

PENGARUH PENAMBAHAN AGREGAT PASIR SILIKAT PADA SEMENTASI LIMBAH URANIUM KONSENTRAT EVAPORATOR

Prayitno, Tri Suyatno, Nurimaniwathy dan Endro Kismolo

P3TM – BATAN

ABSTRAK

PENGARUH PENAMBAHAN AGREGAT PASIR SILIKAT PADA SEMENTASI LIMBAH URANIUM KONSENTRAT EVAPORATOR. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan pasir silikat pada sementasi limbah uranium konsentrat evaporator. Penelitian dilakukan dengan cara mencampur semen, air, limbah konsentrat evaporator dan pasir silikat dalam gelas beker 1000 ml. Pasta homogen yang diperoleh dimasukkan ke dalam tabung polyetilen yang mempunyai ukuran diameter dan tinggi 3,5 cm tinggi 4,0 cm, selanjutnya diperam selama 28 hari sehingga terbentuk blok monolit. Perbandingan antara air dan semen divariasi dari 0,35; 0,40; 0,45 dan 0,50. Limbah radioaktif konsentrat divariasi dari 2,0 % sampai 20 % dan penambahan pasir silikat divariasi dari 1,0 % sampai 5,0 %. Karakterisasi ketahanan tekan digunakan alat uji tekan Paul Webber pada kondisi sampel sebelum dan sesudah pemeraman lanjut selama lima tahun. Dari percobaan diperoleh kesimpulan bahwa penambahan agregat pasir silikat memperbaiki karakteristik ketahanan tekan monolit blok. Untuk pelindian selama lima tahun, monolit blok terbaik dicapai pada kondisi perbandingan A/S 0,40 dengan konsentrasi limbah konsentrat evaporator 10,0 %, pasir silikat 3,0 %, yaitu memberikan harga kuat tekan sebesar $4,425 \text{ N.mm}^{-2}$.

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF SILICATE SAND AGREGATE ADDITION ON THE CEMENTATION OF CONCENTRATE EVAPORATOR URANIUM WASTES. The aim of the experiment was to know the influence of silicate sand agregate additive on the immobilisation of uranium evaporator concentrate wastes. The experiment was conducted by mixing cement, water, wastes of evaporator concentrate and silicate sand in the beaker glass of 1000 ml. Followed by stirring the mixture up to homogenous phase of paste was obtained. The homogenous phase of paste was then put into polietylene tube with the size of 3.5 cm in diameter and 4.0 cm in height and was cured for 28 days, so that the monolith block was formed. The water to cements ratio in the experimented were 0,28; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45 and 0,50. Concentrate radioactive waste was varied from 2.0 % to 20.0 % of total weight and the number of silicate sand was added were 1.0 % to 5.0 % . Characterization of compressive strength characterized by Paul Webber compressively tested on the condition sample after and before five years cured. From the experiment can be deduced was showed that agregate silicate sand additives was improved compressive strength block monolith. For the leaching test on five years, the best monolith block was achieved on ratio water to cement 0.4, concentration of evaporator concentrate wastes 10.0 %, and silicate sand agregate added was are 3.0 %, was to gave compressive strength of 4.425 N.mm^{-2} .

Key Words : Concentrate Evaporator Uranium Waste – Cementation Metodes

PENDAHULUAN

Kualitas monolit blok hasil proses sementasi limbah radioaktif konsentrat evaporator selain dipengaruhi sifat-sifat kimia dari bahan dasar serta komposisi oksida dari bahan pembentuk semen, maka konsentrasi limbah dan penambahan aditif sangat berpengaruh terhadap monolit yang dihasilkan. Semen portland banyak digunakan sebagai bahan utama dalam

solidifikasi limbah radioaktif aktivitas rendah sampai sedang karena selain harganya murah, prosesnya sangat sederhana. Senyawa penyusun semen yang paling berpengaruh dalam reaksi hidrasi semen ketika bercampur dengan air antara lain : trikalsium aluminat C_3A atau $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, trikalsium silikat C_3S atau $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, dikalsium silikat C_2S atau $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ dan tetrakalsium aluminat C_4AF atau

$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Produk dari reaksi hidrasi semen akan menghasilkan monolit blok yang keras dan mempunyai karakteristik dan sifat kungkung yang sangat tinggi⁽¹⁾.

