

# TEKNIK PEMBENTUKAN COR GEL UNTUK FABRIKASI KERAMIK PADAT DENGAN BENTUK KOMPLEK

## GEL CASTING METHOD FOR COMPLEX-SHAPED DENSE CERAMIC FABRICATION

Ike Setyorini <sup>a</sup>, Ria Julyana Manullang <sup>b</sup>, Hernawan <sup>b</sup>, Karlina Noordiningsih<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik  
Jl. Sokonandi no Yogyakarta

<sup>b</sup>Balai Besar Keramik  
Jl. Ahmad Yani no 392 Bandung

Naskah masuk: 22 Juli 2019, Revisi: 5 November 2019, Diterima: 14 November 2019

### ABSTRAK

*F*abrikasi keramik padat berbentuk kompleks telah dilakukan melalui teknik pembentukan cor gel. Bahan dasar yang digunakan berupa alumina. Alumina dicampur dengan dispersan dan monomer methacrylamide (MAM)-Methylenebisacrylamide (MBAM) dengan perbandingan tertentu hingga suspensi memiliki kemampuan mengalir yang baik. Kemudian ditambahkan inisiator berupa amonium persulfat (APS) dan katalis Tetra-methylethylene diamine (TEMED) untuk mempercepat reaksi polimerisasi yang terjadi. Suspensi kemudian dituang ke dalam cetakan lilin hingga mengeras dan kemudian dibakar pada temperatur 1300 °C. Hasil penelitian menunjukkan viskositas minimum suspensi diperoleh dengan kandungan 80% alumina dan penambahan dispersan sebesar 0,15% berat alumina. Penambahan APS dan TEMED masing – masing sebanyak 0,2% dari larutan monomer dan penambahan polietilenglikol (PEG) sebesar 1 µl per gram alumina memberikan kuat mekanik mentah terbaik sebesar 61,29 kg/cm<sup>2</sup>. Penambahan PEG bermanfaat untuk mengatasi masalah laminasi akibat reaksi oksidasi karena pengaruh udara luar.

**Kata Kunci:** cor gel, alumina, polimerisasi, keramik padat, PEG

### ABSTRACT

*T*he fabrication of complex-shaped dense ceramic has been done by gel casting method. Alumina was used as raw material in this study. Alumina was mixed with methacrylamide (MAM) dispersant and Methylenebisacrylamide (MBAM) monomer with a certain ratio until the suspension has a good ability to flow. Ammonium persulphate (APS) as an initiator and Tetra-methylethylene diamine (TEMED) as catalyst were added to accelerate the

*polymerization reaction. The suspension was then poured into wax mold, stayed until harden and burned at 1300°C. The results showed the minimum viscosity of suspension is obtained with 80% alumina content and addition of dispersant at 0.15% weight of alumina. The addition of APS and TEMED at 0.2% weight of monomer solution and the addition of PEG at 1 µl per gram alumina provided the best mechanical strength of green body at 61.29 kg/cm<sup>2</sup>. Addition of PEG was used to overcome the problem of lamination due to oxidation reactions by air.*

**Keywords:** *gel casting, alumina, polymerization, dense ceramics, PEG*

## I. PENDAHULUAN

Pembuatan keramik dengan bentuk kompleks dan ketebalan yang bervariasi tanpa segregasi butiran sangat sulit dihasilkan dengan teknik konvensional seperti pembentukan dengan teknik cor (*slip casting*) menggunakan gipsum. Bentuk keramik kompleks umumnya dapat disiapkan dengan beberapa metode seperti cor gel (*gel casting*) dan *injection moulding* [1], sementara teknik pembentukan yang dapat menghasilkan bentuk kompleks seperti *injection moulding* masih relatif mahal, baik peralatan maupun bahan, dan terbatas untuk komponen ukuran relatif kecil. Disamping itu, *injection moulding* memerlukan lebih banyak imbuhan dibanding cor gel. Hal ini tentunya akan sangat mempengaruhi perlakuan selama proses pembakaran karena penghilangan imbuhan

memerlukan kendali yang cermat dan waktu yang lebih panjang.

