



Pengaruh Gradasi Pasir Terhadap Kekuatan Tekan Mortar dalam Perencanaan Sementasi Limbah Radioaktif

Hermawan Puji Yuwana¹ dan Sugeng Purnomo²

¹Direktorat Pengaturan Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif,
BAPETEN

²Instalasi Pengelolaan Limbah Nuklir, Dit. Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran,
BRIN

e-mail: h.puji@bapeten.go.id

Makalah Penelitian

Menyerahkan

11 Oktober 2022

Diterima

24 November 2022

Terbit

5 Desember 2022

ABSTRAK

Pemanfaatan tenaga nuklir dari berbagai bidang kehidupan akan menghasilkan limbah radioaktif. Pengelolaan limbah radioaktif dilakukan sesuai dengan jenis dan karakteristik dari limbah radioaktif itu sendiri. Imobilisasi merupakan salah satu contoh metode dalam pengelolaan limbah radioaktif melalui proses pemadatan (solidifikasi) limbah dengan matriks tertentu untuk mengikat dan mengungkung radionuklida. Metode sementasi merupakan salah satu jenis teknologi dari metode imobilisasi limbah radioaktif yang sudah digunakan secara komersil dan terbukti layak digunakan. Komponen utama penyusun dalam sementasi adalah mortar. Penulisan makalah ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh gradasi agregat halus (pasir) terhadap kuat tekan mortar yang dihasilkan. Metodologi penelitian dilakukan secara eksperimental. Terdapat 3 jenis agregat halus (pasir) yang digunakan dengan kode IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3. Agregat halus (pasir) telah diperiksa baik kandungan lumpur (material lebih kecil dari ukuran 0,075 mm), kandungan organik, berat jenis, dan analisa gradasi pasir, dan modulus halus butir (MHB). Dari hasil pengujian, gradasi agregat halus (pasir) berturut-turut untuk IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3 adalah pasir agak kasar, pasir agak kasar, dan pasir halus. Modulus Halus Butir (MHB) dari 3 jenis agregat halus (pasir) ini adalah 2,58, 2,46, dan 1,8. Hanya agregat halus (pasir) IPLN 3 yang nilai MHB berada di luar dari kriteria keberterimaan ASTM C33 yang berkisar pada 2,3 – 3,1. Nilai kuat tekan optimum yang didapatkan dengan 3 jenis variasi agregat halus (pasir) IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3 berturut-turut adalah 10,292, 9,411, dan 6,026 MPa.

Kata Kunci: limbah radioaktif, sementasi, pasir, gradasi, mortar, kuat tekan

ABSTRACT

Utilization of nuclear energy from various fields of life will produce radioactive waste. Radioactive waste management is carried out according to the type and characteristics of the radioactive waste. Immobilization is an example of a method for managing radioactive waste through compacting or solidifying the waste with a specific matrix to bind and contain the radionuclides. The cementation method is a type of technology for the radioactive waste immobilization method that has been used commercially and proven suitable for use. The main component of cementation is the mortar. This paper aims to determine the effect of fine aggregate (sand) gradation on the compressive strength of the resulting mortar. The research methodology was carried out experimentally. Three types of fine aggregate (sand) are used with IPLN 1, IPLN 2, and IPLN 3 codes. Fine aggregate (sand) has been examined for both silt content (material smaller than 0.075 mm in size), organic content, specific gravity, analysis sand gradation, and fine grain modulus (MHB). From the test results, the fine aggregate (sand) gradations for IPLN 1, IPLN 2, and IPLN 3 are slightly coarse sand, little coarse sand, and fine sand. The fine grain modulus (MHB) of the three types of fine aggregate (sand) are 2.58, 2.46, and 1.8. Only fine aggregate (sand) IPLN 3, whose MHB value is outside the ASTM C33 acceptance criteria, ranges from 2.3 to 3.1. The optimum compressive strength values obtained with three types of fine aggregate (sand) variations, IPLN 1, IPLN 2, and IPLN 3, respectively, were 10.292, 9.411, and 6.026 MPa.

Keywords: radioactive waste, cementation, sand, gradation, mortar, compressive strength

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan pada Undang-Undang No. 10 Tahun 1997, tenaga nuklir merupakan tenaga dalam bentuk apapun yang dibebaskan dalam proses transformasi inti termasuk tenaga dari sumber radiasi pengion [1]. Publik/ masyarakat umum masih sering memiliki persepsi nuklir sebagai suatu bom atau pembangkit listrik tenaga nuklir. Padahal nuklir tidak hanya terbatas pada 2 istilah itu saja. Dari waktu ke waktu, tenaga nuklir telah dimanfaatkan dalam berbagai macam kegiatan atau aspek kehidupan yang ada di sekitar kita. Pada beberapa peraturan perundangan, pemanfaatan nuklir dapat digunakan mulai dari penelitian, pengembangan, produksi, pengangkutan, penggunaan, ekspor, impor, hingga pengolahan limbah radioaktif [1]. Jika hanya berfokus pada ketentuan dalam peraturan, publik/masyarakat umum cenderung memang akan lebih susah dalam mendeskripsikan seperti apa pemanfaatan tenaga nuklir tersebut. Secara umum akan lebih familiar bahwa pemanfaatan tenaga nuklir dapat digunakan dalam beberapa bidang seperti industri (seperti *gauging* dapat ditemui dalam industri kertas, makanan, atau minuman), kesehatan (dapat ditemui dalam pemeriksaan sinar-x di suatu fasilitas kesehatan seperti rumah sakit), pertanian (seperti pemuliaan bibit tanaman seperti beras, sorgum, dll), penelitian dan pengembangan di laboratorium, dan masih banyak lagi pemanfaatan yang menggunakan tenaga nuklir.

Pemanfaatan tenaga nuklir dari berbagai bidang kehidupan seperti bidang industri, kesehatan, penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan (litbangjirap), dll akan menghasilkan limbah radioaktif. Kuantitas dan potensi bahaya yang beragam tergantung dari jenis pemanfaatannya tersebut. Di dalam ketentuan undang-undang dan peraturan pemerintah, limbah radioaktif diartikan sebagai zat radioaktif dan bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi [1] [2]. Dengan beragamnya jenis pemanfaatan tenaga nuklir dan skala usahanya mulai dari yang sederhana sampai dengan kompleks, maka pengelolaan limbah radioaktif harus benar dan tepat sesuai dengan karakteristik dan jenis limbah yang dihasilkan. Sedari awal calon pengguna/pelaku usaha/pemegang izin yang akan menggunakan atau memanfaatkan tenaga nuklir harus sudah mempertimbangkan keuntungan/manfaat dan kerugiannya. Dalam beberapa peraturan perundangan telah ditegaskan pentingnya prinsip atau asas justifikasi dari pemanfaatan tenaga nuklir [3]. Ketentuan mengenai justifikasi juga telah dijelaskan dalam beberapa peraturan pelaksana yang berbentuk Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir.