Dalam proses hidrasi semen, senyawa C_3A berhidrasi sangat cepat disertai pelepasan sejumlah panas dan memberikan kekuatan awal setelah 24 jam, namun kurang tahan terhadap agresi oleh asam yang dapat menimbulkan abrasi bagian permukaan monolit dan retak beton. Hidrasi C_3S akan menghasilkan pengerasan dan pelepasan sejumlah panas dalam beberapa jam hingga monolit berumur 14 hari pertama. Sedangkan C_2S reaksi hidrasinya berjalan perlahan disertai pelepasan panas sehingga berpengaruh pada pengerasan setelah monolit berumur 14 hari sampai mencapai umur 28 hari sebagai kekuatan akhir. Oleh karena itu semen yang mempunyai proporsi C_2S banyak akan lebih tahan dan mengurangi pengaruh agresi kimia dan susut kering. Untuk senyawa C_3AF kurang penting keberadaannya karena tidak tampak pengaruhnya terhadap proses pengerasan dan kekuatan dari pasta semen. Pada hidrasi semen akan dihasilkan jel kalsium silikat hidrat atau C-S-H gel yang merupakan butiran sangat halus dengan luas permukaan sangat tinggi dan kalsium hidroksida sebagai kapur bebas yang pada reaksi lanjutan yang dapat mengikat CO_2 membentuk kalsium karbonat atau disebut proses karbonasi, yang apabila terjadi berlebihan akan menjadi penyebab adanya proses pengembangan "swelling" beton yang akhirnya dapat mengurangi sifat kekekalan^(2,3).

Pada reaksi berikutnya, pasta semen yang terdiri dari jel kalsium hidroksida, air, sisa-sisa semen yang tidak bereaksi, kristal-kristalnya akan membentuk suatu rangkaian tiga dimensi yang saling melekat random dan sedikit demi sedikit akan mengisi ruang yang semula ditempati oleh air, pasta menjadi kaku dan mengeras membentuk monolit. Rentan waktu antara menjadi keras dan penutupan pori oleh senyawa sisa hasil reaksi dapat dimanfaatkan untuk mengungkung limbah radioaktif secara random, sehingga radionuklida uranium akan terjepit/ terkungkung di antara butiran semen yang mengeras atau terdapat dalam pori yang terbentuk^(3,4,7).

Pengurangan jumlah air dalam reaksi hidrasi dapat terjadi karena selama reaksi hidrasi semen terjadi pelepasan panas reaksi yang tidak merata dan terjadi "flas-set" atau karena adanya proses sorpsi oleh adanya senyawa silikat yang berlebihan sehingga $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terbentuk

sebagian terdesak keluar dari sistem ikatan semen selanjutnya membentuk lapisan tipis dipermukaan atau yang terikat dalam pori kapiler serta terjadinya pelepasan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dari permukaan pori monolit. Pelepasan air yang singkat akan menyebabkan kurangnya persediaan air dalam pori yang bermanfaat dalam reaksi hidrasi selanjutnya. Sedangkan pelepasan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ memang dapat menyebabkan terjadinya abrasi permukaan dalam pelindian, tetapi pori monolit yang ditinggalkan oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terisi oleh pasir silikat sehingga kekuatan monolit tetap dapat dipertahankan. Dampak negatif penambahan agregat pasir silikat adalah karena limbah radioaktif yang dikungkung mempunyai kecenderungan mudah menguap karena akan berpengaruh langsung terhadap ketersediaan air untuk keperluan reaksi hidrasi semen pada pengerasan awal selama 28 hari dan pada proses pengerasan lanjut^(5,6).

Monolit blok hasil sementasi limbah radioaktif dirancang untuk tahan dalam pengangkutan dan penyimpanan yang lama. Oleh karena itu penambahan agregat pasir silikat bertujuan untuk menambah kekuatan monolit blok yang dalam hal ini agregat dimaksudkan untuk bahan isi di dalam sistim adonan semen^(3,6). Sedangkan pengujian terhadap monolit blok hasil sementasi bertujuan untuk mengetahui karakteristik monolit dalam mengungkung limbah untuk kurun waktu yang lama. Dalam penelitian ini dilakukan terhadap sampel monolit blok hasil sementasi dengan waktu pemeraman dan pelindian tertutup selama lima tahun. Persyaratan yang harus dipenuhi oleh monolit hasil solidifikasi limbah radioaktif diantaranya harus memiliki kuat ketahanan tekan minimum sebesar $2,5 \text{ N/mm}^2$ setelah dibebani limbah^(5,8). Dengan menaikkan nilai ketahanan tekan monolit, diharapkan akan memperbaiki sifat ketahanan lindinya. Dengan memvariasi perbandingan air dan semen, konsentrasi limbah yang ditambahkan, konsentrasi agregat pasir silikat dan waktu pemeraman, akan diperoleh data karakteristik monolit blok meliputi sifat fisika dan sifat kimia monolit blok pada uji lindi dan akan diperoleh karakteristik kungkung monolit terhadap limbah radioaktif uranium cair fase air konsentrat evaporator.