Cor gel (*gel casting*) adalah suatu teknik pembentukan keramik melalui proses polimerisasi monomer organik secara *in-situ* yang menyebabkan suatu bubur suspensi keramik menjadi kaku. Cor gel dapat mengatasi beberapa keterbatasan seperti waktu pengikatan binder yang lama pada metode *injection moulding* maupun laju pengecoran yang lambat pada metode *slip casting* [1,2]. Teknik ini mampu menghasilkan produk kualitas tinggi dan seragam pada seluruh bagian, bentuk kompleks, produksi cepat, murah biaya peralatan dan cetakan, dimensi mendekati sesungguhnya (*near-net shaped*) dan keberulangan (*reproducible*) tinggi, rentang ukuran produk lebar, kuat mentah/kering tinggi [3-8].

Teknik pembentukan ini dikembangkan pada tahun 1991 oleh Mark Janney dan Omatete, peneliti di Oak Ridge National Laboratory (ORNL)-Amerika Serikat [9]. Pemanfaatan teknik ini terus dikembangkan dan dimantapkan pada beberapa tahun terakhir pada banyak sistem keramik. Salah satu material yang banyak dikembangkan dengan menggunakan teknik ini adalah alumina. Beberapa penelitian tentang cor gel telah dilakukan dengan menggunakan alumina seperti Chang Gi Ha [10] yang meneliti tentang pengaruh ukuran partikel alumina terhadap proses cor gel, J. V. Ranjith Kumar dkk [11] yang meneliti tentang pengaruh dispersan terhadap sifat reologi suspensi alumina, serta S. Dhara dkk [12] yang meneliti tentang kegunaan teknik cor gel dalam pembuatan keramik dengan bentuk kompleks.

Teknik pembentukan cor gel sesungguhnya tidak hanya untuk menghasilkan keramik padat tetapi keramik berpori seperti yang dilakukan oleh Yuan dkk [13] yang membuat keramik berpori dari *hydratable alumina* dan serbuk MgO sebagai bahan bakunya. Keramik berpori dapat dihasilkan dengan

penambahan imbuhan yang berfungsi sebagai pembentuk pori (*pore former*) seperti tepung baik yang berasal dari beras, jagung ataupun kentang. Wu dkk [14] membuat keramik berpori  $\text{Si}_3\text{N}_4$  dengan *gelcasting* menggunakan *poly-hollow microspheres* sebagai agen pembentuk pori. Imbuhan tersebut akan terdekomposisi dan meninggalkan pori di dalam bahan keramik. Keramik berpori digunakan apabila kemampuan tertentu dikehendaki misalnya bahan dengan sifat insulasi panas ataupun permeabilitas terhadap fluida. Adanya pori memungkinkan konduktivitas panas rendah dan memungkinkan pula aliran fluida dari satu permukaan ke permukaan disebaliknya dapat berlangsung sebagai akibat adanya pori terhubung.

Fabrikasi dengan teknik pembentukan secara cor gel menjadi sangat penting untuk dikuasai terutama untuk penggunaan keramik teknik. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kemampuan pembuatan keramik teknik dengan cara cor gel yang difokuskan pada keramik padat (*dense ceramics*) dengan bentuk kompleks. Hal ini berkaitan dengan permintaan komponen permesinan