Ketentuan tanggung jawab dalam pengelolaan limbah radioaktif juga telah dijelaskan dalam UU No. 10 Tahun 1997 dan PP No. 61 Tahun 2013. Terkait dengan kelembagaan dalam UU 10 Tahun 1997

diperkenalkan istilah badan pelaksana dan badan pengawas. Badan pelaksana memiliki tugas dan tanggung jawab salah satunya berkaitan dengan pengelolaan limbah radioaktif [1]. Meskipun baru-baru ini terbit UU No. 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja, isu kelembagaan tidak menjadi ketentuan yang turut diubah. Saat ini fungsi badan pelaksana menjadi bagian dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) cq Organisasi Riset Tenaga Nuklir dan Dit. Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran.

Pengelolaan limbah radioaktif didasarkan pada jenis dan karakteristik limbahnya. Salah satu pengolahan limbah radioaktif adalah sementasi. Metode sementasi merupakan salah satu jenis teknologi dari metode imbolisasi limbah radioaktif. Sementasi limbah radioaktif dilakukan dengan menggunakan campuran semen, agregat halus (pasir), dan air yang biasa disebut dengan mortar.

Salah satu fungsi utama dari mortar adalah sebagai pengikat dengan material penyusun dalam suatu konstruksi baik yang digunakan sebagai struktural maupun non-struktural. Dengan fungsi utama sebagai pengikat, maka mortar juga akan dipengaruhi oleh kemampuan dalam penyerapan air. Mortar akan memiliki sifat sangat mudah mengeras dan kehilangan ikatan adhesinya apabila sifat terhadap penyerapan airnya juga besar [4].

Unjuk kerja dari mortar yang akan digunakan dalam matriks pengikat dan pengungkuh dari limbah radioaktif tersebut. Parameter kuat tekan merupakan salah satu kriteria unjuk kerja penilaian untuk menilai kualitas dari suatu mortar. Gradasi atau ukuran butir dari agregat halus (pasir) merupakan salah parameter yang dapat ditinjau untuk melihat pengaruhnya terhadap kuat tekan. Kualitas agregat halus (pasir) sangat berbeda-beda dari setiap lokasi atau asal dari agregat halus (pasir) tersebut.

Penulisan makalah ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh gradasi agregat halus (pasir) terhadap kuat tekan mortar untuk mensimulasikan mortar dalam proses sementasi limbah radioaktif. Agregat halus (pasir) yang digunakan merupakan agregat halus (pasir) yang digunakan dalam proses sementasi limbah radioaktif selama ini. Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental dengan memvariasikan jenis pasir yang digunakan terhadap kuat tekan mortar.

2. LANDASAN TEORI

Pelaku usaha/penghasil limbah radioaktif yang berada pada sektor hulu turut berperan dan memiliki kewajiban dalam pengelolaan limbah radioaktif. Pelaku usaha/penghasil limbah radioaktif harus mengolah limbah radioaktif yang dihasilkannya berdasarkan jenis dan karakteristik limbah radioaktifnya. Di samping pada sektor hilir, tugas pokok dan fungsi dari badan pelaksana yang melakukan pengelolaan limbah radioaktif [2].

IPLN – DPFK BRIN memiliki sejumlah fasilitas yang digunakan dalam pengelolaan limbah radioaktif. Fasilitas tersebut didasarkan dari karakteristik dan jenis limbah yang akan dikelola. Beberapa fasilitas yang dimiliki adalah unit insinerasi yang digunakan sebagai pengolah limbah radioaktif untuk jenis padat terbakar, unit kompaksi digunakan sebagai pengolah limbah radioaktif padat untuk jenis terkompaksi, unit evaporasi sebagai pengolah limbah radioaktif cair, dan unit sementasi sebagai pengolah akhir untuk imobilisasi [5].

Konsep dari pengkondisian limbah radioaktif digunakan untuk mengungkung limbah radioaktif dalam matriks tertentu sehingga dapat bertahan dalam kurun waktu yang lama [6]. Metode pengkondisian limbah radioaktif telah dikembangkan dengan menggunakan berbagai macam metode. Reduksi volume dan imobilisasi merupakan salah satu metode yang paling banyak dikenal untuk tujuan pengkondisian. Imobilisasi merupakan suatu proses pemadatan (solidifikasi) limbah radioaktif dengan matriks tertentu yang berfungsi sebagai pengikat dan pengungkung radionuklida. Teknologi imobilisasi seperti sementasi, bituminisasi, dan vitrifikasi merupakan teknologi yang telah terbukti layak dan banyak digunakan secara komersial [6] [7]. Dalam makalah ini nantinya akan berfokus pada metode imobilisasi dengan menggunakan teknologi sementasi. Beberapa referensi menyebutkan bahwa sementasi merupakan teknologi yang umum dan banyak digunakan dalam pengelolaan limbah radioaktif tingkat rendah atau tingkat sedang [6].

Jika berbicara bahan dasar semen, maka kita dapat mengetahui berbagai macam jenis semen yang dapat digunakan sesuai dengan tujuannya. Berdasarkan komponen penyusunnya, semen dapat dibedakan diantaranya menjadi semen Portland, semen Portland Komposit, dan semen Portland Pozzolan. Semen Portland merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dari penggilingan terak semen Portland dengan komposisi kimia kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan kemudian digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa 1 (satu) atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat atau bahan tambahan lainnya. Mengacu pada SNI 2049-1:2020, semen Portland sendiri dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu tipe I, II, III, IV, dan V. Setiap tipe semen Portland tersebut memiliki karakteristik penggunaan yang berbeda [8] [9]. Proses imobilisasi dengan sementasi memiliki beberapa keunggulan diantaranya ekonomis dan mudah didapat, proses pengerjaan sederhana, biaya rendah, matriks semen sebagai tempat penyerapan dan reaksi, handal terhadap berbagai bentuk fisik limbah, serta stabilitas termal, kimia, dan fisik dari hasil limbah yang telah terimobilisasi [7].

