

## PENGARUH KOMPOSISI BARIT DAN *FLY ASH* BATUBARA TERHADAP SEMENTASI LIMBAH RADIOAKTIF

Tri Sulistiyo Hari Nugroho<sup>1)</sup>, Susetyo Hario Putero<sup>2)</sup>, Kusnanto<sup>2)</sup>

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN Komplek Puspipstek Gd.50<sup>1)</sup>  
Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada<sup>2)</sup>

### ABSTRAK

PENGARUH KOMPOSISI BARIT DAN *FLY ASH* BATUBARA TERHADAP SEMENTASI LIMBAH RADIOAKTIF. Sementasi merupakan teknik pemadatan limbah radioaktif menggunakan bahan semen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari barit dan abu layang batubara pada kuat tekan dan hasil pelindian pada imobilisasi limbah  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ , juga untuk mendapatkan komposisi terbaik barit-pasir dan semen-fly ash. Variasi fly ash, yaitu 10%, 20%, 30% dan 40% dari total semen yang digunakan, sedangkan komposisi barit yang digunakan adalah 70%, 80%, 90%, dan 100% dari total pasir ditambah barit. Ukuran butir barit dan pasir yang digunakan adalah -40 mesh+70 mesh dan -40 mesh. Faktor air semen yang digunakan adalah 0,3. Benda uji dicetak bentuk silinder berukuran diameter 2,8 cm dan tinggi 5,6 cm. Pemeraman mortar selama 30 hari, kemudian dilakukan uji kuat tekan. Untuk mengetahui laju lindi dilakukan pelindian selama 21 hari pada media pelindi aquades, kadar stronsium yang terlindi dianalisis dengan alat Spektroskopi Serapan Atom (SSA) jenis Hitachi Zeeman 8000. Berdasarkan penelitian, komposisi fly ash dan barit tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan mortar. Kuat tekan tertinggi, yaitu  $(26,1123 \pm 0,7992) \text{ N/mm}^2$  diperoleh pada komposisi barit 70% dan fly ash 10%. Laju lindi pada hari ke-21 yaitu  $4,198 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ . Hasil uji kuat tekan dan laju lindi pada penelitian ini memenuhi standar dari IAEA.

Kata kunci : fly ash, barit, sementasi, limbah radioaktif cair, uji lindi, kuat tekan.

### ABSTRACT

*EFFECT OF BARITE AND COAL FLY ASH COMPOSITION TO RADIOACTIVE WASTE CEMENTATION. Cementation is the method of solidifying radioactive waste using cement. This research aims to determine the effect of barite and coal fly ash on compressive strength and leaching results in waste immobilization of  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ , also to get the best composition of barite-sand and cement-fly ash. Fly ash variations are 10%, 20%, 30%, and 40% from total cementitious material, whereas used barite composition 70%, 80%, 90%, and 100% from total sand plus barite. Grain size barite and sand used -40 mesh+70 mesh and -40 mesh. Water to cement ratio used 0,3. The specimen was casted into cylinder with 2.8 cm of diameter and 5.6 cm of height. Curing period during 30 days, then their compressive strength were investigated. To determine the leaching rate of leach carried out for 21 days in the medium of aquades, which leached strontium levels analyzed by Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) type Hitachi Zeeman 800. Based on the research, fly ash and barite composition produce no significant effect on compressive strength of mortar. Highest compressive strength  $(26,1123 \pm 0,7992) \text{ N/mm}^2$  obtained in the composition of barite 70% and fly ash 10%. The rate of leach on 21<sup>st</sup> days is  $4,198 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ . Compressive strength test results and leach test from this research is still compliance with IAEA standards.*

Keywords : fly ash, barite, cementation, liquid radioactive waste, leach test, compressive strength test

### PENDAHULUAN

Penelitian tentang pengaruh komposisi barit dan abu layang terhadap sementasi ini dilatarbelakangi oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Edi Septriyanto [1] dan Ayu Nur Latifah [2], sehingga penulis menggabungkan penelitian dari Edi Septriyanto [1] dan Ayu Nur Latifah [2] dengan mengombinasikan jenis material, komposisi material, dan media pelindiannya. Untuk itu akan dijelaskan apa itu semen, limbah yang digunakan, barit, dan sementasi di paragraf-paragraf selanjutnya.

Semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker terutama dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis (dapat mengeras jika bereaksi dengan air) dengan gips (*gypsum*) sebagai bahan

tambahan [3]. Pozolan adalah material yang mengandung silika atau alumino silika yang bentuknya halus dan berukuran kecil serta dengan adanya air, campuran pozolan dengan kalsium hidroksida memiliki sifat perekat seperti semen [2]. Pemakaian bahan tambahan pozolan ini mempunyai berbagai tujuan, diantaranya yaitu untuk mengurangi jumlah pemakaian bahan pengikat hidrolis (semen portland) dan memperbaiki mutu campuran mortar semen [4]. Menurut SNI S-15-1990-F tentang spesifikasi abu terbang sebagai bahan tambahan untuk campuran beton, abu batubara (abu layang) digolongkan menjadi 3 jenis, yaitu [5] :

1. Kelas F : Abu terbang (abu layang) yang dihasilkan dari pembakaran batubara jenis *antrasit*, pada suhu  $1560^\circ\text{C}$

2. Kelas C : Abu terbang (abu layang) yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis lignit atau batubara dengan kadar karbon sekitar 60%. Abu terbang ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10%.
3. Kelas N, ialah hasil kalsinasi dari pozolan alam, seperti tanah *diatomice*, *shole*, *tuft*, dan batu apung.

Barit memiliki berat jenis sebesar 4,3-4,6 g/cm<sup>3</sup>, sehingga termasuk jenis mineral berat. Dengan tingkat kekerasan 3-3,5 barit memiliki tingkat keuletan yang mudah rapuh (*brittle*). Meskipun mengandung logam berat barium, barit secara kimia tidak beracun karena sifatnya yang sangat tidak larut dalam air dan tidak reaktif [1].

Stronsium non radioaktif dan yang radioaktif memiliki kesamaan secara fisik dan kimia. Stronsium-90 memancarkan partikel beta, tanpa radiasi gamma, dan meluruh menjadi yttrium-90 (pemancar beta). Ketika stronsium-90 meluruh mengeluarkan radiasi dan berubah menjadi yttrium-90, dan meluruh kembali menjadi zirconium stabil. Umur paro dari yttrium-90 sebesar 64 jam. Stronsium-90 berada dalam bentuk berbagai senyawa dan mudah menyebar ke lingkungan [6].

Pada umumnya limbah radioaktif dibagi berdasarkan bentuk fisiknya dan tingkat aktivitasnya, diantaranya adalah [9] :

1. Limbah Cair  
Kebanyakan berasal dari instalasi pengolahan ulang bahan bakar bekas, seperti limbah cair dari sistem ekstraksi siklus utama pada proses iradiasi bahan bakar. Contoh lain adalah air cucian benda padat yang terkontaminasi cairan zat radioaktif yang sengaja dibuang baik untuk suatu percobaan atau sisa, cairan dari instalasi pengolahan uranium atau pabrik yang menggunakan zat radioaktif.
2. Limbah Gas  
Seperti udara dan *aerosol* dari kegiatan tambang uranium. Limbah ini biasanya mengandung radionuklida beterbangan seperti <sup>85</sup>Kr, <sup>3</sup>H, dan <sup>131</sup>I.
3. Limbah Padat  
Peralatan bekas dari instalasi pemurnian uranium, peralatan bekas dari penanganan zat radioaktif dan dari peralatan serta struktur yang terkontaminasi.

