

Comparison of compressive strength of recycled type III gypsum and Portland Composite Cement mixtures with manufactured type III gypsum

Perbandingan kekuatan tekan campuran gipsum tipe III daur ulang dan *Portland Composite Cement* dengan gipsum tipe III pabrikan

¹Anisa Permata Ermiyon, ²Aria Fransiska, ³Nelvi Yohana

¹Faculty of Dentistry, Universitas Andalas

²Departement of Dental Materials, Faculty of Dentistry, Universitas Andalas

³Departement of Orthodontics, Faculty of Dentistry, Universitas Andalas

Padang, Indonesia

Corresponding author: **Aria Fransiska**, email: aria.fransiska@dent.unand.ac.id

ABSTRACT

The study was conducted to compare the compressive strength of recycled type III gypsum and Portland Composite Cement (PCC) mixtures with manufactured type III gypsum in a laboratory experiment with post-test only control group design. A total of 20 samples were divided into 5 gypsum groups, namely type III manufactured, type III recycled, a mixture of type III recycled and PCC at 1%, 3%, and 5% respectively. The compressive strength test was conducted using Universal Testing Machine and analysed using one-way Anova test. The highest compressive strength was obtained for the manufactured type III gypsum and the lowest compressive strength was obtained for the recycled type III gypsum; there was a significant difference in compressive strength ($p < 0.05$) between the treatment groups. It was concluded that the addition of various concentrations of PCC to recycled type III gypsum increased the compressive strength of recycled type III gypsum, although it did not match that of manufactured type III gypsum.

Keywords: compressive strength, gypsum, portland composite cement, recycled gypsum, recycled gypsum type III

ABSTRAK

Penelitian dilakukan untuk mengetahui perbandingan kekuatan tekan campuran gipsum tipe III daur ulang dan *Portland Composite Cement* (PCC) dengan gipsum tipe III pabrikan secara eksperimen laboratorium dengan *post-test only control group design*. Sebanyak 20 sampel dibagi menjadi 5 kelompok gipsum, yaitu tipe III pabrikan, tipe III daur ulang, campuran tipe III daur ulang dan PCC masing-masing 1%, 3%, dan 5%. Uji kekuatan tekan menggunakan *Universal Testing Machine* dan dianalisis dengan uji *one-way Anova*. Diperoleh kekuatan tekan tertinggi pada gipsum tipe III pabrikan dan kekuatan tekan terendah pada gipsum tipe III daur ulang; menunjukkan terdapat perbedaan kekuatan tekan bermakna ($p < 0,05$) antar kelompok perlakuan. Disimpulkan bahwa penambahan berbagai konsentrasi PCC ke dalam gipsum tipe III daur ulang meningkatkan kekuatan tekan gipsum tipe III daur ulang, meskipun belum menyamai gipsum tipe III pabrikan.

Kata kunci: gipsum, gipsum tipe III, gipsum daur ulang, kekuatan tekan, *portland composite cement*

Received: 10 January 2024

Accepted: 1 April 2024

Published: 1 August 2024

PENDAHULUAN

Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) merupakan salah satu mineral yang banyak digunakan untuk konstruksi bangunan, bahan tambahan bagi makanan, obat-obatan, peralatan medis, dan aplikasi dalam kedokteran gigi.¹ Gypsum dalam kedokteran gigi digunakan sebagai model, *die*, bahan cetak, dan cetakan pada proses pembuatan gigi tiruan.²

Gypsum tipe III paling umum digunakan dalam aplikasi kedokteran gigi karena memiliki tingkat akurasi dan kekuatan yang baik,³ misalnya sebagai bahan pembuatan model kerja gigi tiruan.⁴ Model kerja yang telah digunakan akan dibuang dan menjadi limbah.⁵

Limbah gipsum di seluruh dunia berjumlah sekitar 7-8 miliar ton dan terus meningkat 100-280 juta ton setiap tahunnya.⁶ Sekitar 2,95 juta ton limbah gipsum dari konstruksi dihasilkan setiap tahunnya di Eropa, limbah gipsum sintesis *phosphogypsum* (PG) dihasilkan sekitar 10 juta ton di Tunisia, dan 11 juta ton di India.⁷⁻⁹ Jumlah PG secara global mencapai 280 juta per tahun dan 85% diantaranya dibuang tanpa pengelolaan limbah.¹⁰