Dalam proses sementasi pada umumnya akan dikenal beberapa istilah seperti mortar dan beton. Perbedaan mortar dan beton adalah dari komponen pengisi yaitu kehadiran agregat kasar (kerikil). Secara

sederhana, beton merupakan campuran dari mortar dan agregat kasar (kerikil). Sedangkan mortar sendiri merupakan campuran dari semen, agregat halus (pasir), dan air [8] [10].

Beberapa penelitian yang telah dilakukan dalam penggunaan mortar untuk suatu tujuan tertentu, parameter kuat tekan digunakan sebagai kriteria unjuk kerja mortar. Beberapa parameter yang mempengaruhi kuat tekan seperti jenis semen yang digunakan, densitas/kepadatan, umur mortar, agregat halus (pasir), dan air yang digunakan [11]. Sehingga dalam salah satu Standar Nasional Indonesia (SNI) yaitu SNI-03-6882-2002, kualitas mortar berdasarkan kuat tekan dapat dibedakan menjadi 4 yaitu mortar M (kuat tekan minimal 17,2 MPa), mortar N (kuat tekan minimal 12,5 MPa), mortar S (kuat tekan minimal 5,2 MPa), dan mortar O (kuat tekan minimal 2,4 MPa) [12].

Penggunaan semen yang sesuai juga akan mempengaruhi hasil kuat tekan yang dihasilkan. Jika kembali pada prinsip ketersediaan dan kemudahan untuk mendapatkan material, maka semen yang digunakan harus yang mudah dicari dan dijual dipasaran seperti jenis Portland komposit (PCC) yang mudah kita temui di toko bahan bangunan di sekitar kita. Begitu halnya dengan agregat halus (pasir) yang digunakan juga harus memenuhi prinsip ketersediaan dan mudah didapatkan di sekitar juga. Beberapa penelitian juga telah mengulas unjuk kerja dari setiap pasir yang ada di setiap lokasi atau daerah. Hanya saja jika prinsip ekonomi diterapkan, maka pasir yang digunakan juga sebaiknya menggunakan pasir yang dengan mudah ditemui di sekitar lokasi dimana kita akan melakukan proses sementasi. Pada SNI-03-6820-2002, agregat halus (pasir) adalah agregat dengan butir maksimum 4,76 mm yang dapat berasal dari alam (secara alami) atau hasil olahan suatu proses tertentu [13]. Agregat halus yang akan digunakan harus dilakukan pengujian berdasarkan pada standar pengujian baik SNI atau ASTM yang berlaku.

Begitu halnya dengan kualitas dan kuantitas air yang digunakan dalam campuran mortar. Air yang digunakan harus bersih dan bebas dari kotaminan (alkali, asam, garam, organik, dll) yang dapat mempengaruhi kualitas mortar. Kuantitas air yang dikenal dengan faktor air semen (*FAS/ Water/Cement Ratio*) juga harus tepat karena akan berpengaruh terhadap kemudahan dalam pembuatan mortar dan berlangsungnya proses hidrasi semen [14]. Mulyono (2003) dalam Wenda et al. (2018) menyampaikan bahwa faktor air semen (*FAS/ Water/Cement Ratio*) umumnya berkisar pada 0,4 – 0,65 [14].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Sugito dan Santoso (2012) dan Mas'Udi et al. (2018) dalam proses sementasi limbah radioaktif, mortar yang digunakan dengan perbandingan semen dan pasir yaitu 3:2 [15] [16]. Pada penelitian lain yang dilakukan secara bersamaan dengan penelitian ini oleh Yuwana dan Purnomo (2022), telah dilakukan penelitian untuk

mengetahui mengetahui beberapa variasi komposisi semen dan pasir terhadap kuat tekan mortar. Variasi komposisi semen dan pasir yang diuji sebanyak 5 variasi yaitu 1:2, 1:3, 2:3, 1:1, dan 3:2. Kuat tekan yang didapatkan dalam penelitian Yuwana dan Purnomo (2022) juga menunjukkan semakin banyak pasir yang digunakan, maka kuat tekan yang dihasilkan juga semakin rendah. Penelitian lain yang dilakukan oleh Multazzam dan Saelan (2015), menunjukkan hubungan bahwa semakin banyak jumlah pasir yang digunakan, maka kuat tekan mortar yang dihasilkan akan rendah [17].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan bersifat eksperimental yang berlokasi di laboratorium IPLN – DPFK, BRIN. Penelitian yang dilakukan melalui 3 kegiatan utama yaitu pengujian bahan agregat halus (pasir), pembuatan benda uji mortar, dan pengujian kuat tekan benda uji mortar. Beberapa bahan utama yang digunakan dalam pembuatan benda uji mortar dalam penelitian ini meliputi:

- 1) Semen Portland Komposit (PCC) merek dagang semen Tiga Roda produksi dari PT Indocement Tunggul Prakarsa Tbk.
- 2) Agregat halus (pasir) sebanyak 3 jenis dengan kode IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3. IPLN 1 dan IPLN 2 merupakan pasir yang berada di ruang penyimpanan material IPLN – DPFK, BRIN. Saat ini, agregat halus (pasir) ini digunakan dalam proses sementasi limbah radioaktif. Sedangkan agregat halus (pasir) dengan kode IPLN 3 didapatkan dari salah satu depo pasir yang berjarak \pm 2,5 km IPLN – DPFK, BRIN. Pada Gambar 1, 2, dan 3 berikut merupakan bentuk fisik dari agregat halus (pasir) dengan kode IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3.
- 3) Air yang digunakan merupakan air layanan umum yang ada di Kawasan Nuklir Serpong.



Gambar 1. Agregat Halus (Pasir) Kode IPLN 1



Gambar 2. Agregat Halus (Pasir) Kode IPLN 2



Gambar 3. Agregat Halus (Pasir) Kode IPLN 3

3.1. Pengujian Agregat Halus (Pasir)

Pengujian agregat halus (pasir) bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari material agregat halus (pasir) terhadap beberapa parameter tertentu. Parameter pengujian agregat halus (pasir) meliputi kandungan lumpur (material dengan ukuran lebih kecil dari 0,075 mm atau lolos saringan dengan nomor 200), kandungan organik, berat jenis, gradasi pasir, dan modulus halus butir (MHB). Pengujian dilakukan berdasarkan pada Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *American Standard Testing and Material (ASTM)* yang berlaku untuk setiap parameter uji.