Limbah radioaktif ini sebelum dilepas ke lingkungan terlebih dahulu dilakukan pengelolaan limbah radioaktif. Salah satu proses pengelolaan limbah radioaktif adalah imobilisasi. Imobilisasi adalah proses mengubah bentuk limbah menjadi bentuk padat untuk mengurangi kemampuan pindah (migrasi) atau penyebaran (dispersi) radionuklida karena proses alamiah selama penyimpanan, pengangkutan, dan

pembuangan. Tujuan imobilisasi adalah agar radionuklida dalam limbah tidak dapat larut atau terekstrak kembali oleh air dan tidak menyebar ke lingkungan [6]. Salah satu metode imobilisasi adalah sementasi. Sementasi adalah proses imobilisasi limbah radioaktif dengan matriks semen untuk membentuk padatan yang stabil agar radionuklida dalam limbah tidak dapat larut sehingga mampu mencegah penyebaran zat radioaktif ke lingkungan. Pada umumnya sementasi digunakan untuk imobilisasi limbah radioaktif cair aktivitas rendah dan menengah yang tidak mengandung aktinida dan radionuklida berumur paro panjang.

Sementasi merupakan salah satu teknik pemadatan limbah radioaktif cair. Pada penelitian sementasi ini dilakukan sedikit perubahan pada komposisi campurannya, yaitu dengan penambahan abu layang batubara dan substitusi antara pasir dan barit. Hal ini dilakukan karena dengan penambahan abu layang diyakini dapat menambah kekuatan tekan dari mortar. Sedangkan alasan substitusi barit dengan pasir adalah dikarenakan keinginan untuk mengetahui pengaruh dari barit tersebut terhadap kuat tekan mortar dan laju lindi mortar. Pemilihan bahan barit karena barit memiliki kemampuan sebagai perisai radioaktif [6] dan memiliki densitas tinggi yang dapat menaikkan nilai kuat tekan mortar [7]. Kualitas dari hasil sementasi ditentukan oleh komposisi bahan penyusun mortar semen. Pada komposisi yang tepat, bahan penyusun tersebut dapat memberikan kontribusi yang baik pada densitas, porositas, dan integritas mortar semen [7]. Abu layang batubara mengandung SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang cukup tinggi sehingga abu layang batubara memenuhi kriteria sebagai bahan yang memiliki sifat semen/pozzolan [8]. Suatu jumlah tertentu air diperlukan untuk memberi aksi kimiawi dalam pengerasan beton, kelebihan air memudahkan pekerjaan tetapi menurunkan kekuatan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari barit dan abu layang batubara pada kuat tekan dan hasil pelindian pada imobilisasi limbah Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, juga untuk mendapatkan komposisi terbaik barit-pasir dan semen-abu layang.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi lebih jelas akan pengaruh dari abu layang dan barit pada komposisi sementasi limbah radioaktif cair.

## METODOLOGI

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain

1. Semen Portland tipe 1.
2. Pasir -40 mesh, barit -40/+70 mesh, abu layang batubara PLTU Cilacap.

3. Air.
4. Aquades.
5. Kristal  $Sr(NO_3)_2$  dengan spesifikasi:
  - Kemurnian 99%
  - Pro analisis (pa)
  - $M = 211,63 \text{ g/mol}$
  - Buatan Merck KGaA Jerman

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Gelas Beker 500 ml dan gelas ukur 100 ml
2. Pipet 10 ml dan Pipet pump
3. Corong  $60^\circ$
4. Neraca digital dan neraca ohaus
5. Spatula
6. Bejana tempat pengadukan campuran
7. Pengaduk adonan
8. *Ball mill*
9. Ayakan 40 mesh, 50 mesh, 70 mesh, dan 100 mesh
10. Masker dan sarung tangan
11. Botol, tali kenur, dan potongan kardus
12. Pot polietilen dan pipa paralon
13. Gunting, lakban, dan amplas
14. Mesin uji tekan *Control Testing Machine*
15. SSA jenis Hitachi Zeeman 8000

Pengambilan data untuk dilakukan uji tekan dan uji lindi pada setiap variasi abu layang dan barit adalah 3 sampel mortar pada setiap variasi untuk uji tekan dan 1 sampel mortar yang memiliki kuat tekan terbaik untuk dilakukan uji lindi.