Limbah gipsum merupakan salah satu kontributor terbesar terbentuknya sulfida (H_2S). Gas H_2S terbentuk karena aktivitas *sulfurreducing bacteria* (SRB) ketika limbah gipsum bercampur dengan limbah organik di wadah pembuangan.¹¹ SRB adalah bakteri anaerob yang dapat mereduksi sulfat menjadi H_2S sebagai penyebab hujan asam,¹² yang berbahaya karena dapat mengganggu kehidupan hewan air, baik di danau, sungai, maupun la-

ut, sifat korosif yang merusak, serta pada manusia dapat menyebabkan sakit kepala, iritasi mata, hidung, tenggorokan, kelainan paru-paru seperti batuk kering, asma, dan bronkitis.¹³

Pada lampiran Peraturan Presiden No.101 tahun 2014 limbah gipsum digolongkan ke dalam kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) sumber spesifik khusus kategori bahaya 2 dengan kode limbah B414 yang memerlukan pengelolaan limbah dengan daur ulang. Daur ulang dilakukan dengan cara mengubah limbah gipsum dihidrat menjadi gipsum hemihidrat melalui proses kalsinasi atau pemanasan.¹⁵ Zakiyuddin dkk, melakukan penelitian pada gipsum tipe III daur ulang yang melewati proses pemanasan dan tanpa pemanasan. Model dari gipsum daur ulang dengan proses pemanasan dapat diukur kekuatan tekan, sebaliknya model dari gipsum daur ulang tanpa pemanasan tidak dapat diukur kekuatan tekannya; model tidak dapat menahan tekanan yang diberikan, selain itu bubuk gipsum daur ulang tanpa pemanasan tidak dapat bereaksi dengan air lagi dan air hanya bertindak sebagai pengikat pada proses pencampuran.³ Sejumlah zat kimia dapat ditambahkan dalam gipsum daur ulang untuk mencapai komposisi dan konsentrasi yang sama seperti gipsum pabrikan sehingga kekuatan dan *setting time* yang dibutuhkan tercapai.⁵ Ngernchuklin dkk, menambahkan berbagai konsentrasi kalsium karbonat (CaCO_3) sebanyak 1%, 3%, dan 5% ke dalam limbah gipsum; penambahan CaCO_3 sebanyak 5% dapat

meningkatkan kekuatan mekanik *bending* hingga 35% lebih besar dibandingkan dengan gipsum tanpa penambahan CaCO_3 .¹⁶

CaCO_3 merupakan zat dalam komposisi *clinker* yang terdapat di dalam batu kapur. *Clinker* sebagai bahan utama pembuatan semen adalah hasil pembakaran dari batu kapur, *clay*, dan bahan tambahan lainnya.¹⁷ *Ordinary Portland Cement* (OPC) yang dikenal sebagai semen *portland* tipe I termasuk jenis semen hidrolisis dengan komposisi *clinker* dan gipsum yang digunakan untuk konstruksi umum tanpa syarat-syarat khusus.^{18,19} Li dkk, melakukan penelitian pada campuran gipsum plaster dengan OPC, gipsum plaster tanpa OPC, daur ulang campuran gipsum plaster dengan OPC, dan daur ulang gipsum plaster tanpa OPC. Penelitian tersebut menunjukkan peningkatan kekuatan tekan pada campuran gipsum plaster dengan OPC dibandingkan dengan gipsum plaster tanpa OPC. Hasil sebaliknya ditunjukkan pada daur ulang campuran gipsum plaster dengan OPC yang dibandingkan dengan daur ulang gipsum plaster tanpa OPC yakni terdapatnya penurunan kekuatan tekan.²⁰ Penelitian ini melakukan penambahan *Portland Composite Cement* (PCC) ke dalam gipsum daur ulang untuk meningkatkan kekuatan tekan gipsum daur ulang. PCC merupakan semen konstruksi bangunan varian terbaru dengan kualitas kuat tekan yang lebih baik dan harga yang lebih murah dibandingkan dengan OPC ataupun *Portland Cement* tipe lain.²¹ Penggunaan PCC merupakan peralihan dari OPC pada saat ini karena PCC merupakan campuran antara OPC dan berbagai zat aditif.^{19,22} PCC memiliki komposisi bahan baku berupa *clinker*, gipsum, dan zat aditif lainnya.²¹ Zat aditif yang digunakan yaitu batu kapur (*limestone*), abu terbang (*fly ash*), dan *trass*.¹⁷ Zat aditif *fly ash* dan *trass* dapat meningkatkan kuat tekan karena mengandung SiO_2 , sedangkan *limestone* berfungsi untuk menutup rongga-rongga pada semen sehingga dapat meningkatkan kekuatan tekan.²¹