Tujuan dari pengujian kadar organik adalah mengetahui ada atau tidaknya kandungan organik dalam agregat halus (pasir) yang dimungkinkan dapat mengganggu hasil pembuatan benda uji mortar. Standar pengujian kadar organik terhadap 3 jenis agregat halus (pasir) ini mengacu pada SNI dan ASTM yang berlaku. Hanya saja, adanya keterbatasan standar warna kaca atau larutan warna standar yang ada di laboratorium menyebabkan penulis dengan menggunakan pendekatan lain. Pendekatan yang penulis lakukan dalam interpretasi hasil pengujian, dengan menggunakan pembanding air yang digunakan untuk melarutkan semen dan agregat halus ketika membuat benda uji mortar. Pada Gambar 4 merupakan salah satu pengujian dan interpretasi pengujian kadar organik agregat halus (pasir) IPLN.



Gambar 4. Interpretasi Hasil Pengujian Kadar Organik Agregat Halus (Pasir) IPLN

Parameter Pengukuran berat jenis pada 3 jenis agregat halus (pasir) dilakukan terhadap berat jenis kering, berat jenis kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry/SSD*), berat jenis semu, dan penyerapan kadar air. Pada Gambar 5 berikut merupakan salah

satu langkah dalam pengukuran berat jenis agregat halus (pasir).



Gambar 5. Salah Satu Langkah dalam Pengukuran Berat Jenis Agregat Halus (Pasir) IPLN

Pengujian analisa saringan nantinya akan didapatkan 2 hasil yaitu gradasi agregat halus (pasir) dan modulus halus butir (MHB). Jika mengacu pada SNI, maka gradasi dapat dibagi menjadi 4 daerah/zona yaitu 1 (pasir kasar), 2 (pasir sedang), 3 (pasir agak halus), dan 4 (pasir halus). Sedangkan jika mengacu pada ASTM C33 hanya menggunakan satu ukuran zonasi dengan melihat persentase batas atas, persentase batas bawah, dan persentase lolos.

Dalam penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh dari jenis agregat halus (pasir) terutama parameter gradasi terhadap nilai kuat tekan. Gradasi dapat diartikan sebagai distribusi dari ukuran butir agregat. Jika kita mengacu pada SNI-03-2834-2000 dan ASTM C33 maka terdapat hubungan antara nilai persentase (%) lolos saringan/ayakan terhadap setiap ukuran saringan/ayakan. Dari hasil persentase berat tertinggal, persentase kumulatif berat, dan persentase kumulatif lolos saringan inilah yang nantinya dapat digambarkan sebagai gradasi dari agregat halus (pasir). Sehingga daerah/zona dari agregat halus dan modulus halus butir (MHB) dapat diketahui. Modulus halus butir (MHB) merupakan ukuran kehalusan atau kekasaran butiran agregat.

3.2. Perhitungan Analisis Perencanaan Campuran

Jumlah benda uji yang dibuat berjumlah 3 buah dari setiap variasi. Bentuk benda uji adalah silinder. Perencanaan campuran pembuatan mortar dengan menghitung volume silinder pada ukuran tertentu. Proses perencanaan dihitung berdasarkan pada nilai berat jenis pasir yang didapatkan pada dari proses pengujian agregat halus (pasir), nilai perbandingan semen dan pasir yaitu 1:3, nilai berat jenis semen, dan nilai faktor air semen (FAS). Dari hasil perhitungan ini didapatkan berat semen, pasir, dan air dalam satuan massa tertentu (seperti gram) untuk setiap jenis pasir dalam variasi semen dan pasir 1:3. Pada Tabel 1 merupakan hasil desain campuran mortar. Khusus untuk nilai FAS didapatkan dari hasil perhitungan secara teori. Hasil perhitungan secara teori tersebut

kemudian dilakukan proses *trial error* dalam pencampuran adonan.

Tabel 1. Desain Campuran Mortar

No.	Agregat Halus (Pasir)	Semen (gram)	Pasir (gram)	Air (gram)	FAS
1.	IPLN 1	92,96	204,07	74,37	0,8
2.	IPLN 2	92,96	208,5	79,02	0,85
3.	IPLN 3	92,96	204,96	83,67	0,9

3.3. Pembuatan Benda Uji

Benda uji mortar yang dibuat berdasarkan pada praktik yang telah dilakukan di IPLN-DPFK, BRIN. Benda uji mortar berbentuk silinder dengan ukuran geometri yaitu diameter $\pm 3,5$ cm dan tinggi ± 4 cm. Semen, agregat halus (pasir), dan air dicampur secara manual menggunakan sendok spesi dan pengaduk. Mortar kemudian dimasukkan ke dalam cetakan yang berbentuk silinder.

3.4. Perawatan Benda Uji

Pada penelitian ini tidak dilakukan perawatan mortar (*curing*) pada umumnya. Benda uji mortar dikeluarkan dari cetakan setelah 24 jam dari proses pembuatan benda uji. Setelah dikeluarkan dari cetakan, benda uji mortar diletakkan di tempat terbuka tetapi masih di dalam ruangan laboratorium. Hal ini untuk mensimulasikan kondisi yang sama dari proses sementasi limbah radioaktif yang biasa dilakukan di IPLN – DPFK, BRIN. Biasanya setelah proses penuangan adonan mortar ke dalam wadah/drum, kemudian dibiarkan begitu saja tanpa ada perawatan mortar pada umumnya. Proses perawatan benda uji mortar ini berlangsung selama 28 hari.

Meskipun jenis dan fungsi dari perawatan mortar (*curing*) akan mempengaruhi kuat tekan yang didapatkan dari benda uji mortar. Perawatan mortar (*curing*) bertujuan untuk mengendalikan berlangsungnya proses hidrasi semen. Selain itu juga untuk meminimalisasi terjadinya pengurangan mortar yang berlebihan dan menghindari terjadinya retak akibat penguapan yang berlebihan atau terlalu cepat [18] [19].

3.5. Pengujian Kuat Tekan

Setelah dilakukan proses perawatan selama 28 hari, pada umur ke- 28 hari dilakukan pengujian kuat tekan. Benda uji mortar harus diukur kembali geometrinya seperti ukuran diameter dan tinggi serta berat dari benda uji. Hasil pengukuran parameter ukuran dan berat akan didapatkan densitas dari benda uji mortar.