Data yang didapat dari uji tekan adalah berupa nilai beban maksimum. Nilai beban maksimum dari masing-masing mortar dikonversi terlebih dahulu menjadi nilai kuat tekan. Perhitungan kuat tekan menggunakan persamaan:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (1)$$

dengan,

$\sigma_t$  = kuat tekan ( $N/mm^2$ )

F = beban maksimum (N)

A = luas penampang benda uji ( $mm^2$ )

Hasil kuat tekan dari setiap variasi dihitung nilai reratanya. Nilai rerata tersebut kemudian dibuat grafik hubungan antara nilai kuat tekan dengan perubahan barit dan grafik hubungan antara nilai kuat tekan dengan penambahan abu layang batubara. Hasil grafik tersebut dianalisis untuk menemukan pengaruh dari barit dan abu layang tersebut terhadap nilai kuat tekannya.

Pengujian uji lindi pada sampel didapatkan data berupa nilai absorbansi dari cuplikan. Nilai absorbansi ini kemudian dikonversi menjadi nilai laju lindi. Untuk mendapatkan nilai laju lindi terlebih dahulu dilakukan pengujian larutan standar stronsium dengan konsentrasi 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, dan 25 ppm menggunakan *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS) untuk mendapatkan nilai absorbansinya. Dibuat grafik absorbansi larutan standar, lalu dilakukan regresi untuk mendapatkan persamaan regresinya yang akan digunakan untuk mendapatkan hubungan antara absorbansi dengan nilai konsentrasi. Selanjutnya dapat diketahui nilai konsentrasi dari masing-masing cuplikan.

Untuk menentukan nilai laju lindi berdasarkan konsentrasi larutan menggunakan persamaan:

$$R = \frac{c}{c_0} \times \frac{W}{S \times t} \quad (2)$$

$$S = (0,5\pi D^2) + (\pi Dh) \quad (3)$$

dengan,

R = laju lindi ( $g \cdot cm^{-2} \cdot hari^{-1}$ )

C = konsentrasi pada waktu t (ppm)

$C_0$  = konsentrasi awal sebelum diambil cuplikan (ppm)

W = berat mortar (gram)

S = luas permukaan cuplikan ( $cm^2$ )

t = lama waktu pelindian (hari).

D = diameter mortar (cm)

h = tinggi mortar (cm)

Langkah berikutnya adalah membuat grafik hubungan antara laju lindi dengan hari. Analisis data kuat tekan dan laju lindi untuk mendapatkan kesimpulan secara umum dan menyeluruh.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan data seperti yang tertera pada Tabel 1. Kuat tekan rerata tertinggi terdapat pada komposisi 70 % barit dan 10 % abu layang, yaitu  $26,1123 \pm 0,7992$  N/mm<sup>2</sup>. Sedangkan kuat tekan rerata terendah pada

komposisi 100 % barit dan 30 % abu layang, yaitu  $17,4947 \pm 4,2059$  N/mm<sup>2</sup>. Nilai kuat tekan terendah pada penelitian ini masih sesuai dengan standar IAEA.

