebabkan terjadinya radiolisis molekul air melalui reaksi (Cember H., 1969):



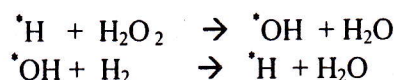
Segera setelah terbentuk radikal bebas $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{H}$, kedua radikal bebas tersebut akan terdistribusi dalam pendingin primer; radikal satu akan bereaksi dengan yang lain dan menghasilkan gas hidrogen (H_2), hidrogen peroksida (H_2O_2) dan air (H_2O):



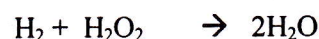
Dengan demikian reaksi-reaksi yang terjadi akibat irradiasi terhadap air adalah:



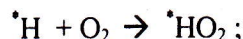
Reaksi pembentukan H_2O_2 dan H_2 di atas merupakan komponen utama reaksi maju, yang selanjutnya diikuti reaksi:



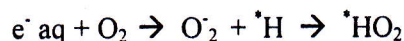
Sehingga reaksi nettonya adalah:



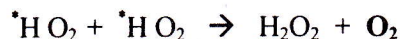
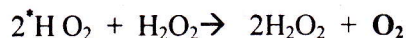
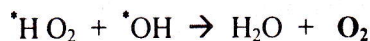
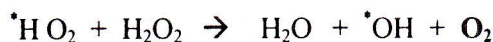
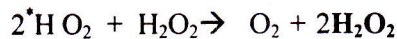
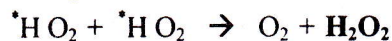
Karena air pendingin reaktor mengandung O_2 , maka juga akan terbentuk radikal $\cdot\text{HO}_2$ melalui reaksi:



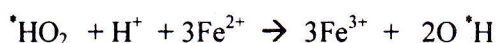
atau melalui reaksi



Radikal $\cdot\text{HO}_2$ di dalam air dapat menyebabkan terbentuknya hidrogen peroksida (H_2O_2) dan oksigen (O_2), melalui reaksi-reaksi sebagai berikut;

1). Reaksi yang menghasilkan O_2 2). Reaksi yang menghasilkan H_2O_2 

Reaksi pembentukan yang berlangsung sangat cepat (dalam orde piko detik) tersebut di atas dapat terjadi karena oksigen terlarut dalam air pendingin reaktor terirradiasi oleh photon γ . Proses yang berlangsung secara tidak terkendali ini menyebabkan konsentrasi oksigen terlarut dalam air pendingin reaktor mengalami perubahan. Produk-produk radiolisis tersebut di samping sangat reaktif terhadap bahan-bahan pengotor yang terlarut dalam air pendingin, juga menjadi bersifat korosif terhadap kelongsong bahan bakar dan bahan struktur reaktor. Radikal *HO_2 hasil radiolisis air dengan oksigen terlarut merupakan oksidator yang sangat kuat dalam mengoksidasi ion-ion logam yang terlarut menjadi bentuk lain dengan valensi yang lebih tinggi dan sukar larut dalam air; misalnya Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} melalui reaksi:



Akibatnya akan terbentuk kerak pada permukaan bagian dalam pipa pendingin. Selain menyebabkan korosi, pengendapan produk-produk korosi dan pengendapan bahan-bahan teraktivasi dapat mengkontaminasi pipa sistem pendingin primer reaktor. Demikian pula jika oksida tersebut terbentuk pada dinding alat penukar kalor (*heat*

exchanger, HE), semakin lama akan semakin menebal, sehingga akan menurunkan kemampuan *HE* memindah kalor.

Pengaruh temperatur

Kadar oksigen terlarut dalam keadaan jenuh bervariasi tergantung pada temperatur dan tekanan atmosfer. Menurut Srikandi (1992), pada temperatur $20^\circ C$ dengan tekanan satu atmosfer, kadar oksigen terlarut dalam keadaan jenuh adalah 9,2 ppm, sedangkan pada temperatur $30^\circ C$ dengan tekanan yang sama kadar jenuhnya hanya 7,6 ppm. Semakin tinggi temperatur air semakin rendah pula tingkat kejenuhan oksigen terlarut.