Pengujian kuat tekan terhadap benda uji mortar didasarkan pada SNI-1974-2011 [20]. Benda uji mortar diletakkan dalam peralatan uji tekan yang ada di IPLN – DPFK, BRIN. Benda uji mortar ini diberikan dengan gaya tekan tertentu hingga benda uji tersebut pecah. Gaya tekan maksimum yang terukur kemudian dicatat

dan dihitung besaran kuat tekannya. Kuat tekan benda uji mortar diperoleh dengan rumus:

$$f_c' = \frac{F}{A} \tag{1}$$

Keterangan:

- fc' : Kuat tekan (MPa),
- F : Gaya tekan maksimum (N),
- A : Luas permukaan benda uji (cm²)

4. PEMBAHASAN

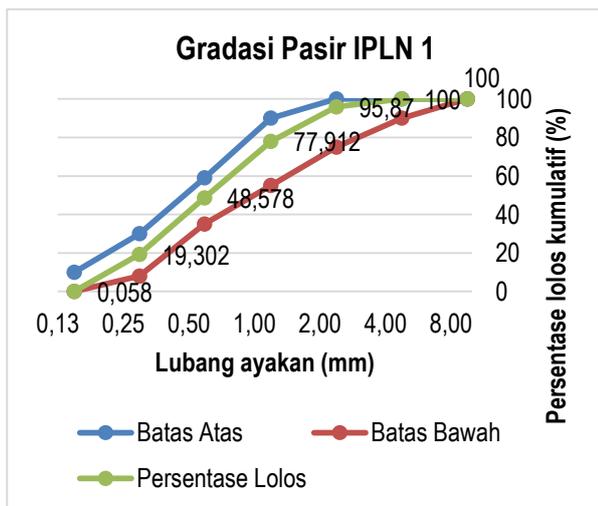
Merujuk pada Tabel 2, hasil pengujian kadar organik dari 3 jenis agregat halus IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3 terlihat jernih. Menunjukkan dari ketiga pasir IPLN bebas dari material pengotor. Hasil pengukuran terhadap berat jenis kering permukaan jenuh (SSD) dan penyerapan air juga telah tertuang dalam Tabel 2 tersebut. Nilai berat jenis kering permukaan jenuh inilah yang sebelumnya digunakan sebagai inputan dalam

proses perencanaan campuran pembuatan benda uji mortar. Desain dari campuran mortar sebagaimana telah dihitung dalam Tabel 1 pada bagian metodologi penelitian.

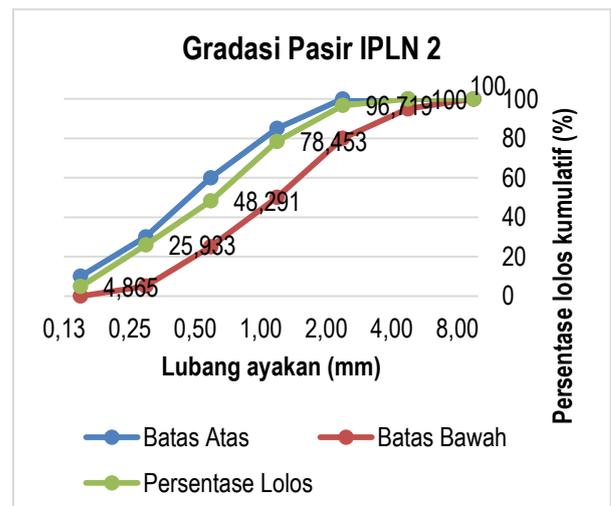
Melihat hasil pengujian analisa saringan dalam Tabel 2, hasil yang didapatkan harus dibandingkan dengan SNI dan ASTM yang berlaku. Jika mengacu pada ASTM C33, maka agregat halus (pasir) IPLN 1 dan IPLN 2 berada di dalam area keberterimaan. Sedangkan agregat halus (pasir) IPLN 3, terdapat beberapa titik persentase lolos yang ada di luar dari kriteria/area. Kemudian jika mengacu ada SNI, agregat halus (pasir) dengan kode IPLN 1 dan IPLN 2 masuk ke dalam gradasi pasir daerah/zona no. 2 yang diklasifikasikan sebagai pasir sedang (pasir agak kasar). Sedangkan untuk IPLN 3 masuk ke dalam daerah/zona no. 4, yaitu pasir halus. Pada Gambar 6, 7, dan 8 berikut merupakan grafik gradasi dari ketiga jenis agregat halus (pasir) dengan kode IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3..

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Halus (pasir) Kode IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3.

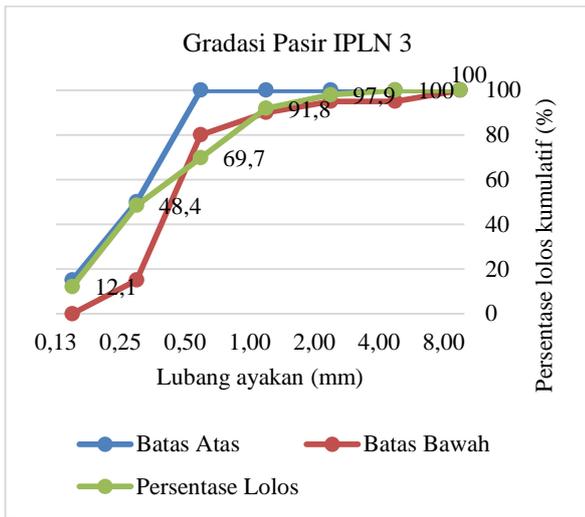
No.	Parameter	Agregat Halus (pasir)			Standar Pengujian
		IPLN 1	IPLN 2	IPLN 3	
1.	Kadar Lumpur (saringan No. 200)	4,7%	3,27%	6,6%	SNI-03-4142-1996 [18], ASTM C117
2.	Kadar Organik	Jernih	Jernih	Jernih	SNI-03-2816-2014 [19], ASTM C40
3.	Berat jenis kering permukaan jenuh	2,26	2,43	2,31	SNI-1970-2008 [20], ASTM C128
4.	Penyerapan	4,1%	2,47%	6,1%	SNI-1970-2008 [20], ASTM C128
5.	Analisa Saringan	Gradasi Zona 2	Gradasi Zona 2	Gradasi Zona 4	SNI-03-1968-1990, SNI-03-2834-2000 [21], ASTM C33
6.	Modulus Halus Butir	2,58	2,46	1,8	SNI-03-1968-1990, SNI-03-2834-2000 [21], ASTM C33



Gambar 6. Gradasi Pasir Daerah/Zona No. 2 IPLN 1



Gambar 7. Gradasi Pasir Daerah/Zona No. 2 IPLN 2



Gambar 8. Gradasi Pasir Daerah/Zona No. 4 IPLN 3

Kemudian pada gambar 10 merupakan contoh pengukuran tinggi benda uji mortar. Pada perencanaan diharapkan tinggi mortar sebesar ± 4 cm. Hanya saja tidak semua benda uji akan berukuran ± 4 cm pada umur 28 hari akan tetapi ada benda uji mortar yang menyusut sebagaimana contoh pada Gambar 10 berikut dimana ketinggian benda uji mortar sebesar 3,95 cm. selain pengukuran geometri mortar, juga dilakukan pengukuran berat mortar untuk menghitung densitas mortar. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa densitas mortar dalam penelitian ini berkisar pada 1,6 – 1,73 g/cm³.