METODE PERCOBAAN

Peralatan Yang Digunakan

Mixer tangan dan gelas beker digunakan untuk membuat adukan adonan benda uji

sementasi, tabung polyetilen digunakan untuk wadah adonan produk sementasi limbah dan wadah selama pemeraman awal dan pemeraman lanjut. Untuk karakterisasi kuat tekan monolit produk sementasi digunakan peralatan tekan Paul Webber.

Bahan Yang Digunakan

Semen Portland merk Nusantara diambil yang masih segar, agregat pasir silikat yang digunakan adalah pasir silikat standard E-Merck ukuran butir 120 mesh dengan kadar SiO₂ sebesar 65 % dan sebagai air hidrasi digunakan aquades. Limbah yang diolah diambil dari konsentrat hasil proses evaporasi limbah cair uranium fase air dengan aditif EDTA sebagai anti buih sebanyak 0,6 g/l volume limbah.

Cara Kerja

1. Preparasi limbah konsentrat
Limbah konsentrat evaporator yang dipergunakan adalah konsentrat yang dihasilkan dari proses evaporasi limbah radioaktif uranium cair fase air yang dengan bahan anti kerak EDTA sebanyak 0,6 g/l menggunakan proses vakum⁽⁹⁾. Limbah konsentrat tersebut terlebih dahulu diatur pH nya menjadi pH = 8 menggunakan natrium hidroksida teknis.
2. Penentuan harga perbandingan air dan semen
Dibuat adonan semen dan air dalam gelas beker pada perbandingan antara air dan semen 0,28; 0,30; 0,35; 0,35; 0,40; 0,45 dan 0,50. Adonan diaduk menggunakan pengaduk listrik sampai diperoleh campuran yang homogen, dimasukkan ke dalam botol poliethylen dan diperam selama 28 hari. Untuk menentukan perbandingan air dan semen terbaik dilakukan uji ketahanan tekan menggunakan alat uji tekan Paul Webber. Pada kondisi terbaik dari percobaan ini, dengan cara yang sama ke dalamnya ditambahkan agregat pasir silikat sebanyak 1,0 %, 2,0 %, 3,0 %, 4,0 % dan 5,0 % berat semen.
3. Penentuan pengaruh penambahan limbah konsentrat
Dibuat adonan yang terdiri dari semen, air, limbah konsentrat dan agregat pasir silikat. Beban limbah konsentrat divariasikan yaitu : 0

%, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %, 14 %, 16 % dan 20 %. Pembuatan adonan dilakukan dengan menuangkan limbah konsentrat, semen dan air kedalam gelas beker 1000 ml yang diikuti dengan pengadukan menggunakan mixer tangan sampai terbentuk adonan yang homogen. Adonan yang diperoleh dimasukkan ke dalam tabung polietilen dengan ukuran diameter 3,5 cm dan tinggi 4,0 cm untuk dilakukan pemeraman selama 28 hari dan lima tahun. Selanjutnya dilakukan uji ketahanan tekan menggunakan alat tekan Paul Webber.

4. Penentuan pengaruh penambahan agregat pasir silikat
Kondisi terbaik dari percobaan (1) dan (2), selanjutnya dengan cara yang sama dengan (1) dan (2), kedalam adonan ditambahkan agregat pasir silikat bervariasi yaitu 1,0 %, 2,0 %, 3,0 %, 4,0 % dan 5,0 %. Setelah pemeraman selama 28 hari dilakukan uji ketahanan terhadap semua sampel, dan uji yang sama terhadap sampel yang dilindi dalam aquades selama 5 tahun dan terhadap sampel yang hanya diperam selama 5 tahun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Perbandingan Air Dan Semen (A/S)