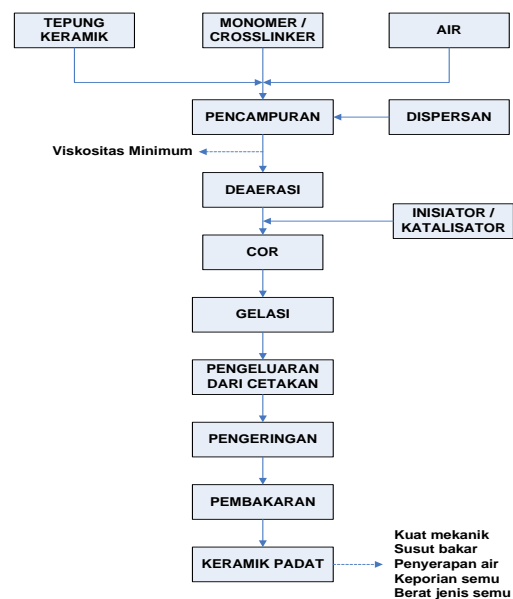
yang memerlukan bahan dengan kepadatan tinggi dan bentuk yang sangat kompleks yang sulit dihasilkan dengan pembentukan konvensional. Sistem suspensi berbasis air juga dipilih dalam penelitian ini karena kemudahan, kemurahan dan keramahan terhadap lingkungan. Dispersan polielektrolit ditambahkan untuk menghasilkan suspensi stabil pada tingkat beban padatan yang setinggi-tingginya namun tetap memberikan kemampuan mengalir (fluiditas) tinggi. Sistem suspensi yang memiliki tingkat beban padatan tinggi akan memberikan susut mentah/bakar yang rendah sehingga memungkinkan *near-net shaped* didekati bahkan dicapai.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan di laboratorium Balai Besar Keramik Bandung. Bahan yang digunakan berupa alumina kalsin dengan kehalusan butir sebesar 0,5 – 1,5µm serta *methacrylamide* (MAM) dan *methylenebisacrylamide* (MBAM) sebagai monomer dan *crosslinker*. Sebagai inisiator dan katalisator untuk mengawali dan mempercepat polimerisasi yang diikuti dengan pengikatan butiran alumina digunakan sistem *amonium persulfat* (APS) dan

*tetramethyl-ethylene diamine* (TEMED). *Diammonium Hydrogen Citrate* (DHC) digunakan sebagai dispersan untuk mendapatkan suspensi stabil.

Secara garis besar, teknik pembentukan cor gel digambarkan secara skematis pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses pembentukan dengan cara cor gel

MAM dan MBAM dengan perbandingan 11 : 1 dilarutkan dalam 50 ml air dan selanjutnya ditambahkan tepung alumina dengan perbandingan monomer : alumina sebesar 1 : 4.. Beban padatan alumina dari suspensi dapat mencapai 60% volume yang setara dengan 80% berat. Dispersan kemudian ditambahkan ke dalam campuran dengan konsentrasi yang berbeda –

beda dan dilakukan pengamatan terhadap viskositas dari suspensi dengan menggunakan viskotester. Viskositas minimum yang dapat dicapai akan menjadi patokan untuk pengembangan fabrikasi.

APS dilarutkan terlebih dahulu sebanyak 10 g kedalam 100 ml air sebelum ditambahkan bersama TEMED ke dalam bubuk suspensi. Larutan APS dan TEMED selanjutnya ditambahkan kedalam bubuk suspensi sebanyak masing-masing 0,05 % hingga 0,2 % dari jumlah monomer dalam larutan yang mengacu terhadap hasil penelitian dari Mark A. Janney dkk [9]. Permasalahan yang muncul pada teknik pembentukan cor gel adalah terjadinya pengembangan permukaan (*surface-exfoliation*) karena penetrasi dan reaksi polimer dengan oksigen ketika produk gelas terpapar di udara pada saat pengeringan [15]. Hal tersebut dapat dicegah dengan menambahkan polimer larut air (*water-soluble polymer*) seperti polietilenglikol (PEG) ke dalam sistem campuran. Larutan ini kemudian dituangkan ke dalam cetakan lilin dan dibiarkan mengeras pada suhu ruangan.