Tabel 1. Kuat tekan rerata mortar

Abu Layang	Kuat Tekan Rerata (N/mm <sup>2</sup> )			
	100 % Barit	90 % Barit	80 % Barit	70 % Barit
0 %	20,3499 ± 1,5908	-	-	-
10 %	18,0138 ± 2,7258	24,2434 ± 4,5734	22,8937 ± 4,5379	26,1123 ± 0,7992
20 %	22,5303 ± 3,0611	21,2844 ± 4,0171	19,3117 ± 2,4723	22,9975 ± 1,6653
30 %	17,4947 ± 4,2059	20,0904 ± 3,3728	22,2188 ± 3,6535	20,4019 ± 3,3728
40 %	21,7516 ± 0,1798	20,1942 ± 2,8562	23,7243 ± 5,5508	19,0002 ± 2,0366

Kuat tekan yang didapatkan dari penambahan pozolan abu layang ini akan mengalami penurunan. Pengalaman selama penelitian didapatkan bahwa semakin banyak pozolan (abu layang) yang ditambahkan, proses pengadukan menjadi semakin mudah. Semakin mudah dalam pengadukan menjadikan proses homogenisasi menjadi lebih baik. Akan tetapi, pengadukan yang lebih mudah juga mengindikasikan bahwa kadar air di dalam adonan juga semakin banyak. Hal ini menyebabkan nilai kuat tekan menjadi turun.

Hal tersebut dilihat pada sudut pandang abu layang pada mortar. Sudut pandang yang kedua adalah kuat tekan dilihat dari perubahan komposisi barit pada mortar. Komposisi 10 % dan 20 % abu layang menunjukkan kuat tekan tertinggi terdapat pada komposisi 70 % barit, sedangkan pada komposisi 30 % dan 40 % abu layang nilai kuat tekan tertinggi terdapat pada komposisi 80 % barit. Hal tersebut dikarenakan tidak meratanya penampang mortar sehingga mempengaruhi pembacaan kuat tekan pada mortar dan homogenisasi pada pengadukan adonan mortar. Pengadukan adonan yang tidak merata mengakibatkan bahan tertentu mengumpul di salah satu bagian tertentu pada mortar, sehingga nilai kuat tekan sangat dipengaruhi oleh bagian mortar yang mengalami pusat pembebanan. Terjadinya ketidamerataan adonan dapat diakibatkan oleh densitas dari

bahan pengisi yang berbeda. Bahan pengisi pada penelitian ini adalah substitusi pasir dengan barit. Nilai densitas barit yang jauh lebih besar dibandingkan densitas pasir mengakibatkan sulitnya homogenisasi antara pasir dan barit meskipun rentang ukuran butirnya tidak berbeda jauh. Nilai densitas dari masing-masing bahan penyusun mempengaruhi nilai densitas mortar.

Berdasarkan hasil *two-way* ANOVA diperoleh hasil perhitungan yang dapat disajikan seperti pada Tabel 2 berikut.

Berdasarkan tabel analisis *two-way* ANOVA di atas, *p-value* dari variasi abu layang dan komposisi barit lebih besar dari level toleransi ( $\alpha$ ) = 5%. Nilai *p* interaksi juga lebih besar dari level toleransi 5%. Disimpulkan kedua variasi tersebut tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan dan tidak ada pengaruh interaksi antara barit dan abu layang terhadap kuat tekan mortar.