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa pada perbandingan air dan semen antara 0,28 sampai 0,35, nilai ketahanan tekan yang dihasilkan oleh monolit blok semakin besar, dan A/S di atas 0,35 nilai ketahanan tekannya akan menurun. Hal ini terjadi diduga karena reaksi hidrasi semen sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air yang ada dalam sistem hidrasi. Semakin sedikit jumlah air yang tersedia untuk hidrasi semen maka reaksi hidrasi akan tidak sempurna dan menyebabkan butiran semen tidak terhidrasi sempurna. Pada kondisi harga A/S semakin besar, atau air yang ditambahkan semakin besar maka nilai ketahanan tekan monolit blok yang dihasilkan menjadi semakin rendah. Hal ini terjadi karena air yang tersedia dalam sistem hidrasi semakin banyak, akibatnya terjadi *bleeding* dan banyak kapur bebas yang keluar dari pori ikatan semen atau monolit blok menjadi porous karena terlalu banyak air yang terjebak dalam monolit blok ketika adonan mengalami pengerasan awal dan karena monolit menjadi porous maka ketahanan tekannya menjadi rendah.

Tabel 1. Hasil kuat tekan monolit blok pada berbagai perbandingan A/S setelah pemeraman selama 28 hari, tanpa penambahan limbah dan agregat pasir silikat.

No	Ratio Air dan Semen (A/S)	Ketahanan Tekan (N.mm ⁻²)
01	0,28	30,575
02	0,30	31,705
03	0,35	35,226
04	0,40	36,235
05	0,45	31,705
06	0,50	27,176

Dari analisis data menunjukkan bahwa kuat tekan untuk sampel monolit blok dengan perbandingan air dan semen (A/S = 0,30 sampai A/S = 0,40) tidak menunjukkan adanya perbedaan yang bermakna pada tingkat keyakinan 95 % ataupun 90 %. Jadi dapat diambil kisaran harga perbandingan antara air dan semen untuk proses immobilisasi antara A/S = 0,3 sampai A/S = 0,4. Pada percobaan selanjutnya digunakan perbandingan air dan semen (A/S = 0,40).

Pengaruh Penambahan Agregat Pasir Silikat

Pengaruh penambahan agregat pasir silikat terhadap karakteristik ketahanan tekan monolit blok hasil sementasi dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada penambahan agregat pasir silikat 2,0 % sampai 3,0%, nilai ketahanan tekan yang dihasilkan oleh monolit blok adalah paling besar. Pada penambahan agregat pasir silikat di atas 3,0 % nilai ketahanan tekannya akan cenderung menurun. Hal ini terjadi karena agregat pasir silikat yang ditambahkan dalam keadaan kering, maka diduga keberadaan agregat pasir silikat dalam adonan semen mengganggu ketersediaan air yang ada dalam sistem hidrasi. Oleh karena itu maka semakin banyak agregat pasir silikat yang ditambahkan ke dalam adonan, nilai ketahanan tekannya cenderung menjadi turun. Seperti telah diduga di muka, agregat pasir silikat dapat menjadi bahan isi "Filler" pada pori yang terbentuk pada monolit baik akibat ekstraksi air keluar sistem hidrasi, maupun akibat ekstraksi kapur menuju lapisan muka monolit semen. Meskipun demikian agregat pasir silikat mampu memperbaiki karakteristik ketahanan tekan monolit blok secara keseluruhan.

Tabel 2. Pengaruh penambahan agregat pasir silikat terhadap karakteristik ketahanan tekan monolit blok sementasi pada kondisi : perbandingan air dan semen (A/S = 0,40) dan tanpa penambahan limbah.

No	Penambahan agregat (%) berat semen	Ketahanan Tekan (N.mm ⁻²)
01	0,0	36,235
02	1,0	38,241
03	2,0	40,146
04	3,0	39,765
05	4,0	38,272
06	5,0	37,754

Dari data percobaan tersebut maka percobaan selanjutnya diambil pada penambahan agregat pasir silikat sebanyak 3,0 %, karena pada kondisi tersebut memberikan nilai ketahanan tekan yang terbesar yaitu = 40,146 N.mm⁻².

Pengaruh Penambahan Limbah Konsentrat

Pengaruh penambahan limbah konsentrat evaporator terhadap karakteristik ketahanan tekan monolit blok hasil sementasi dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 dapat diperoleh informasi bahwa penambahan limbah konsentrat ke dalam adonan semen berpengaruh langsung terhadap karakteristik ketahanan tekannya. Semakin banyak limbah konsentrat yang ditambahkan ke dalam adonan, nilai ketahanan tekannya menjadi semakin rendah terutama terhadap monolit blok tanpa penambahan agregat pasir silikat. Hal ini terjadi dimungkinkan karena limbah konsentrat yang ditambahkan ke dalam adonan semen diduga dapat mengganggu reaksi hidrasi.

