NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO GỐM OXIT NHÔM DÙNG LÀM CHÉN NUNG

A STUDY ON PRODUCING ALUMINA CERAMICS FOR USE IN CRUCIBLES

Nguyễn Văn Dũng, Võ Thị Thu Hiền

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; nvdung@dut.udn.vn

Tóm tắt - Gốm oxit nhôm bền với kim loại nóng chảy hiện đóng một vai trò quan trọng trong sản xuất một số sản phẩm như chén nung, chén nấu chảy kim loại và một số chi tiết chịu lửa. Các phụ gia như phụ gia phân tán (chất đa điện giải), phụ gia hóa dẻo và phụ gia kết dính được sử dụng để cải thiện quá trình tạo hình và các tính chất khác của gốm oxit nhôm. Những phụ gia này rất quan trọng để giúp cho huyền phù đổ rót và mộc có tính chất lưu biến tốt và những tính chất kỹ thuật cần thiết. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng oxit nhôm và các phụ gia đến tính chất đổ rót của huyền phù, khả năng tạo hình cũng như tính chất vật lý, độ xốp biểu kiến và đặc trưng hình thái bề mặt của gốm oxit nhôm.

Từ khóa - oxit nhôm; huyền phù; phụ gia phân tán; chất hóa dẻo; chất kết dính

Abstract - Alumina ceramics which withstand molten metals now play an important role in manufacturing products like crucibles, melting pots for metal, various refractory details. Additives such as dispersion additive (polyelectrolyte), plasticizer, binder are used to improve the shaping process and other properties of alumina ceramics. These additives are very important to give good rheology and other necessary technical properties to the suspension and the green body. In this theme, we study the effect of alumina and additives content on the casting properties of the slurry, the shaping ability, physical properties, apparent porosity as well as surface morphological characteristics of the alumina ceramics.

Key words - alumina; slurries; dispersant additive; plasticizer; binder.

1. Đặt vấn đề

Gốm oxit nhôm (alumina, Al_2O_3) được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như gốm kết cấu (có yêu cầu cao về độ bền cơ, bền nhiệt độ, chịu mài mòn); Gốm điện, điện tử (có tính cách điện hay dẫn điện ion…); Gốm quang học (gốm oxit nhôm mờ); Các loại gốm làm cảm biến nhiệt, khí; gốm dùng trong cấy ghép sinh học… [1].

Gốm oxit nhôm được chia thành gốm oxit nhôm hàm lượng cao (high alumina ceramics, có thành phần oxit nhôm không nhỏ hơn 95%) và gốm oxit nhôm có độ sạch cao (high purity alumina ceramics, thành phần oxit nhôm không nhỏ hơn 99%). Gốm oxit nhôm được xem là đại diện tiêu biểu cho nhóm gốm kết cấu vì được sử dụng phổ biến và có công nghệ chế tạo khá đơn giản so với các nhóm khác.

Thành phần chính tạo thành gốm oxit nhôm là α-Al_2O_3 (khoáng corundum). Khoáng này có khối lượng riêng lớn, nhiệt độ nóng chảy cao (2050^{o}C), trơ về mặt hóa học nên rất ổn định ở điều kiện nhiệt độ thường cũng như nhiệt độ cao; Hệ số dãn nở nhiệt từ 6,5-8,9*10^{-6} K^{-1}; Độ cứng theo thang Mohs là 9; Độ bền uốn ba điểm của gốm đạt 323 MPa [1]. Nhờ những tính chất trên nên gốm oxit nhôm cũng có thể dùng rất tốt trong lĩnh vực chịu nhiệt độ cao để làm chén nung, nồi nấu kim loại và phụ kiện lò nung.

Hiện nay, do sự phát triển của ngành chế tác kim hoàn và ngành nha nên có nhu cầu về chén nung và nấu chảy kim loại ở nhiệt độ cao. Tuy nhiên, trên thị trường Việt Nam hiện nay, chén nấu chảy kim loại được làm từ oxit silic (silica) hay từ samôt, nhiệt độ sử dụng thường chỉ đến 1100^{o}C nên không đáp ứng được nhu cầu. Nghiên cứu này quan tâm đến việc chế tạo chén nung, nồi nấu chảy kim loại từ gốm oxit nhôm, được dùng để nấu chảy các kim loại có nhiệt độ nóng chảy cao như sắt, mangan, đồng, vàng, bạc, crôm, vanadium… nên có tính cấp thiết cao để đáp ứng nhu cầu thị trường.

Biết rằng hai yếu tố quyết định đến tính chất gốm oxit nhôm cũng như các loại gốm kỹ thuật khác là nguyên liệu oxit, phụ gia và kỹ thuật chế tạo.

Nghiên cứu này quan tâm đến việc sử dụng oxit nhôm và các phụ gia phù hợp để làm cho hồ đổ rót có được tính chất lưu biến mong muốn. Các loại phụ gia thường dùng là phụ gia phân tán (chất đa điện giải), phụ gia hóa dẻo, phụ gia kết dính… Kết quả mong muốn là hồ gốm với các hàm lượng pha rắn oxit nhôm khác nhau phải có độ nhớt thấp và ổn định trong khoảng 5-10 Poise để quá trình đổ rót diễn ra tốt nhất [2].