Berdasarkan uraian di atas, perlu diteliti tentang perbandingan kekuatan tekan campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC dengan gipsum tipe III pabrikan.

METODE

Penelitian eksperimen laboratorium dengan desain *post-test only control group*, dilakukan di Universitas Andalas; pada Laboratorium Teknik Mesin Fakultas Teknik, Laboratorium Penelitian Fakultas Farmasi, dan Ruang Skills Lab Fakultas Kedokteran Gigi. Sebanyak 20 sam-

pel dengan 5 kelompok perlakuan yaitu gipsum tipe III pabrikan, gipsum tipe III daur ulang, campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 1%, campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 3%, serta campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 5%.

Penelitian ini diawali pembuatan limbah gipsum, pembuatan gipsum daur ulang, pembuatan sampel, dan pengujian sampel. Pembuatan limbah gipsum dilakukan dengan mencampur 100 g gipsum tipe III pabrikan ke dalam 30 mL akuades. Kemudian, adonan gipsum dimasukkan ke dalam *dental rubber mold*.²³ Selanjutnya, limbah gipsum dihancurkan menggunakan lumpang dan alu, dan bubuk diayak menggunakan ayakan partikel agar homogen. Bubuk limbah gipsum dikalsinasi dalam oven suhu 160°C selama 2 jam.¹⁶ Hasil kalsinasi disebut sebagai gipsum daur ulang. Pembuatan sampel dilakukan dengan mencampur 100 g gipsum daur ulang ke dalam 60 mL akuades. Kemudian, adonan gipsum daur ulang dimasukkan ke cetakan sampel berbentuk tabung.¹⁶ Cetakan ini terbuat dari bahan silikon dengan ukuran diameter 20 mm dan tinggi 40 mm.²⁴ Selanjutnya, pengujian dilakukan setelah sampel dibiarkan selama minimal 24 jam atau sampel telah mencapai *dry strength*.^{1,16} Pengujian sampel dilakukan menggunakan alat *universal testing machine* (UTM).²⁴

HASIL

Didapatkan rerata kekuatan tekan tertinggi berasal dari kelompok gipsum tipe III pabrikan, yaitu 31,24 MPa, sedangkan rerata kekuatan tekan terendah diperoleh dari kelompok gipsum tipe III daur ulang, yaitu 4,54 MPa.

Hasil uji *one-way* Anova (Tabel 1), nilai $p < 0,05$ yang artinya terdapat perbedaan rerata kekuatan tekan antara masing-masing kelompok perlakuan gipsum. Untuk melihat kelompok yang berbeda secara signifikan dilanjutkan dengan uji lanjut *Post Hoc* LSD (Tabel) yang

Tabel 1 Hasil uji *one-way* Anova perbedaan kekuatan tekan antar kelompok perlakuan

Kelompok Perlakuan	N	Mean $\pm$ SD	Nilai p
Gipsum Tipe III Pabrikan	4	31,24 $\pm$ 3,34	0,0001
Gipsum Tipe III Daurl Ulang	4	4,54 $\pm$ 0,55	
Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 1%	4	4,83 $\pm$ 0,32	
Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 3%	4	7,29 $\pm$ 1,03	
Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 5%	4	7,84 $\pm$ 0,56	

Tabel 2 Hasil uji *Post Hoc* LSD berdasarkan kekuatan tekan kelompok perlakuan gipsum