Setelah produk mengeras, produk dilepaskan dari cetakan lilin

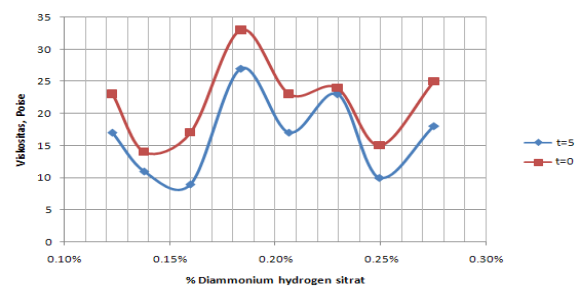
dan dibakar pada temperatur 1300 °C dengan ditahan selama 3 jam. Beberapa contoh benda uji dibuat untuk karakterisasi produk yang terbentuk. Karakterisasi dilakukan dengan mengukur sifat mekanik keramik seperti kuat lentur (*Modulus of Rupture (MOR)*), penyerapan air, susut bakar, keporian semu dan berat jenis semu.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Pengaruh Penambahan DHC terhadap Viskositas Suspensi

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara viskositas dari suspensi pekat alumina dengan penambahan dispersan diammonium hidrogen sitrat (DHC).

Ada tiga viskositas minimum yang dihasilkan dengan penambahan DHC yaitu pada penambahan 0,15%, 0,21% dan 0,25% terhadap berat alumina.



**Gambar 2.** Pengaruh penambahan DHC terhadap viskositas suspensi alumina 80% berat

Berdasarkan teori Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO), kestabilan partikel dalam koloid bergantung pada keseimbangan dari gaya tarik menarik dan tolak menolak disekitar partikel yang tersuspensi. Pengendalian pH dalam larutan dapat mengubah muatan pada permukaan partikel. Dalam beberapa kasus, muatan yang terjadi tidak dapat mengatasi gaya tarik menarik Van der Waal sehingga partikel akan cenderung membentuk flok. Penggunaan dispersan dimaksudkan untuk membentuk suatu lapisan ganda elektrik yang dapat menghasilkan gaya tolak – menolak sehingga partikel terdispersi kembali [16].

Pada rentang penambahan DHC 0,12% hingga 0,18%, penurunan viskositas disebabkan oleh terbentuknya lapisan ganda elektrik yang menghasilkan gaya tolak – menolak sehingga partikel terdispersi sedangkan peningkatan viskositas diduga karena meningkatnya karboksilat bebas dan kuat ionik (*ionic strenght*) yang mengakibatkan penipisan lapisan ganda (*double layer*). Penipisan lapisan ganda meningkatkan gaya tarik menarik Van der Wall dan melemahkan gaya tolak

menolak yang menyebabkan peningkatan viskositas suspensi.

Ion – ion negatif karboksilat dihasilkan dari proses disosiasi DHC. Semakin tinggi pH, disosiasi DHC menjadi semakin besar. Sementara permukaan alumina bermuatan positif pada keadaan asam dan menurun ketika pH meningkat dan netral ketika mencapai titik tak-bermuatan atau *zero point of charge* (zpc). Melewati zpc, permukaan alumina menjadi bermuatan negatif. Alumina memiliki zpc netral pada pH sekitar 8,7. Pengendalian pH diperlukan untuk mendapatkan disosiasi maksimum dari DHC.

Pada rentang penambahan DHC 0,18% hingga 0,25% diperkirakan terjadi proses adsorpsi ion – ion negatif karboksilat oleh permukaan alumina yang bermuatan negatif sehingga viskositas akan menurun. Pada rentang penambahan DHC 0,25% hingga 0,28% terjadi peningkatan viskositas disebabkan oleh adanya perubahan konfigurasi rantai karboksilat yang berada dalam larutan Viskositas meningkat karena kadar rantai karboksilat yang mengalami perubahan konfigurasi bertambah yang menyebabkan penurunan gaya tolak – menolak elektrosterik. Peningkatan viskositas

juga diperkirakan karena terjadinya proses osmosis yang menyebabkan butiran alumina yang terlapis karboksilat terkonfigurasi mendekat satu dengan lainnya yang menghasilkan flok.