Trong yếu tố kỹ thuật chế tạo, nhóm tác giả nghiên cứu khả năng tạo hình của gốm oxit nhôm để có thể chế tạo chén nung với nhiều hình dạng phức tạp khác nhau.

Có nhiều phương pháp để tạo hình bán thành phẩm chén nung (mộc) như tạo hình dẻo trên khuôn thạch cao, ép đùn, nén ép bán khô, đổ rót... Trong đó, đổ rót là phương pháp thường được lựa chọn do rất hiệu quả trong việc tạo hình các sản phẩm hay chi tiết có hình dạng phức tạp. Thường dùng phương pháp đổ rót trong khuôn thạch cao, có thể rót hồ thừa hay hồ đầy.

Việc đổ rót hồ gốm oxit nhôm cũng như các loại gốm kỹ thuật cao nói chung là công việc khá khó khăn, nguyên nhân do không sử dụng nguyên liệu sét trong cấp phối. Đất sét, cao lanh là nguyên liệu dẻo rất tốt cho quá trình đổ rót (làm cho quá trình bám khuôn tốt) cũng như quá trình tháo khuôn (vì mộc sẽ có độ co phù hợp). Việc không sử dụng đất sét hay cao lanh trong cấp phối gây rất nhiều khó khăn cho quá trình tháo khuôn, đòi hỏi nhược điểm này phải được khắc phục để sản phẩm có được kích thước chính xác và bề mặt phẳng như mong muốn.

2. Nguyên liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên liệu và hóa chất

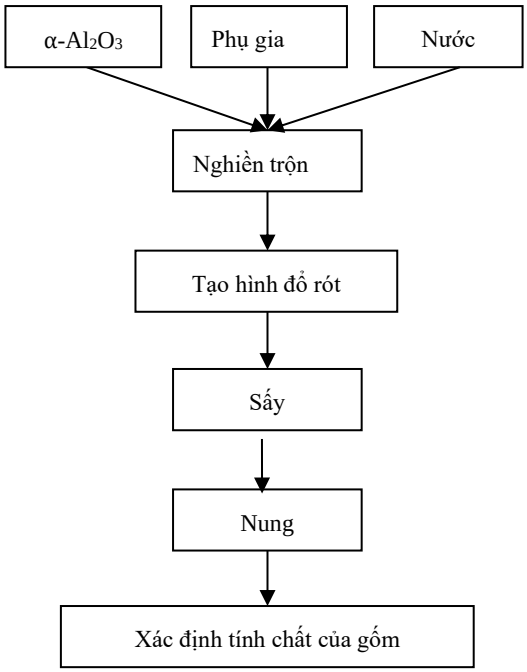
Trong nghiên cứu, nhóm tác giả sử dụng nguyên liệu là α-Al_2O_3 của hãng Kaifeng, Trung Quốc. Thành phần hóa của oxit nhôm được phân tích trên thiết bị XRF-1800 của

hãng Shimadzu, Nhật Bản; Thành phần khoáng được phân tích trên thiết bị Smartlab Rigaku với tia phát xạ CuKα (λ = 1.5405980 Aº), góc quét 2θ từ 20-70º.

Phụ gia phân tán được sử dụng là Dolapix PC21 (Zschimmer&Schwart GmbH&Co, Đức) là chất đa điện giải ammonium polyacrylate PAA-NH_4^+, công thức hóa học $(C_3H_7NO_2)_n$, trọng lượng phân tử khoảng 4500 [3, 4]. Dolapix PC21 là chất lỏng màu vàng, tan trong nước, có tính kiềm, trọng lượng riêng ~1,1 g/cm^3, pH ~ 8,5, là một tác nhân hữu cơ chống keo tụ tốt. Chất đa điện giải là các polymer mà mỗi mắt xích cơ sở mang một nhóm chất điện li, phụ gia này khi được kết nối lên bề mặt hạt oxit nhôm sẽ tạo ra sự chiếm chỗ không gian và lực đẩy tĩnh điện giúp các hạt ôxit nhôm phân tán tốt trong môi trường (hiệu ứng electrosteric). Ngoài ra, để bảo đảm sản phẩm sau khi tạo hình vẫn giữ được hình dạng như mong muốn nhóm tác giả còn dùng thêm glycerine (Trung Quốc) làm chất hóa dẻo, dùng hydroxylpropyl methylcellulose làm chất kết dính [3]. Hydroxylpropyl methylcellulose (HPMC, của Hãng Merk, Đức) có công thức hóa học $C_{12}H_{20}O_{10}$, trọng lượng riêng 1,26-1,31 g/cm^3.

2.2. Qui trình thực nghiệm

Quy trình thực nghiệm được trình bày trong sơ đồ Hình 1.