Kelompok Perlakuan	Gipsum Tipe III Pabrikan	Gipsum Tipe III Daurl Ulang	Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 1%	Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 3%	Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 5%
Gipsum Tipe III Pabrikan		0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Gipsum Tipe III Daurl Ulang			0,401	0,000*	0,000*
Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 1%				0,000*	0,000*
Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 3%					0,318
Campuran Gipsum Tipe III Daurl Ulang dan PCC 5%					

*Nilai $p < 0,05$ terdapat perbedaan kekuatan tekan signifikan

menunjukkan perbedaan tidak signifikan ($p > 0,05$) antara kelompok gipsum tipe III daur ulang terhadap campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 1%, serta antara campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 3% terhadap campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 5%.

PEMBAHASAN

Kekuatan tekan paling besar, yaitu pada kelompok gipsum tipe III pabrikan sebesar 31,24 MPa dan rerata kekuatan tekan paling kecil yaitu pada kelompok gipsum tipe III daur ulang sebesar 4,54 MPa. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian Zhu dkk, yang menunjukkan penurunan kekuatan tekan pada gipsum daur ulang. Hal ini dikarenakan peningkatan porositas internal pada gipsum daur ulang yang disebabkan oleh partikel gipsum daur ulang yang berporus.²⁶

Partikel yang lebih porus akan membutuhkan lebih banyak air dalam proses pencampuran menghasilkan *excess free water* (jumlah air berlebih) yang lebih banyak.²⁵ Jumlah air berlebih dibutuhkan untuk membungkus permukaan partikel dan mengisi bagian antar partikel yang kosong sehingga tercapainya konsistensi normal pada proses pencampuran.²⁶ Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan yaitu bubuk dan air tidak dapat tercampur secara homogen ketika menggunakan rasio W/P yang sesuai dengan ketetapan rasio W/P gipsum tipe III. Gipsum tipe III daur ulang berhasil tercampur homogen dengan meningkatkan jumlah air yang digunakan, yaitu semula 30 mL menjadi 60 mL. Penelitian Zhu dkk, menunjukkan gipsum daur ulang membutuhkan jumlah air yang lebih banyak untuk mendapatkan konsistensi yang normal pada proses pencampuran yaitu dari rasio W/P 0,62 menjadi 0,83.²⁶ Jumlah air berlebih pada proses pencampuran tidak bereaksi tetapi terjebak dalam sampel ketika proses *setting*, selanjutnya akan menguap dan meninggalkan rongga pada sampel saat *setting* telah selesai yang menyebabkan kekuatan tekan menjadi rendah. Rasio W/P yang tinggi akan meningkatkan jumlah air berlebih serta menurunkan kekuatan tekan dari gipsum.²⁵ Hal ini juga sejalan dengan penelitian Pereira dan Camarini yang melakukan daur ulang gipsum suhu 100 °C, 150 °C, dan 200 °C dengan rasio W/P 0,6 dan 0,7. Penelitian tersebut menghasilkan penurunan kekuatan tekan pada rasio W/P yang lebih besar.²⁷

Uji *one-way* Anova (tabel 1) menunjukkan perbedaan antar kelompok dikarenakan perbedaan konsentrasi PCC yang ditambahkan pada gipsum daur ulang menghasilkan C-S-H sebagai zat *binder* (pengikat) sehingga memengaruhi kekuatan tekan dari masing-masing kelompok.

Post Hoc LSD (tabel 2) menunjukkan perbedaan kekuatan tekan yang signifikan antara gipsum tipe III pabrikan dengan gipsum tipe III daur ulang. Hal ini disebabkan oleh perbedaan metode kalsinasi yang memengaruhi nilai rerata kedua kelompok.