Adanya perubahan konfigurasi dari karboksil dinyatakan dipengaruhi oleh kadar ion  $\text{NH}_4^+$  sebagaimana dinyatakan Yoshihiro Hirata dkk [17]. Yoshihiro memperkirakan perubahan konfigurasi dari rantai linear disertai pula dengan penurunan jarak efektif interaksi yang menyebabkan turunnya gaya tolak menolak elektrosterik dan kenaikan viskositas.

### **Suspensi Alumina untuk Pembentukan Cor gel**

Berdasarkan Gambar 2 dan sebagaimana umumnya sifat dari suspensi keramik, viskositas keramik berubah seiring dengan peningkatan waktu (*thixotropik*). Hal ini seringkali menjadi kendala terhadap proses serta mutu produk. Oleh karena itu perubahan viskositas dalam larutan dicegah dengan pengadukan secara mekanikal maupun ultrasonik. Viskositas yang tinggi mengakibatkan kesulitan penuangan dan juga menunjukkan berlangsungnya pembentukan flok yang akan

mengarahkan pada porositas tinggi dan ketidakhomogenan pada produk akhir.

Suspensi alumina yang digunakan untuk pembentukan cor gel adalah suspensi dengan penambahan DHC sebesar 0,15%, yang berada pada rentang penambahan DHC 0,13% hingga 0,17%. Pertimbangan menggunakan suspensi ini karena suspensi berada pada viskositas minimum dan menggunakan aditif DHC yang paling rendah. Penggunaan aditif yang rendah diharapkan dapat meningkatkan kepadatan pada produk bakaran, mengurangi susut bakar tanpa mempengaruhi nilai kuat kering.

### **Pembentukan dengan Cor Gel**

Proses pengikatan butiran alumina dalam suspensi adalah dengan pembentukan gel sebagai hasil polimerisasi antara monomer (MAM) dengan *crosslinker* (MBAM). Polimerisasi diinisiasi oleh adanya APS dan dipercepat dengan penambahan TEMED. Kondisi optimum ditentukan oleh gel yang terbentuk dan gel yang terbentuk bergantung pada tingkat dari besarnya monomer dan polimer yang dapat larut dalam air serta

perbandingan dari monomer terhadap polimer.

Gel terbentuk akan mengikat butiran-butiran alumina. Perbandingan antara gel terhadap butiran alumina serta sifat gel yang dihasilkan akan menentukan kuat mentah dan juga kemampuan untuk pemesian. Pada penelitian ini pengamatan dilakukan terhadap suspensi terdiri dari 80% berat alumina ditambahkan 20% larutan. Larutan mengandung

MAM/MBAM = 11 g /1 g dalam 50 ml air. Dispersan ditambahkan sebanyak 0,15% berat alumina sementara jumlah inisiator dan katalisator divariasikan antara 0,05 % - 0,2 % dari jumlah monomer atau sekitar 0,2 µl hingga 1 µl per gram alumina. Tabel 1 menunjukkan kuat mentah dan sifat bakaran sangat dipengaruhi oleh penambahan inisiator dan katalisator.

**Tabel 1.** Hasil uji kuat mentah dan hasil bakaran 1300°C

Kode	APS : TEMED : PEG (µl per g alumina)	Kuat mentah MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	Susut bakar (%)	Penyerapan air (%)	Keporitan semu (%)	berat jenis semu (g/cm <sup>3</sup> )
A	1 : 1 : 0	56,744	1,48	20,75	29,52	2,01
B	1 : 1 : 1	61,291	1,43	21,58	29,41	2,08
C	0,8 : 0,7 : 0	52,808	1,31	20,36	28,09	2,12
D	0,6 : 1 : 0	48,833	1,26	20,03	27,31	2,14
E	0,4 : 0,4 : 0	46,681	1,43	22,27	31,15	2,04
F	0,2 : 0,2 : 0	28,314	1,35	25,55	33,48	2,03
G	0,4 : 0,2 : 0,3	33,404	1,34	21,12	31,77	1,99