Gambar 9. Contoh Benda Uji Mortar dengan Agregat Halus IPLN 1



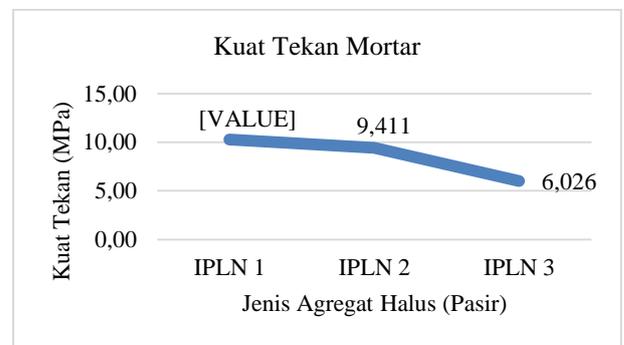
Gambar 10. Contoh Pengukuran Ketinggian Benda Uji Mortar

Pada Tabel 3 berikut merupakan hasil pengujian kuat tekan dari beberapa 9 mortar dengan 3 jenis pasir IPLN. Grafik hasil uji kuat tekan dari mortar dengan variasi agregat halus (pasir) ditampilkan pada gambar 11. Pada Gambar 12 merupakan salah satu bentuk

kehancuran/keruntuhan benda uji mortar setelah diberikan gaya tekan pada perangkat uji tekan.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan

No.	Kode	Densitas (g/cm ³)	Beban (KN)	Kuat Tekan Rerata (KN/cm ²)	Kuat Tekan Rerata (MPa)
1.	IPLN 1	1,72	10,1	1,026	10,292
2.	IPLN 1	1,71	10,2	1,036	
3.	IPLN 1	1,73	10,1	1,026	
4.	IPLN 2	1,70	9,2	0,934	9,411
5.	IPLN 2	1,67	8,9	0,904	
6.	IPLN 2	1,69	9,7	0,985	
7.	IPLN 3	1,65	6,2	0,630	6,026
8.	IPLN 3	1,66	5,8	0,589	
9.	IPLN 3	1,60	5,8	0,589	



Gambar 11. Kuat Tekan Mortar dengan 3 Variasi Jenis Agregat Halus (Pasir)



Gambar 12. Bentuk Kehancuran/ Keruntuhan Pada Salah Satu Benda Uji Mortar

Mengacu pada Gambar 11 didapatkan hasil kuat tekan paling baik pada saat menggunakan agregat halus (pasir) dengan kode IPLN 1 yaitu sebesar 10,292 MPa. Secara berturut-turut diikuti dengan IPLN 2 dan IPLN 3 dengan nilai kuat tekan sebesar 9,411 MPa dan 6,026 MPa. Secara umum dan keseluruhan, setelah benda uji mortar dikenai beban tekan, pola kehancuran/keruntuhan ditunjukkan pada Gambar 12. Mengacu pada SNI-1974-2011, pola kehancuran/keruntuhan mortar pada benda uji sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12 dapat dikategorikan sebagai berbentuk kerucut dan kombinasi kerucut – belah [20].

Dalam penelitian ini kami tidak melakukan pengukuran kelecakan (*workability*) karena adanya beberapa keterbatasan peralatan yang digunakan di laboratorium. Kelecakan (*workability*) merupakan kemampuan untuk dilaksanakan atau dikerjakan, kemudahan pada saat dibawa dan ditempatkan, mudah dikerjakan, mudah dipadatkan, dan mudah untuk dilakukan finishing [25]. Hanya saja dari aspek kelecakan dapat dilihat pada saat pengerjaan dan tampilan visual dari adukan mortar. Penampakan visual dari kurang lecahnya adukan mortar adalah adukan mortar yang kering. Kelecakan akan berpengaruh terhadap ikatan antara pasta semen dengan butiran agregat halus (pasir). Hatanir et al. (2012) dan Pertiwi (2014) dalam penelitiannya juga memberikan informasi hasil bahwa gradasi dan campuran agregat turut memberikan pengaruh terhadap kelecakan [26] [27].

Adanya hipotesa pengaruh kelecakan berkorelasi dengan desain campuran mortar pada Tabel 1. Jika melihat Tabel 1, proporsi jumlah semen, pasir, dan FAS tidak berjauhan satu sama lain. Akan tetapi pada saat pengerjaan dan tampilan visual adonan mortar, campuran mortar itu cukup berbeda. Sehingga meskipun dalam penelitian ini kami tidak melakukan pengukuran kelecakan, akan tetapi patut diduga bahwa kelecakan turut mempengaruhi hasil tersebut berdasarkan pada kondisi pengerjaan dan visual tersebut.

Parameter gradasi pasir menjadi faktor yang patut diduga mempengaruhi kuat tekan ini. Dari ketiga jenis pasir, pasir dengan kode IPLN 1 dan IPLN 2 memiliki gradasi yang sebagai pasir sedang (agak kasar) dimana secara visual grafik ditampilkan pada Gambar 6 dan 7. Sedangkan pasir dengan kode IPLN 3 masuk dalam kategori pasir halus yang secara visual ditunjukkan pada Gambar 8. Pasir IPLN 3 ini memang terbilang cukup unik karena tidak semua titik persentase lolos terhadap lubang ayakan masuk ke dalam area grafik pada Gambar 8 tersebut. Sebagian besar titik persentase lolos tersebut masuk ke dalam kriteria daerah/zona 4 yang diklasifikasikan sebagai pasir halus. Jika dilihat dari nilai MHB, agregat halus (pasir) IPLN 1 dan IPLN 2 memiliki nilai MBH pada rentang keberterimanan dalam ASTM C33 yaitu 2,3 – 3,1. Sedangkan untuk IPLN 3 berada di bawah nilai 2,1 sehingga gradasi ukuran butir dari pasir IPLN 3 kecil dan halus.