Menurut Herkwanto (1985), ketika Reaktor Kartini beroperasi pada kondisi kritis dengan daya tetap 100 kW, temperatur air pendingin berkisar antara $30^\circ C - 35^\circ C$. Meskipun kisaran temperaturnya relatif kecil namun perubahan temperatur ini akan berpengaruh terhadap kadar oksigen terlarut dalam air pendingin.

Kadar oksigen terlarut yang terlalu rendah dalam air akan menyebabkan biota-biota akuatik tidak mampu melangsungkan kehidupannya di dalam media air tersebut. Sebaliknya jika kadar oksigen terlarut dalam air terlalu tinggi, maka proses pengikatan oksigen terhadap hidrogen yang melapisi logam-logam yang berada dalam media air akan semakin kuat, akibatnya proses korosi akan semakin cepat.

3. Metodologi

Karena pendingin primer Reaktor Kartini menggunakan sistem kalang tertutup, maka dapat digunakan asumsi bahwa parameter fisika, kimia, bakteriologis, dan radioaktivitas air pendingin bersifat homogen; sehingga hasil analisis sampel air yang diambil dari tangki teras reaktor dianggap dapat merepresentasikan nilai parameter-parameter air pendingin secara keseluruhan. Untuk mengetahui pengaruh temperatur/lama operasi reaktor terhadap *DO*, *BOD₅*, dan *COD* maka tahapan penelitian dilaksanakan sebagai berikut:

1. Pengukuran temperatur dan pengambilan sampel air sebelum reaktor beroperasi.

2. Setelah reaktor mencapai kondisi kritis pada daya tetap (100 kW), dilakukan lagi pengukuran temperatur dan pengambilan sampel air dengan interval waktu sebagai berikut: sesaat setelah kritis pada daya 100 kW (menit ke 0); kemudian menit ke 45, 90, 135, 180, 225 dan 270.
3. Sampel air dianalisis menggunakan metode titrasi kimia, meliputi tes *BOD* lima hari (*BOD*₅), tes *COD*, dan tes *DO* di Laboratorium Instalasi Pengolah Akhir Limbah (IPAL) Yogyakarta.

Untuk mendapatkan gambaran pengaruh lama pengoperasian reaktor terhadap temperatur rerata, *DO*, *BOD*₅, dan *COD* air pendingin primer, maka hasil pengukurannya dibandingkan dengan hasil pengukuran parameter yang sama terhadap cadangan air pasokan Reaktor Kartini maupun Baku Mutu Lingkungan yang berlaku.

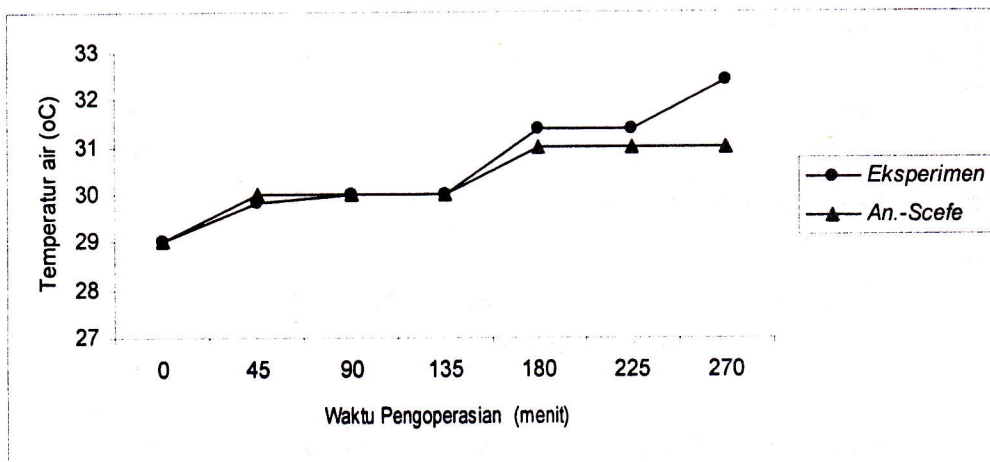
4. Hasil dan Pembahasan

Data pengukuran laboratorium kemudian dianalisis menggunakan metoda *Chouvenet* dan *Anova*, sehingga diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 1. di bawah ini:

Tabel 1. Data temperatur, *DO*, *BOD*₅, dan *COD* sebagai fungsi lama operasi reaktor

	Air Umpan	Air pendingin primer							Baku Mutu
		0'	45'	90'	135'	180'	225'	270'	
Temp, °C	-	29	29,83	30	30	31,35	31,93	32,4	-
DO, mg/l	7,5	7,88	7,867	8,32	7,93	8,28	8,35	8,68	Min. 3
BOD ₅ , mg/l	0,066	0,036	0,036	0,035	0,036	0,036	0,034	0,037	Maks. 20
COD, mg/l	30,08	13,28	13,24	13,21	13,22	13,3	13,24	13,25	Maks. 40

Catatan: data di atas adalah data setelah dianalisis dengan metode *Chouvenet* dan *Anova*.



Gambar 1. Grafik pengaruh lama operasi reaktor terhadap temperatur air pendingin

Pengaruh lama operasi terhadap temperatur

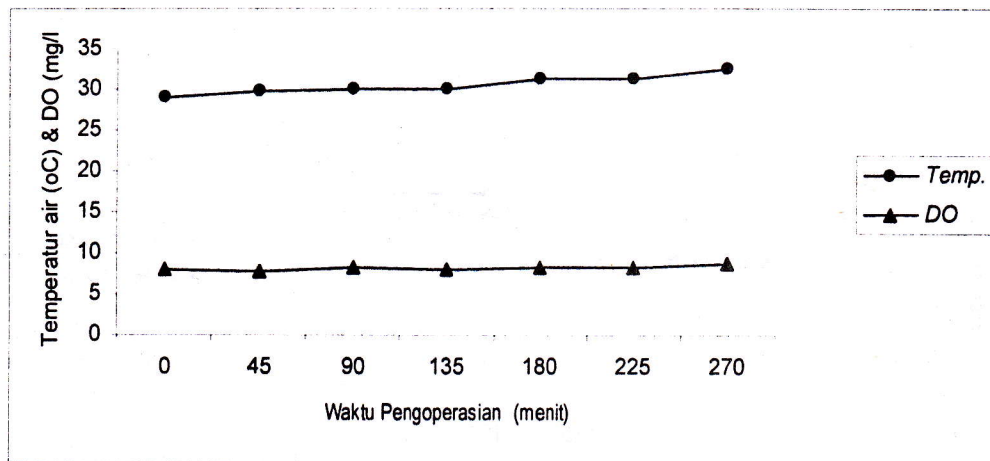
Dari Tabel 1 dan Gambar 1 di atas nampak bahwa temperatur air pendingin meningkat sebagai fungsi lama operasi reaktor. Kenaikan temperatur air pendingin tersebut disebabkan karena air pendingin bersentuhan langsung dengan kelongsong bahan bakar dalam teras reaktor yang temperaturnya naik sebagai fungsi lamanya reaktor beroperasi. Kenaikan temperatur air pendingin relatif kecil, bahkan hasil analisis statistik *Scefe Temperatur* menunjukkan bahwa temperatur air setelah menit ke 45 dibandingkan temperatur setelah menit ke 90 dan menit ke 135 relatif sama; demikian pula dengan temperatur air setelah menit ke 180 dibandingkan temperatur setelah menit ke 225 dan menit ke 270 juga relatif sama. Fenomena ini dapat terjadi karena:

1. Penelitian dilakukan pada kondisi dimana Reaktor Kartini dioperasikan pada kondisi kritis pada 100 kW. Pada kondisi ini jumlah neutron dari satu generasi ke generasi berikutnya adalah tetap, atau dengan kata lain proses fisi setiap detiknya adalah sama, sehingga kalor (*heat*) yang dibangkitkan dalam teras reaktor tiap waktu juga relatif sama.