Keberadaan limbah konsentrat dalam adonan semen terutama dapat menimbulkan jarak antar partikel butiran semen menjadi lebar sehingga dapat menimbulkan pori pada monolit. Semakin banyak limbah konsentrat yang ditambahkan akan menyebabkan bertambahnya jumlah pori dan adanya pori monolit dan menyebabkan terjadinya kekeroposan monolit.

Kondisi yang demikian akan menyebabkan semakin turunnya kekuatan tekan blok monolit. Keadaan ini berbeda untuk sampel monolit yang ke dalamnya ditambahkan agregat pasir silikat, meskipun secara umum penambahan limbah konsentrat menurunkan nilai ketahanan tekannya, tetapi secara keseluruhan nilai ketahanan tekannya masih di atas monolit yang

tidak ditambah agregat pasir silikat. Hal ini diduga terjadi karena pori yang terbentuk terisi oleh agregat pasir silikat dan juga pasir silikat

diduga mampu menetralkan pengaruh sifat kimia limbah konsentrat yang dikungkung.

Tabel 3. Pengaruh penambahan limbah konsentrat terhadap karakteristik ketahanan tekan monolit blok pada kondisi : perbandingan air dan semen (A/S = 0,4), penambahan agregat pasir silikat = 3,0 % dan waktu pemeraman selama 28 hari dan 5,0 tahun.

Limbah konsentrat (%)	Ketahanan Tekan (N.mm ⁻²)			
	Pasir Silikat = 0,0 %		Pasir Silikat = 3,0 %	
	Pemeraman 28 Hari	Pemeraman 5 tahun	Pemeraman 28 Hari	Pemeraman 5 tahun
0,0	36,355	28,515	40,146	37,454
2,0	34,154	26,215	38,549	35,465
4,0	30,856	24,442	36,326	33,424
6,0	27,855	22,205	32,676	29,154
8,0	25,755	19,114	29,119	26,437
10,0	21,550	16,216	26,422	23,545
12,0	14,250	10,585	20,165	18,226
14,0	12,165	9,225	18,425	12,152
16,0	10,850	3,325	12,767	6,115
18,0	6,865	1,424	8,422	4,865
20,0	4,445	Retak	5,228	2,225

Dari percobaan diperoleh data bahwa penambahan limbah konsentrat maksimum adalah sebesar 10 % berat total adonan untuk sampel monolit yang tidak ditambah agregat pasir silikat, dan 14 % berat total adonan untuk sampel monolit yang kedalamnya ditambahkan agregat pasir silikat. Kondisi ini berlaku untuk semua sampel monolit dengan waktu pemeraman selama 28 hari dan lima tahun tanpa perlakuan pelindian.

Uji Pelindian Terhadap Karakteristik Monolit

Percobaan uji pelindian sampel monolit hasil sementasi limbah konsentrat evaporator dapat dilihat pada Tabel 4. Dari Tabel 4 diperoleh informasi bahwa agregat pasir silikat sangat berpengaruh terhadap karakteristik monolit hasil sementasi limbah konsentrat evaporator. Untuk beban limbah konsentrat yang sama, pada uji pelindian tertutup selama lima tahun, kondisi sampel monolit yang kedalamnya ditambahkan agregat pasir silikat relatif lebih stabil bila dibandingkan dengan sampel monolit yang tidak diberi agregat pasir silikat.

Sampel monolit yang tidak ditambahkan agregat pasir silikat, untuk pelindian selama lima tahun mempunyai kemampuan dibebani limbah konsentrat evaporator maksimum sebesar 2,0 % yaitu memberikan ketahanan tekan sebesar 2,622 N.mm⁻². Penambahan limbah konsentrat di atas 10 % mempunyai kecenderungan mengalami

kerusakan monolit pada pelindian yaitu mengalami retak semen dan akhirnya hancur.

Tabel 4. Pengaruh beban limbah konsentrat evaporator pada uji pelindian pada kondisi perbandingan air dan semen (A/S = 0,4) dalam media lindi aquades selama lima tahun.