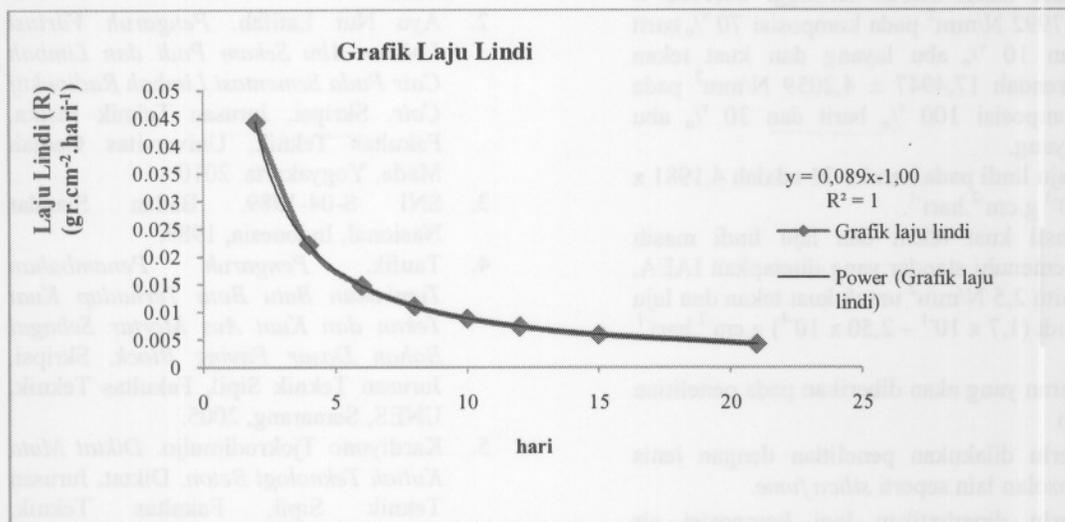
Nilai kuat tekan terendah adalah  $17,4947 \pm 4,2059$ , sudah memenuhi standar yang diterapkan IAEA, yaitu 2,5 N/mm<sup>2</sup> pada umur 28 hari. Standar ini adalah nilai kuat tekan mortar yang telah dibebani oleh limbah. Mortar yang digunakan dalam uji lindi adalah mortar yang memiliki nilai kuat tekan tertinggi karena untuk memenuhi tujuan penelitian ini, yaitu menentukan komposisi campuran yang terbaik. Hasil data laju lindi divisualisasikan dengan Tabel 3 dan Gambar 1.

Tabel 2. Hasil keluaran two-way ANOVA untuk kuat tekan

Variasi	F	p-value	Hasil
Abu layang	1,38	0,267	H <sub>0</sub> diterima, H <sub>1</sub> ditolak
Barit	1,08	0,372	H <sub>0</sub> diterima, H <sub>1</sub> ditolak
Interaksi	1,64	0,144	H <sub>0</sub> diterima, H <sub>1</sub> ditolak

Tabel 3. Hasil Uji Lindi

Hari	Laju Lindi (R) (g.cm <sup>-2</sup> .hari <sup>-1</sup> )
2	0,04424367
4	0,02221329
6	0,01477998
8	0,01106092
10	0,008816
12	0,00736111
15	0,00586578
21	0,0041981



Gambar 1. Laju lindi mortar

Terlihat bahwa laju lindi mortar semakin lama semakin menurun. Hasil uji lindi penelitian ini menghasilkan laju lindi pada hari ke- 21 adalah  $4,198 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$  dan pada hari ke- 91 adalah  $0,978 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$  (hasil ekstrapolasi).

Pengujian untuk kuat tekan dan laju lindi memiliki keterikatan sehingga diperlukan kecermatan di dalam pemilihan mortar yang akan dilakukan uji lindi untuk dapat memenuhi tujuan awal penelitian. Penelitian ini melakukan uji lindi pada mortar yang memiliki kuat tekan tertinggi. Mortar yang memiliki nilai kuat tekan

tertinggi dimungkinkan juga memiliki nilai laju lindi yang rendah. Hal ini dikarenakan nilai kuat tekan yang tinggi memiliki kemungkinan jumlah pori pada mortar yang lebih sedikit. Banyaknya pori yang terdapat pada mortar akan mengurangi nilai kuat tekan mortar. Selain itu, banyaknya pori pada mortar juga akan mempengaruhi nilai laju lindi. Mortar yang memiliki pori yang lebih banyak dapat memudahkan pelindi (aquades) masuk ke dalam mortar kemudian kontak dengan limbah  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  dan mengeluarkan limbah dari padatan mortar dan mengontaminasi media pelindi. Banyaknya  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  yang keluar dari mortar akan menaikkan nilai laju lindi.

Hasil uji lindi masih sesuai dengan standar laju lindi yang ditetapkan IAEA, yaitu  $(1,7 \times 10^{-1} - 2,50 \times 10^{-4}) \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$  [10].