2. Sirkulasi sistem pendingin primer maupun sistem pendingin sekunder terjadi secara alamiah maupun secara paksa. Sirkulasi alamiah terjadi karena temperatur air di dekat teras reaktor lebih tinggi dari temperatur air di atas tangki reaktor, sehingga rapat jenis air di dekat teras lebih rendah dibandingkan rapat jenis air di atas tangki reaktor; akibatnya secara alamiah air di dekat teras akan naik, dan sebaliknya air di atas teras/di permukaan tangki reaktor akan turun. Di samping itu sirkulasi air sistem pendingin primer dan sekunder juga digerakkan oleh pompa, sehingga temperatur air pendingin akan merata pada aras tertentu.
3. Reaktor Kartini merupakan reaktor tipe tangki terbuka, sehingga memungkinkan terjadinya konveksi kalor dari air di tangki teras reaktor ke udara di sekitarnya.

Pengaruh lama operasi terhadap DO

Secara teoritis, kadar *DO* akan menurun sebagai fungsi temperatur, namun dari hasil penelitian sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1. dan Gambar 2. menunjukkan bahwa kadar *DO* tidak menurun tetapi cenderung naik; peristiwa ini dapat terjadi karena:



Gambar 2. Grafik pengaruh lama operasi reaktor terhadap kadar *DO*

1. Disain teras/sistem pendingin primer Reaktor Kartini menggunakan sistem kolam terbuka, sehingga ketika reaktor beroperasi memungkinkan terjadinya difusi oksigen dari udara di sekitar kolam reaktor ke dalam air pendingin primer reaktor.
2. Ketika reaktor beroperasi, air pendingin dalam teras reaktor berada dalam pengaruh medan radiasi γ . Interaksi radiasi γ dengan air pendingin mengakibatkan terjadinya radiolisis molekul air pendingin dengan menghasilkan radikal-radikal bebas yang pada akhirnya dapat menghasilkan oksigen. Namun karena interaksi antara air dan radiasi γ bersifat stokastik, maka perhitungan seberapa besar pengaruh radiasi γ terhadap kadar oksigen terlarut dalam air sangat kompleks.
3. Karena perubahan temperatur air pendingin sebagai fungsi lama pengoperasian reaktor ternyata relatif kecil, maka perubahan kadar oksigen terlarut dalam air pendingin yang disebabkan oleh perubahan temperatur juga sangat kecil.

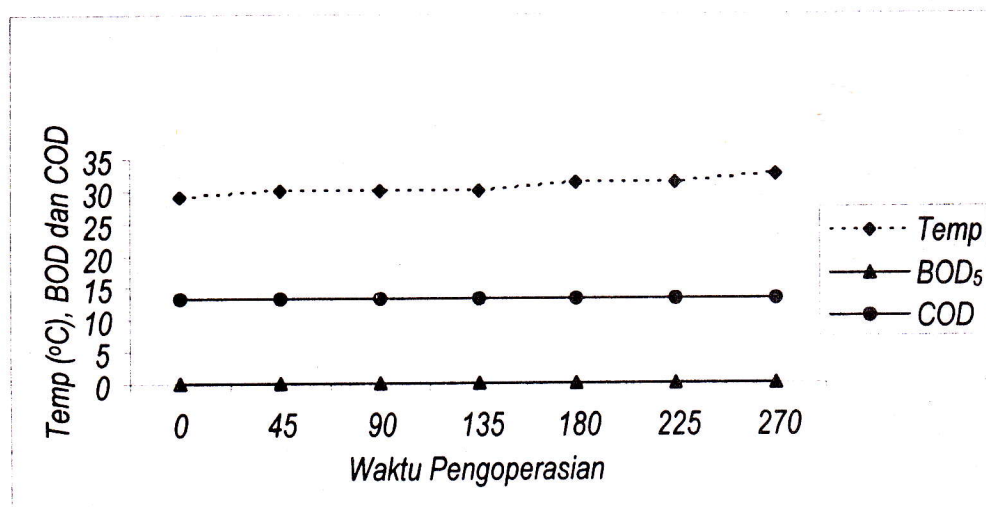
Pengaruh lama operasi terhadap BOD_5 dan COD