Metode kalsinasi untuk mendapatkan gipsum tipe III pabrikan yaitu pemanasan pada suhu 120-130 °C dalam *autoclave* bertekanan dan kondisi basah.¹⁵ Metode ini melepaskan molekul air dari gipsum dihidrat secara per-

lahan sehingga menghasilkan partikel tipe α -hemihidrat dengan kristal yang besar, padat, bentuknya lebih teratur, serta menghasilkan sedikit porus.²⁸ Metode kalsinasi ini disebut juga sebagai pemanasan basah. Metode diawali dengan meletakkan gipsum dihidrat ke dalam *autoclave* selama 5-7 jam, setelah pemanasan selesai dilanjutkan dengan pengeringan pada suhu $\pm 100^\circ\text{C}$, selanjutnya gipsum dihancurkan hingga partikel 100-200 *mesh* atau 74-150 μm , semakin halus ukuran partikel akan menghasilkan gipsum yang semakin baik.²⁹ Berbeda dengan penelitian yang dilakukan, yaitu menggunakan kalsinasi dengan *oven* pada suhu 160 °C dalam kondisi kering yang akan menghasilkan tipe partikel β -hemihidrat. Hal ini dikarenakan suhu di dalam *oven* meningkat dengan cepat dan tidak secara bertahap menghasilkan produksi panas yang cepat pada permukaan bubuk bukan pada bagian inti bubuk sehingga menyebabkan kehilangan air secara cepat. Metode kalsinasi ini menyebabkan tidak sempurnanya perubahan dihidrat menjadi hemihidrat, oleh karena itu partikel yang dihasilkan memiliki kristal lebih kecil, tidak teratur, dan lebih porus. Tipe partikel porus menghasilkan kekuatan tekan yang rendah.^{30,31} Penelitian Abidoye dan Bello menunjukkan daur ulang gipsum menggunakan *oven* suhu 160 °C selama 40 menit menghasilkan kekuatan tekan gipsum daur ulang yang lebih rendah dari gipsum pabrikan yaitu 273 kN/m² dan 409 kN.³² Penelitian Bardella dan Camarini juga menunjukkan kekuatan tekan yang rendah pada gipsum daur ulang menggunakan *oven* suhu 150 °C, 180 °C, dan 200 °C dibandingkan dengan gipsum pabrikan, perbedaan nilai kekuatan tekan ini dipengaruhi oleh kristal partikel gipsum daur ulang yang dihasilkan pada proses kalsinasi.³³

Tabel 2 *Post Hoc* LSD menunjukkan perbedaan kekuatan tekan yang tidak signifikan bila membandingkan gipsum tipe III daur ulang terhadap campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 1%, serta antara campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 3% terhadap campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 5%, meskipun begitu terdapat perbedaan signifikan pada kelompok lainnya. Hal ini dikarenakan proses pembuatan sampel yang dilakukan selama 2 hari yaitu hari pertama dilakukan pembuatan sampel kelompok gipsum tipe III pabrikan, gipsum tipe III daur ulang, dan campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 3%, lalu dilanjutkan hari kedua pembuatan sampel sebagian kelompok campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 3%, kelompok campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 1%, dan campuran gipsum tipe III daur ulang dan PCC 5%. Perbedaan hari inilah yang dapat memengaruhi nilai kekuatan tekan. Hal ini dikarenakan PCC memiliki standar nilai kekuatan tekan berdasarkan usia 3, 7, dan 28 hari, yaitu kekuatan tekan dari PCC akan meningkat seiring dengan bertambahnya usia dari produk PCC.³⁴

Hasil kekuatan tekan yang tidak signifikan antar kelompok juga ditunjukkan karena adanya perbedaan rentang waktu antara pembuatan dengan pengujian sampel. Kelompok campuran dengan PCC 3% dibuat di hari pertama yang memiliki rentang waktu 2 hari menghasilkan

nilai kekuatan tekan yang tidak signifikan berbeda terhadap kelompok campuran dengan PCC 5%, begitupun dengan kelompok campuran PCC 1% yang dibuat di hari kedua memiliki rentang waktu 1 hari menghasilkan nilai kekuatan tekan yang tidak signifikan berbeda terhadap kelompok gipsium tipe III daur ulang. Hal ini sesuai dengan penelitian Mulyati dan Suhendri, yakni kekuatan tekan PCC terus meningkat pada usia 3, 14, dan 28 hari.¹⁸ Penelitian Susanto dkk, juga menunjukkan peningkatan kekuatan tekan PCC pada usia 7, 28, 91, dan 180 hari. Peningkatan kekuatan tekan memiliki korelasi dengan penurunan porositas, hal ini dikarenakan proses hidrasi yang berjalan secara terus-menerus.²² Reaksi kimia yang terjadi pada penelitian ini dapat dijabarkan berdasarkan reaksi hidrasi dari PCC karena gipsium sudah termasuk ke dalam komposisi PCC.