Tanpa penambahan PEG, kode contoh A dengan jumlah APS dan TEMED yang lebih besar daripada kode contoh F menunjukkan hasil kuat mekanik mentah yang lebih tinggi. Peningkatan jumlah APS dan TEMED akan meningkatkan reaksi polimerisasi yang terjadi sehingga memperkuat ikatan antar butiran alumina. Hal ini akan mengakibatkan kemudahan dalam pemesian.

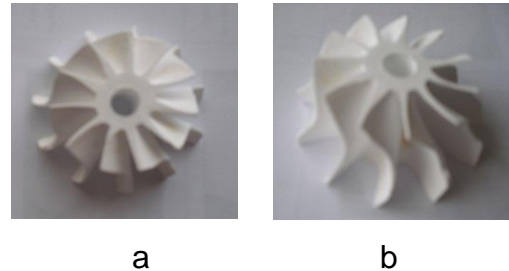
Permesinan dilakukan untuk memperhalus bodi produk mentah. Produk mentah cor gel harus cukup kuat untuk mengalami proses permesinan agar tidak menimbulkan cacat produk baik retak maupun pecah. Pada penambahan inisiator dan katalisator yang relatif kecil (kode contoh E dan F) penampakan visual menunjukkan adanya laminasi. Hal ini kemungkinan karena reaksi gelasi



yang lambat yang memungkinkan udara penetrasi dan bereaksi dengan monomer/crosslinker. Upaya mengatasi telah dilakukan dengan penambahan PEG untuk melindungi dari reaksi oksidasi selama gelasi (kode contoh B dan G). Hasilnya menunjukkan masalah laminasi dapat diatasi serta diikuti dengan kenaikan kuat mentah. Penambahan PEG dimaksudkan pula sesungguhnya untuk memberikan sifat plastis hasil gelasi. penelitian yang dilakukan oleh Shang dkk [18] menyatakan bahwa dengan penambahan plastisizer (PEG), bodi yang dihasilkan lebih fleksibel dibandingkan dengan tanpa PEG, bodi yang dihasilkan keras dan rapuh.

Kode contoh F juga memiliki penyerapan air dan keporian semu yang paling besar. Hal ini dikarenakan jumlah penambahan APS dan TEMED yang sedikit mengakibatkan reaksi polimerisasi yang terjadi lebih lambat sehingga masih banyak butiran alumina yang tidak saling mengikat dan ketika dibakar akan membentuk pori yang besar. Penambahan APS dan TEMED tidak mempengaruhi susut bakar dan berat jenis dari keramik.

Dengan melihat hasil sifat mekanik khususnya keporian, dapat dikatakan keramik yang terbentuk dalam penelitian ini merupakan keramik padat. Gambar 3 menunjukkan produk yang dihasilkan melalui teknik pembentukan cor gel.



**Gambar 3.** Produk Keramik Hasil Pembentukan secara Cor Gel komposisi B a) *Turbocharger* tampak atas; b) *Turbcharger* tampak samping

#### IV. KESIMPULAN

Teknik pembentukan cor gel telah berhasil digunakan untuk membuat keramik padat berbentuk kompleks dari bahan dasar alumina. Suspensi alumina yang menghasilkan viskositas paling minimum dengan penambahan DHC paling rendah merupakan suspensi yang baik untuk digunakan sebagai material pembuatan keramik padat dengan cara cor gel yaitu suspensi dengan penambahan DHC sebesar 0,15 %.