Dari Tabel 1. dan Gambar 3. nampak bahwa kadar BOD_5 dan COD air pendingin relatif tidak

berubah sebagai fungsi lama reaktor beroperasi. Fenomena ini menunjukkan bahwa jumlah kandungan zat organik dalam air pendingin primer relatif tetap/ tidak berubah, meskipun reaktor telah beroperasi cukup lama. Kondisi seperti itu dapat terjadi karena sistem pendingin primer Reaktor Kartini dilengkapi dengan sistem pemurnian air yang dilengkapi dengan *skimmer*, *filter* maupun demineraliser, sehingga kemurnian air pendingin primer selalu terjaga.

Kadar DO , BOD_5 , dan COD ditinjau dari baku mutu.

Dari Tabel 1. juga nampak bahwa kadar DO dalam air pendingin reaktor mencapai 7,88 mg/l, lebih besar dari batas minimal Baku Mutu yang berlaku. Bahkan cenderung meningkat sebanding dengan lamanya reaktor beroperasi. Sementara itu kadar BOD_5 dan COD relatif tetap, hampir tidak terpengaruh lamanya reaktor beroperasi, dengan nilai rerata masing-masing adalah 0,0357 mg/l dan 13,249 mg/l. Jika nilai BOD_5 dan COD tersebut dibandingkan dengan batas maksimum BOD_5 dan COD limbah cair yang diperkenankan, yakni 20 mg/l dan 40 mg/l, maka nilai BOD_5 dan COD air pendingin Reaktor Kartini jauh di bawah batas ambang maksimum yang diperkenankan.



Gambar 3. Grafik pengaruh lama operasi reaktor terhadap kadar BOD_5 dan COD

5. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kadar oksigen terlarut (*DO*) dalam air pendingin Reaktor Kartini meningkat sebagai fungsi lama operasi reaktor.
2. Kenaikan temperatur air pendingin dari 29°C menjadi $\approx 32^\circ\text{C}$ yang secara teoritis menurunkan kadar *DO*, ternyata tidak terjadi dalam sistem reaktor nuklir, karena pada saat yang bersamaan proses radiolisis akibat radiasi meningkatkan kadar oksigen terlarut; dan faktor radiolisis lebih dominan daripada perubahan temperatur.
3. Pengaruh lama pengoperasian reaktor terhadap nilai rerata *BOD₅* dan *COD* relatif kecil (0,0357 mg/l dan 13,249 mg/l), jauh di bawah ambang batas yang diperkenankan.
4. Ditinjau dari kadar *DO*, *BOD₅*, dan *COD* nya, maka air pendingin Reaktor Kartini aman dibuang/terlepas ke lingkungan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju (P3TM) BATAN Yogyakarta dan Kepala Laboratorium

Unit Instalasi Pengolah Akhir Limbah Yogyakarta atas segala bantuan dan fasilitas yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

Daftar Pustaka

- Cember H., 1969., *Introduction to Health Physics*, 1st ed. Pergamon Press Ltd.,UK.
- Herkwanto, 1985., *Harga Air Reaktor Kartini.*, Skripsi FMIPA-UGM
- Lamarsh JR., 1972., *Introduction to Nuclear Reactor Theory.*, New York University.
- Shapiro J., 1990., *Radiation Protection* 3rded. Havard Univ. Press, Cambridge, UK
- Srikandi, F., 1992., *Polusi Air dan Udara.* Kanisius. Yogyakarta.
- Sunaryo, 1995., *Aspek Penelitian dan Pengembangan Kimia Air Pendingin Reaktor.*, *Prosiding Seminar ke-3 Teknologi dan Keselamatanm PLTN serta Fasilitas Nuklir.*, PPTKR-PRSG, Serpong.
- Taftazani A., 1981., *Kimia Air.*, Skripsi, Jurusan Teknik Nuklir FT-UGM.
- Wisnu S., 1984., *Kimiawi Zat Pendingin.*, Buku Petunjuk Supervisor Reaktor, BATAN.