Gipsium pada PCC digunakan untuk mengontrol *setting time* semen yang berlangsung cepat. *Setting time* dapat diperlambat dengan zat Aft yang dihasilkan dari reaksi antara gipsium, *clinker* berupa C₃A, dan air. Aft akan membuat lapisan pada permukaan kristal partikel saat hidrasi berlangsung sehingga proses hidrasi dapat terhambat, sehingga semakin banyak Aft yang dihasilkan akan memperlambat *setting*.³⁴⁻³⁶ Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan yaitu pada penambahan PCC dengan konsentrasi yang semakin tinggi menghasilkan *setting time* yang semakin lambat, dengan *setting time* gipsium tipe III pabrikan berlangsung paling cepat yaitu sekitar 30 menit dan campuran dengan PCC 5% berlangsung paling lambat yaitu sekitar 75 menit.

Reaksi hidrasi dari PCC meliputi proses hidrasi *clinker* dan zat aditif yang masing-masing akan menghasilkan senyawa CSH serta akan meningkatkan kekuatan tekan.^{35,36} Penelitian ini sejalan dengan penelitian Li dkk, yang menambahkan gipsium pabrikan dengan OPC konsentrasi 3%, 5%, 10%, dan 15% menunjukkan terdapat peningkatan kekuatan tekan seiring dengan peningkatan konsentrasi OPC yang ditambahkan.²⁰ Penelitian ini menambahkan PCC, yaitu semakin tinggi konsentrasi PCC, semakin bertambahnya senyawa C-S-H sebagai senyawa *binder* dan semakin meningkatnya kekuatan tekan dari sampel sesuai dengan tabel 1 yang semakin

meningkat bila membandingkan gipsium daur ulang murni dan gipsium daur ulang yang ditambahkan PCC.

Kekuatan tekan gipsium tipe III setelah 1 jam seharusnya sebesar 20,7 MPa dan tidak lebih dari 34,5 MPa. Penelitian ini menunjukkan rerata kekuatan tekan gipsium tipe III pabrikan sebesar 31,24 MPa, gipsium tipe III daur ulang tanpa penambahan PCC sebesar 4,54 MPa, dan hasil tertinggi dicapai jika gipsium tipe III daur ulang ditambahkan PCC 5% yaitu sebesar 7,84 MPa. Gipsium tipe III daur ulang maupun gipsium tipe III daur ulang yang ditambahkan PCC masih terlalu jauh untuk menyamai kekuatan tekan gipsium tipe III pabrikan. Hasil campuran dengan PCC juga masih 4x lebih kecil dari nilai kekuatan tekan gipsium tipe III pabrikan dan 3x lebih kecil dari kekuatan tekan gipsium tipe III yang tercantum dalam literatur, sehingga penggunaan kembali sebagai model kerja yang membutuhkan kekuatan tekan besar belum berhasil terpenuhi. Potensi penggunaan kembali hasil daur ulang gipsium tetap dapat dilakukan sebagai bahan alternatif gipsium tipe II yang membutuhkan kekuatan tekan tidak sebesar gipsium tipe III. Gipsium tipe II setidaknya harus memiliki kekuatan tekan 9,0 MPa. Campuran dari gipsium daur ulang dan PCC 5% hampir mencapai nilai kekuatan tekan gipsium tipe II sehingga bahan ini memiliki potensi sebagai pengganti gipsium tipe II yang digunakan sebagai model studi. Penggunaan gipsium tipe II saat ini sama banyaknya dengan penggunaan gipsium tipe III karena gipsium tipe II digunakan pada banyak aplikasi di bidang kedokteran gigi. Penggunaan kembali gipsium daur ulang sebagai bahan alternatif gipsium tipe II juga tetap memberikan keuntungan karena sifatnya yang ekonomis dan ramah lingkungan.