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Komposisi campuran abu layang-semen dan campuran barit-pasir tidak berpengaruh terhadap kuat tekan mortar.
2. Interaksi antara komposisi campuran abu layang-semen dan komposisi campuran barit-pasir tidak memberikan pengaruh terhadap kuat tekan mortar.
3. Kuat tekan mortar tertinggi 26,1123  $\pm$  0,7992  $\text{N/mm}^2$  pada komposisi 70 % barit dan 10 % abu layang dan kuat tekan terendah 17,4947  $\pm$  4,2059  $\text{N/mm}^2$  pada komposisi 100 % barit dan 30 % abu layang.
4. Laju lindi pada hari ke-21 adalah  $4,1981 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ .
5. Hasil kuat tekan dan laju lindi masih memenuhi standar yang ditetapkan IAEA, yaitu  $2,5 \text{ N/mm}^2$  untuk kuat tekan dan laju lindi  $(1,7 \times 10^{-1} - 2,50 \times 10^{-4}) \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$

Saran yang akan diberikan pada penelitian ini adalah

1. Perlu dilakukan penelitian dengan jenis pozolan lain seperti *silica fume*.
2. Perlu diperhatikan lagi komposisi air dalam adonan jika dilakukan penambahan pozolan.
3. Pengadukan adonan harus lebih diperhatikan agar proses homogenisasi lebih baik.
4. Dilakukan uji lindi pada mortar yang akan diuji tekan untuk mengetahui kuat tekan mortar setelah dilakukan pelindian.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada dosen-dosen Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dasar-dasar keilmuan di bidang nuklir dan teknik secara umum, khususnya kepada sesama penulis Bapak Susetyo Hario Putero dan Bapak Kusnanto, yang tak lain dan tak bukan juga merupakan dosen Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada. Terima kasih juga kepada staf, laboran, dan penjaga di Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada yang banyak membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Tidak lupa juga, penulis ucapkan terima kasih kepada rekan-rekan kerja di PTLR, khususnya Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi, yang telah mendorong penulis untuk membuat makalah ilmiah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Edi Septriyanto. *Pengaruh Variasi Jenis Mineral dan Ukuran Butir Bahan Pengisi Terhadap Hasil Sementasi Limbah Radioaktif Cair pada Lingkungan Bergaram*. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
2. Ayu Nur Latifah. *Pengaruh Variasi Volume Abu Sekam Padi dan Limbah Cair Pada Sementasi Limbah Radioaktif Cair*. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
3. SNI S-04-1989, Badan Standar Nasional, Indonesia, 1989.
4. Taufik. *Pengaruh Penambahan Tumbukan Batu Bata Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Aus Mortar Sebagai Bahan Dasar Paving Block*. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNES, Semarang, 2005.
5. Kardiyono Tjokrodinuljo. *Diktat Mata Kuliah Teknologi Beton*. Diktat. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 1996.
6. Susetyo Hario Putero. *Diktat Mata Kuliah Pengelolaan Limbah Radioaktif*. Diktat, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2006.
7. Muhammad Yusuf. *Pengaruh pH Limbah pada Sementasi Limbah Radioaktif di Lingkungan Bergaram*.

- Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
8. Fauzi Rahmanullah. *Material dan Konstruksi: Agregat kasar*. Jurusan Pendidikan Arsitektur. Diakses dari [www.upi.edu](http://www.upi.edu), 23 Desember 2010.
  9. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. *Ketentuan Keselamatan Radiasi. Pelatihan Proteksi Radiasi Bagi Pegawai Baru*, BATAN, 2008.
  10. Siswanto Hadi, Mardini, dan Suparno. *Karakterisasi Kualitas Lmbah Hasil Sementasi*. Laporan Penelitian, Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2006, PTLR-BATAN, Tangerang, 2006.