Penambahan inisiator dan katalisator masing – masing sebanyak 0,2 % dan 0,2 % dari larutan monomer dengan penambahan

polietilenglikol (PEG) sebesar 1 µl per gram alumina memberikan kuat mekanik mentah terbaik sebesar 61,29 kg/cm<sup>2</sup>.

## DAFTAR PUSTAKA

1. J.M. Tulliani dkk., Development and mechanical characterization of novel ceramic foams fabricated by gel-casting. *J Eur Ceram Soc* (2013)
2. J.Yang, J. Yu, Y. Huang. Recent developments in gelcasting of ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 31, 2569–2591, (2011)
3. SK. Swain, D.K. Segupta, B.P. Singh, S. Bhattacharjee. Gelcasting-A Versatile Process Part 1, *International Ceramic Review*, 54 (3): 174 -177, (2005)
4. SK. Swain, D.K. Segupta, B.P. Singh, S. Bhattacharjee. Gelcasting-A Versatile Process Part 2, *International Ceramic Review*, 54 (4): 252 – 257, (2005)
5. L. Sharifi, S.Ghanbarnezhad, S. Ghofran dan S. H. Mirhosseini, High Porous Alumina Bodies: Production and Properties via Gel-Casting Technique, *International Journal of Advanced Science and Technology* Vol.65. 59-70, (2014)
6. Y. Wang, dkk., Alumina ceramics via gelcasting forming with low-toxicity system, *Advanced Materials Research Vols. 452-453*, 35-40, (2012)
7. G.S. Koclar, *Gelcasting of Alumina Ceramics With Gelatin and Carrageenan Gum and Investigation of Their Mechanical Properties*, Thesis, Department of Chemical Engineering, İzmir Institute of Technology, 2013
8. Mingyue Huang, dkk., Fabrication and characterization of mini alumina ceramic turbine rotor using a tailored gelcasting process, *Ceramics International* 40, 7711–7722, (2014)
9. L. Montanaro, B. Coppola, P. Palmero dan J.M. Tulliani, A Review on Aqueous Gelcasting: a versatile and low-toxic technique to shape ceramics, *Ceramics International*, (2018)
10. Chang Gi Ha. *Effect of Particle Size on Gel-Casting Process and Green Properties of Alumina*. Thesis, Department of Material. Korea : Changwon National University, 2001

11. J.V.R. Kumar, H. N. Roopa and R. R Rao. Colloidal Processing and Gel Casting of Alumina. *International Conference on Advanced Materials and Composites*. Trivandrum, 24 – 26 Oktober: National Institute for Interdisciplinary Science & Technology (2007)
12. S. Dhara, R K Kamboj, M Pradhan dan P. Bhargava. Shape forming of ceramics via gelcasting of aqueous particulate slurries, *Bull. Mater. Sci.*, 25 (6): 565-568, (2002)
13. Lei Yuan, dkk., Fabrication and characterization of Porous MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Ceramics via a novel aqueous Gel-Casting Process. *Jurnal Materials* 2017, 10, 1376, (2017)
14. Jia-Min Wu, Xiao-Yan Zhang, Jin-Long Yang. 2014. Novel porous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics prepared by aqueous gelcasting using Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Journal of the European Ceramic Society* 34,1089–1096, (2014)
15. Jingtao Ma, Zhipeng Xie, Hezhuo Miao, Tibing Cheng. Improved Gelcasting, *American Ceramic Society Bulletin*, 82 (1): 54 – 58, (2003)
16. E.M.E. Ewais, Rheological properties of concentrated alumina slurries: influence of pH and dispersant agent. *TESCE*, 30 (2) : 891 – 912, (2004)
17. Y. Hirata, A. Nishimoto dan Y. Ishihara. Effect of Addition of Polyacrylic Ammonium on Colloidal Processing of  $\alpha$ -Alumina, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 100 (8): 983-990, (1992)
18. Q.Shang, dkk., Gel-tape-casting of aluminum nitride ceramics. *Journal of Advanced Ceramics*, 6(1): 67–72 (2017)