Limbah konsentrat (%)	Ketahanan Tekan (N.mm ⁻²)	
	Pasir Silikat = 0,0 %	Pasir Silikat = 3,0 %
0,0	4,215	10,442
2,0	4,421	8,242
4,0	2,885	6,825
6,0	2,622	6,115
8,0	Retak	5,102
10,0	Retak	4,425
12,0	hancur	2,665
14,0	hancur	Retak
16,0	hancur	Retak
18,0	hancur	Hancur
20,0	hancur	Hancur

Sedangkan sampel monolit yang kedalamnya ditambahkan agregat pasir silikat, untuk pelindian selama lima tahun mempunyai kemampuan dibebani limbah konsentrat evaporator maksimum sampai sebesar 10 % yaitu memberikan ketahanan tekan sebesar 4,425 N.mm⁻². Kenyataan ini menunjukkan bahwa penambahan agregat pasir silikat mampu

mempertahankan kualitas monolit hasil sementasi limbah uranium konsentrat evaporator.

Kerusakan monolit dalam pelindian diperkirakan karena adanya intrusi air lindi ke dalam monolit, sehingga terjadi swelling dan akhirnya monolit dapat hancur apabila dalam pelindian terjadi abrasi monolit secara terus menerus akibat adanya ekstraksi Ca(OH)_2 keluar dari pori monolit. Penambahan agregat pasir silikat ke dalam monolit diharapkan mampu menjadi sorben apabila terjadi intrusi air lindi melalui pori monolit, tetapi apabila agregat mengalami jenuh air, justru terjadinya swelling monolit akan lebih hebat dan kehancuran monolit akan terjadi pada pelindian lanjut.

KESIMPULAN

Dari data percobaan dan pembahasan di atas dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa :

1. Pasir silikat dapat digunakan sebagai agregat dalam pembuatan monolit blok sementasi limbah uranium konsentrat evaporator.
2. Berdasarkan uji karakteristik ketahanan tekan monolit melalui proses pemeraman dan pelindian selama lima tahun, pasir silikat mampu mempertahankan kualitas monolit blok hasil sementasi limbah uranium konsentrat evaporator.
3. Kondisi terbaik untuk perbandingan air dan semen ($A/S=0,40$), beban limbah uranium konsentrat evaporator sebanyak 10,0 % berat adonan, penambahan agregat pasir silikat sebanyak 3,0 % berat semen. Pada pelindian selama lima tahun memberikan ketahanan tekan sebesar $4,425 \text{ N.mm}^{-2}$.

DAFTAR PUSTAKA

1. SURGENT & LUNDY ENGINEER, Low Level Radwaste Solidification, California, 1983.
2. BROWNSTEIN, M., R.G. LEVESQUE, Experience With Cement Usage as The Binding Agent For Radwaste, ASME Publication, New York, 1979.
3. ANTONO, Prof. Ir, Teknologi Beton, Fakultas Teknik Jurusan Sipil UGM, Yogyakarta, 1980.
4. ZANGE, E., SCHLENTER, M.; LASCHER, Immobilization of Waste-Water Residues By Embedding Into Concrete, IAEA-SM-261.

5. SUPARDI, Penelitian Fiksasi Resin Bekas Dengan Semen, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, ISSN 0216- 3128, PPNY-BATAN, 1988.
6. GARLEY MACAULY K.W., " Advanced Management Methodes for Medium Active Waste ", ISSN 0275-7273, 1981.
7. J.A. AYRES, " Decontamination Of Nuclear Reactors And Equipment ", Pacific Northwest Laboratory Battelle Memorial Institute, New York, 1982.
8. NEVILLE, AM, "Concrete Technology, Longman Science & Technical", Copublished in The United State with John Wiley & Sons, Inc, New York, 1987.
9. ENDRO KISMOLO, dkk, Pengaruh aditif garam silikat terhadap karakteristik Monolit Blok Hasil Sementasi Limbah Uranium Konsentrat Evaporator – Na silikat", Prosiding JASA KIAI, Yogyakarta, 2003

TANYA JAWAB

Wisjachudin Faisal

- *Apa kelebihanannya dengan penambahan agregat pasir silika dibandingkan dengan hanya pakai semen saja?*

Prayitno

- Aditif pasir silikat pada monolit blok hasil sementasi limbah konsentrat evaporator, dapat diperoleh monolit blok dengan karakteristik ketahanan tekan lebih tinggi jika dibandingkan tanpa aditif.

Djarot S.W.

- *Seberapa besar dampak agregat Si pada sementasi limbah U + konsentrat evaporator?*

Prayitno

- Untuk beban limbah lumpur konsentrat evaporator sampai 6,0%, agregat pasir silikat mampu meningkatkan karakteristik ketahanan tekan monolit rerata sampai 118,396%.
- Pada penambahan limbah lumpur konsentrat evaporator sampai 12,0%, agregat pasir silikat mampu mempertahankan monolitas blok monolit pada pelindihan.