Dengan komposisi semen dan pasir yang sama, pada penelitian ini variasi gradasi agregat halus (pasir) terbukti memberikan dan mempengaruhi kuat tekan yang didapatkan. Suhendra et al (2014) menyampaikan bahwa secara tidak langsung gradasi dari agregat tidak berpengaruh terhadap kuat tekan. Akan tetapi gradasi agregat tersebut akan berpengaruh secara langsung terhadap keseragaman, konsistensi, dan pencapaian kepadatan maksimum adukan [28]. Selain itu ukuran partikel agregat halus (pasir) yang lebih besar, akan menyebabkan luas permukaan bidang kontak dengan pasta semen menjadi lebih kecil sehingga kebutuhan

air campuran menjadi berkurang. Hal ini berkorelasi dengan kebutuhan air sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2. Pada mortar dengan menggunakan agregat halus (pasir) IPLN 1 dan IPLN 2 kebutuhan air yang digunakan relatif lebih sedikit dibandingkan ketika menggunakan agregat halus (pasir) IPLN 3. Hanya saja dengan luas permukaan bidang kontak yang semakin kecil dapat mengurangi kekuatan lekatan antara permukaan agregat halus (pasir) dengan pasta.

Mengacu pada Purwati et al. (2014), perubahan gradasi butiran dapat mempengaruhi kelecakan. Butiran dengan ukuran lebih besar cenderung akan memiliki friksi yang kecil, yang menyebabkan pada komposisi bahan yang sama tetapi kebutuhan air menjadi berlebih sehingga adukan menjadi lebih encer. Begitu juga sebaliknya, adukan dengan menggunakan ukuran agregat yang lebih kecil, memberikan nilai luas permukaan dan friksi yang lebih besar, sehingga akan membuat adukan lebih kaku [29].

Dalam hal ini ketika agregat halus (pasir) IPLN 3 digunakan dan dibandingkan ketika menggunakan IPLN 1, maka IPLN 3 membutuhkan air yang lebih banyak. IPLN 1 dengan FAS sebesar 0,8 dan IPLN 3 dengan FAS sebesar 0,9. Hal ini juga menunjukkan korelasi dengan teori bahwa gradasi agregat halus (pasir) yang halus akan menyebabkan kebutuhan air dalam campuran meningkat atau semakin banyak. Menurut Mulyono (2003) dalam Gunawan (2014) menyampaikan bahwa gradasi agregat yang baik menurunkan kebutuhan air untuk kelecakan yang sama [30]. Hal ini juga berkorelasi dengan penelitian yang dilakukan oleh Pertiwi (2014) yang menyampaikan bahwa semakin besar daerah/zona agregat halus (pasir) atau semakin halus butirannya maka akan mengakibatkan terjadinya penurunan konsistensi campuran adukan [27].

Dengan menggunakan agregat halus (pasir) IPLN 1 didapatkan kuat tekan rata-rata sebesar 10,292 MPa. Nilai kuat tekan ini terbilang memang masih sangat jauh dari nilai kuat tekan mortar hasil sampling dari sementasi limbah radioaktif yang dilakukan oleh IPLN – DPFK, BRIN. Purnomo (2019) menyampaikan bahwa hasil kuat tekan yang digunakan dalam sementasi limbah padat terkompaksi berkisar pada $\pm 23,5$ MPa [31]. Dimana praktik sementasi yang dilakukan di IPLN – DPFK, BRIN saat ini adalah dengan menggunakan perbandingan semen dan pasir sebesar 3:2. Selain itu, dalam faktor lain yang turut mempengaruhi nilai kuat tekan sebesar $\pm 23,5$ MPa adalah penggunaan bahan tambah (*additive*) dengan merek dagang damdex. Penambahan bahan tambah seperti merk damdex ini memang terbukti dapat meningkatkan kuat tekan sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh Harianja dan Barus (2008) dan Nurmaidah (2016 [32] [33]. Dengan demikian nilai kuat tekan mortar pasir IPLN tanpa bahan tambah (*additive*) dan dengan bahan tambah (*additive*) berkesesuaian dengan penelitian sejenis lainnya yang juga menggunakan bahan tambah (*additive*). Nilai kuat tekan paling baik pada variasi

semen dan pasir sebesar 3:2 juga telah terbukti berdasarkan pada penelitian Yuwana dan Purnomo (2022) yang berfokus pada variasi komposisi semen dan pasir menunjukkan semakin banyak komposisi pasir maka kuat tekan semakin kecil.

Salah satu agregat halus (pasir), yaitu dengan kode IPLN 3 didapatkan nilai kuat tekan yang paling rendah. Gradasi agregat halus (pasir) IPLN 3 termasuk kurang baik dan tidak memenuhi zona gradasi agregat halus sebagaimana telah ditetapkan dalam standar ASTM C33. Secara teori, kuat tekan mortar yang dihasilkan dengan agregat halus (pasir) IPLN 3 juga masih masuk dalam kriteria mortar tipe S dengan kuat tekan lebih dari 5,2 MPa. Akan tetapi, sebagai perbaikan jika tetap ingin menggunakan agregat halus (pasir) tersebut, secara teori dapat dilakukan dengan memperbaiki nilai nilai gradasi. Perbaikan gradasi ini dapat dilakukan dengan mencampurkan agregat halus (pasir) IPLN 3 dengan agregat halus lainnya yang akan memberikan nilai gradasi gabungan. Tentunya diperlukan komposisi yang tepat antara IPLN 3 dengan agregat halus (pasir) jenis lainnya kemudian dilakukan analisis saringan. Sudah menjadi pendekatan umum dalam dunia sipil perihal gradasi gabungan dalam rangka memperbaiki nilai gradasi dari agregat halus (pasir). Pencampuran 2 jenis agregat dengan gradasi tertentu diharapkan didapat nilai lolos saringan/ ayakan yang didapatkan masuk kedalam jangkauan/ range dalam SNI dan ASTM. Dalam penelitian ini, penulis tidak melakukan analisis saringan untuk menentukan gradasi gabungan.

5. KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian terhadap 3 variasi jenis agregat halus dengan kode IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3. Dari hasil pengujian gradasi dari 3 jenis pasir didapatkan hasil yaitu IPLN 1 masuk dalam gradasi pasir agak kasar, IPLN 2 masuk dalam gradasi pasir agak kasar, dan IPLN 3 masuk dalam gradasi pasir halus. Modulus Halus Butir (MHB) dari 3 jenis agregat halus (pasir) ini berurut-turut untuk IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3 adalah 2,58, 2,46, dan 1,8. Hanya agregat halus (pasir) IPLN 3 yang nilai MHB berada di luar dari kriteria keberterimaan ASTM C33 yang berkisar pada 2,3 – 3,1. Nilai kuat tekan yang didapatkan dari 3 jenis variasi agregat halus (pasir) IPLN 1, IPLN 2, dan IPLN 3 berturut-turut adalah 10,292 MPa, 9,411 MPa, dan 6,026 MPa. Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa gradasi agregat halus (pasir) akan memberikan pengaruh terhadap nilai kuat tekan mortar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BRIN yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui Program Beasiswa Saintek 2020. Secara khusus Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada BAPETEN dan Instalasi Pengelolaan Limbah Nuklir

(IPLN) – DPFK, BRIN dalam keberlangsungan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Republik Indonesia, "Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran," Jakarta, 1997.
- [2]. Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif," Jakarta, 2013.
- [3]. Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pngion dan Keamanan Sumber Radioaktif," Jakarta, 2007.
- [4]. Suparno, Bambang Sugito, Ayi M, et al., "Pengelolaan Limbah Radioaktif dan Limbah Bahan Berbahaya Beracun (B3) Internal Batan Kawasan Nuklir Serpong (KNS)," Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2016, pp. 41-52, 2016.
- [5]. C. M. Jantzen, W. E. Lee, and M. I. Ojovan, "Radioactive waste (RAW) Conditioning, Immobilization, and Encapsulation Processes and Technologies-Overview and Advances," *Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up*, pp. 171-272, 2013.
- [6]. M. I. Ojovan and W. E. Lee, *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation* 2nd edition, London: Elsevier Ltd, 2014.
- [7]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-15-2049-2004 tentang Semen Portland," Jakarta, 2004.
- [8]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI 2049-1:2020 tentang Semen Portland - Bagian 1 Spesifikasi," Jakarta, 2020.
- [9]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-03-6882-2002 tentang Spesifikasi Mortar untuk Pekerjaan Pasangan," Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2014.
- [10]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-03-6225-2002 tentang Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil," Jakarta, 2002.
- [11]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-6882-2014 tentang Spesifikasi Mortar untuk Pekerjaan Unit Pasangan," Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2014.
- [12]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-03-6820-2002 tentang Spesifikasi Agregat Halus Untuk Pekerjaan Dan Dan Plesteran Dengan Bahan Dasar Semen," Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2002.
- [13]. Kantius Wenda, Kantius Wenda, Safrin Zuridah, dan Budi Hastono, "Pengaruh Variasi Komposisi Campuran Mortar Terhadap Kuat Tekan,"

- GeSTRAM (Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil), vol. 1, no. 1, Maret 2018.
- [14]. Mas'Udi, Bambang Sugito, dan Yayat Bernardi, "Pengelolaan Limbah Radioaktif Resin Bekas dengan Metode Sementasi," Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan Tahun 2018, pp. 119-125, 2018.
- [15]. B. Sugito dan I. Santoso, "Pengelolaan Limbah Radioaktif Semi Cair dengan Cara Sementasi," Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2012, pp. 447-454, 2012.
- [16]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-1974-2011 tentang Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder," Jakarta, 2011.
- [17]. D. Y. Simanullang, "Kajian Kuat Tekan Mortar menggunakan Pasir Sungai dan Pasir Apung dengan Bahan Tambah Fly Ash dan Conplast dengan Perawatan (Curing)," Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, vol. 2, no. 4, pp. 621-631, Desember 2014.
- [18]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No. 200 (0,075 mm)," Jakarta, 1996.
- [19]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-2816-2014 Metode Uji Bahan Organik dalam Agregat Halus untuk Beton," Jakarta, 2014.
- [20]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-1970-2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus," Jakarta, 2008.
- [21]. Badan Standarisasi Nasional (BSN), "SNI-03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal," Jakarta, 2000.
- [22]. I. G. P. Joni, "Faktor yang Mempengaruhi Mutu Beton," Universitas Udayana, Denpasar, 2017.
- [23]. Fepy Supriani dan Mukhlis Islam, "Pengaruh Metode Perlakuan dalam Perawatan Beton terhadap Kuat Tekan dan Durabilitas Beton," Jurnal Inersia, vol. 9, no. 2, pp. 47-54, Oktober 2017.
- [24]. N. Bumulo dan N. W. Rusnadin, "Analisa Agregat Halus Pasir Zona III Dengan Agregat Kasar Ukuran 20 mm Dan 40 mm Untuk Uji Kuat Tekan Mutu Beton Pada Campuran Beton Normal," Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 11-23, April 2018.
- [25]. T. Hatanir, D. Karaboga, and B. Akay, "Mix Proportioning of Aggregates for Concrete by Three Different Approaches," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 24, pp. 529-537, May 2012.
- [26]. N. Pertiwi, "Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Karakteristik Beton Segar," Jurnal Forum Bangunan, vol. 12, no. 1, pp. 12-17, 2014.
- [27]. Kiagus Aldi Multazzam dan Priyanto Saelan, "Studi Mengenai Perancangan Komposisi Bahan dalam Campuran Mortar untuk Pembuatan Bata Beton (Paving Block)," Reka Rencana, vol. 1, no. 1, pp. 86-97, Desember 2015.
- [28]. Suhendra, F.R. Yamali, dan T. Ningfuri, "Karakteristik Material Bahan Konstruksi di Beberapa Lokasi dalam Kabupaten Muaro Jambi," Jurnal Ilmiah Universitas Bengkulu Jambi, vol. 14, no. 4, pp. 145-154, 2014.
- [29]. Agus Purwati, Sholihin As'ad, dan Sunarmasto, "Pengaruh Ukuran Butiran Agregat Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi Grade 80," Jurnal e-Matriks Teknik Sipil, vol. 2, no. 2, pp. 58-63, Juli 2014.
- [30]. A. Gunawan, "Pengaruh Campuran Dua Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton," Jurnal Inersia, vol. 6, no. 1, pp. 61-72, April 2014.
- [31]. Sugeng Purnomo, "Pengukuran Kuat Tekan Beton Hasil Sementasi Limbah Radioaktif Padat Terkompaksi," Buletin Limbah, vol. 16, no. 2, pp. 29-35, Desember 2019.
- [32]. Jhonson A. Harianja dan Efraim Barus, "Penggunaan Damdex Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Beton," Majalah Ilmiah UKRIM, vol. 2, no. XII, pp. 1-15, 2008.
- [33]. Nurmaidah, "Penggunaan Bahan Tambah Damdex (Waterproofing) Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Beton," ARBITEK: Jurnal Teknik Sipil & Arsitektur, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2016.