Disimpulkan bahwa penambahan berbagai konsentrasi PCC ke dalam gipsium tipe III daur ulang meningkatkan kekuatan tekan gipsium tipe III daur ulang, meskipun belum mencapai nilai kuat tekan dari gipsium tipe III pabrikan. Penambahan PCC yang semakin tinggi meningkatkan jumlah C-S-H yang menyebabkan kuat tekan dari gipsium tipe III daur ulang semakin tinggi. Penggunaan gipsium tipe III daur ulang sebagai model kerja belum berhasil terpenuhi, meskipun berpotensi menjadi bahan gipsium tipe II alternatif dalam bidang kedokteran gigi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anusavice KJ, Shen C, Rawls HR. Phillips' science of dental materials. 12nd ed. St.Louis:Elsevier Health Sciences; 2012
2. van Noort R, Barbour M. Introduction to dental materials. Mosby: Elsevier Health Sciences; 2013
3. Zakiyuddin A, Joesiana D, Khoirurrijal RA, Astutiningsih S. Recyclability of dental gypsum via calcination. Materials Science Forum. 2020; 1000: 90-6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1000.90>
4. Fernandes KA, Vidhya B, Muraleedhara B, Subramanya S, Shakkira MK, Abdul M. A comparative study of the effect of different disinfectant solutions on the compressive strength of type III gypsum. J Pharm Bioallied Sci. 2020; 12(1): 530-7. Diakses 6 Januari 2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7595534/>
5. Sari WP, Yandi S, Chairunnisa F. Uji komposisi gipsium tipe III pabrikan dan gipsium tipe III daur ulang dengan teknik x-ray fluorescence spectrometer (XRF) dalam upaya pemanfaatan limbah gipsium kedokteran gigi. Menara Ilmu. 2021; 15(1): 1-5. <https://doi.org/10.31869/mi.v15i1.2372>
6. Nikulicheva TB, Nikulish IS, Pilyuk EA. Recycling and disposal of gypsum-containing waste generated in the production of citric acid. IOP Publishing. 2021; 1-5. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012152>
7. Martos JLG, Styles D, Schoenberger H, Lahl BZ. Construction and demolition waste best management practice in Europe. Elsevier. 2018; 166-78. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>
8. Jalali J, Pierre G, Herve C, Emma A, Thiery L. Isolation and screening of indigenous bacteria from phosphogypsum-contaminated soils for their potential in promoting plant growth and trace elements mobilization. J Environ Manag. 2020; 260: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110063>
9. Chavali RVP, Hari PRP. Volume change behavior of phosphogypsum treated clayey soils contaminated with inorganic acids-a micro level study. J Environ Eng Landscape Manag 2018; 26(1): 8-18. <http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2017.1331168>
10. Silva MV, Lilian RR, Marcia MAM, Renato BO. Phosphogypsum, tropical soil and cement mixtures for asphalt pavements

- under wet and dry environmental conditions. *Resourc Conserv Recycl*. 2019; 144: 123-36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.029>
11. Montero A, Tojo Y, Matsuo T, Yamada M, Asakura H, Ono Y. Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs. *J Hazard Mater* 2010; 747-53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.072>
 12. Sutanto A, Chovistaria M, Saputra, Rahmawati N, Suprayitno. Identifikasi bakteri pereduksi sulfat pada kawah air panas Nir-wana Suoh Lampung Barat. *Bioloa*. 2021; 122-7. <https://doi.org/10.24127/bioloa.v2i2.1089>
 13. Mohajan HK. Acid rain is a local environment pollution but global concern. *Open Sci J Analyt Chem*. 2019; 3(5): 47-55
 14. Jakarta. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. *Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 333*. 2014
 15. Manappallil JJ. *Basic dental materials*. 4th ed. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers; 2016
 16. Ngerchuklin P, Yongpradern N, Boonruang A, Kanchanasutha S, Laoaayporn P, Busabok C. Upgrading of waste gypsum for building materials. *Trans Tech Publications Ltd*. 2018; 766: 211-6. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.766.211>
 17. Purnawan I, Prabowo A. Pengaruh penambahan limestone terhadap kuat tekan semen portland komposit. *J Rekayasa Proses*. 2017; 11(2): 86-93. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.31136>
 18. Mulyati ST, Suhendri. Studi perbandingan kuat tekan beton normal menggunakan semen Portland tipe I dan Portland composite cement. *J Momentum*. 2013; 15(2): 15-8
 19. Irawan RR. *Semen Portland di Indonesia untuk aplikasi beton kinerja tinggi*. Bandung: Pusjatan; 2013
 20. Li Z, Xu K, Peng J, Wang J, Ma X, Niu J. Study hydration and mechanical property of Portland Cement-blended recycled plaster materials. *Adv Mater Sci Eng*. 2018; 1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/2692347>
 21. Mulyati, Herman. Komposisi dan kuat tekan beton pada campuran portland composite cement, pasir dan kerikil sungai dari beberapa quarry di Kota Padang. *J Momentum*. 2015; 17(2): 34-8
 22. Susanto D, Zulfikar D, Olivia M. Karakteristik beton menggunakan Portland Composite Cement (PCC) dan silica fume untuk aplikasi struktur di daerah laut. *J Rekayasa Sipil*. 2019; 15(1): 1-11. <https://doi.org/10.25077/jrs.15.1.1-11.2019>
 23. Hatrick CD, Eakle WS. *Dental materials: clinical applications for dental assistants and dental hygienists*. 3rd ed. St. Louis: Elsevier; 2016.
 24. Adellina T, Triaminingsih S, Indriani DJ. The effects of K₂SO₄ solution on the compressive strength of dental gypsum type III. *IOP Publishing*. 2017; 1-6. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/884/1/012089>
 25. Powers JM, Wataha JC. *Dental materials properties and manipulation*. 10th ed. St. Louis: Elsevier; 2013
 26. Zhu C, Zhang J, Yi W, Cao W, Peng J, Liu J. Research on degradation mechanisms of recycled building gypsum. *Construc Build Mater* 2018; 173: 540-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.060>
 27. Pereira VM, Camarini G. Evaluation of dehydration temperature on properties of recycled gypsum plaster. *Trans Tech Publicat* 2016; 668: 275-82. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.275>
 28. Gladwin M, Bagby M. *Clinical aspects of dental materials: theory, practice, and cases*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health; 2013
 29. Wahyuning AP, Hasratiningsih Z, Manurung R. Differentiation of physical and mechanical properties analysis of self made gypsum product with raw material from tasikmalaya with standar ISO and factory made. *Padjajaran J Dent*. 2008; 143-8. <https://doi.org/10.24198/pjd.vol20no3.14119>
 30. Killedar SM, Shetty R, James J, Karaththodiyi R, Edwin A. A comparative evaluation of abrasion resistance of three commercially available type IV dental stone, dries fusing three different drying techniques-an in vitro study. *J Pharm Bioallied Sci*. 2021; 13(1): 580-5. Diakses 12 Agustus 2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8375857/>
 31. Dulaimi SF, Kanaan SM. The effect of microwave oven drying on the compressive strength of type III and IV dental stones at different time intervals. *Open Dent J* 2018. Diakses 12 Agustus 2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6080061/>
 32. Abidoye LK, Bello RA. Restoration of compressive strength of recycled gypsum board powder. *Pacific J Sci Technol* 2010; 11(2): 41-50. Diakses https://www.researchgate.net/publication/283149141_Restoration_of_Compressive_Strength_of_Recycled_Gypsum_Board_Powder
 33. Bardella PS, Camarini G. Recycled plaster: physical and mechanical properties. *Trans Tech Publication* 2012; 374: 1307-10. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.1307>
 34. Jakarta. Standar nasional indonesia 7064 tahun 2014 tentang semen portland komposit. *Badan Standadisasi Nasional*. 2014
 35. Bye G, Livesey P, Struble L. *Portland cement*. 3rd ed. London: ICE Publishing; 2011
 36. Hewlett PC, Liska M. *Lea's chemistry of cement and concrete*. 5th ed. Oxford: Elsevier; 2019