Hình 1. *Sơ đồ quy trình thực nghiệm*

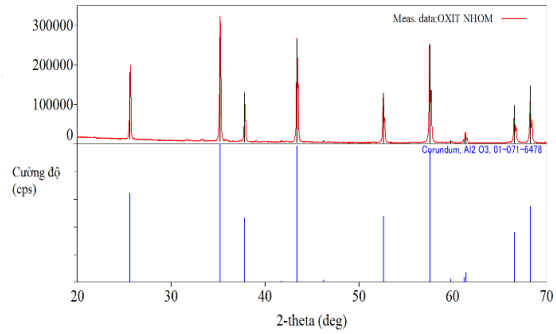
Phối liệu sau khi chuẩn bị được nghiền trộn trong máy nghiền bi trong 24 giờ để thành hồ đồng nhất. Hồ được đổ rót vào khuôn thạch cao và lưu khoảng 1-7 phút để đo chiều dày bám khuôn của mộc. Sau khi rót hồ thừa, mộc được lưu trong khuôn từ 25-30 phút để mẫu tự tách khỏi khuôn thạch cao, sau đó tháo khuôn và để mộc khô tự nhiên trong 24 giờ. Tiếp đó mộc được đem đi sấy trong lò sấy ở nhiệt độ 105ºC đến 110^{0}C trong 2 giờ, sau đó mẫu được đem nung ở nhiệt độ 1600^{0}C với tốc độ gia nhiệt 3^{0}C/phút và lưu 2 giờ [1, 5] trong lò nung SH-FU-4MS, Hàn Quốc. Sau khi hình thành gốm, mẫu được đem đi thử các tính chất như trọng lượng thể tích, trọng lượng riêng, độ xốp, độ hút nước và các đặc trưng như hình thái bề mặt gốm.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Xác định các đặc trưng của α-Al_2O_3

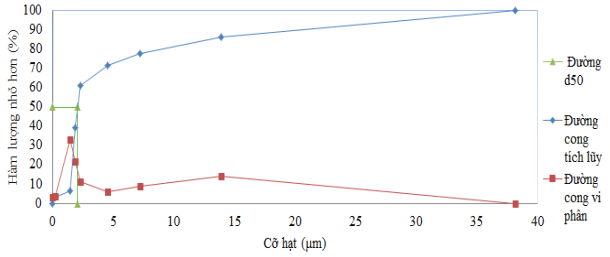
Phân tích thành phần hóa của α-Al_2O_3 hãng Kaifeng cho thấy, oxit nhôm có độ tinh khiết cao, hàm lượng Al_2O_3 là 98,69%, hàm lượng các oxit khác rất thấp, đặc biệt hàm lượng Na_2O chỉ chiếm 0,13%.

Phân tích thành phần khoáng của α-Al_2O_3 được thể hiện trên phổ đồ XRD trên Hình 2. Kết quả cho thấy, oxit nhôm tồn tại dưới dạng khoáng corundum α-Al_2O_3, các đường trong phổ đồ XRD rõ nét, đường nền tương đối phẳng, các peak cao rõ nét không có peak lạ chứng tỏ oxit nhôm có độ tinh khiết cao. Ở góc quét 2θ = 35,22º peak có cường độ cao nhất là 323453,32 (cps). Từ phổ đồ XRD có thể thấy, thành phần khoáng của oxit nhôm tương thích với phân tích thành phần hóa, oxit nhôm có độ tinh khiết cao (hàm lượng Al_2O_3 98,69%).



Hình 2. *Phổ đồ XRD của oxit nhôm Kaifeng (Trung Quốc)*

Thành phần kích thước hạt của α-Al_2O_3 được phân tích theo phương pháp Andreasen, dựa vào tốc độ lắng khác nhau của các hạt có kích thước khác nhau trong bình Andreasen. Đường cong tích lũy, đường cong vi phân và đường d_{50} thể hiện thành phần cỡ hạt của α-Al_2O_3 được biểu diễn trong đồ thị Hình 3.



Hình 3. *Đường cong thành phần cỡ hạt α-Al_2O_3*

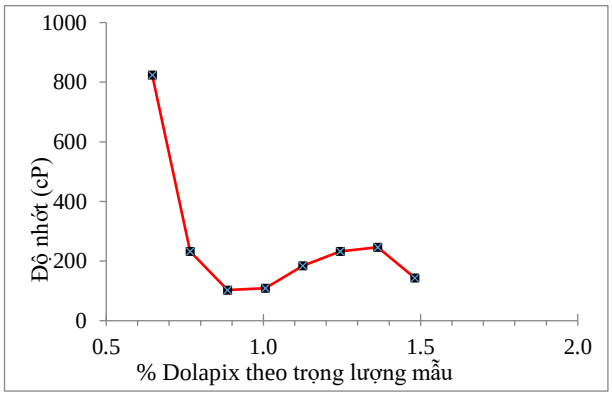
Từ kết quả trên có thể thấy, kích thước hạt trung bình của ôxit nhôm theo phương pháp Andreasen d_{50} = 2,07 μm. Độ mịn như trên bảo đảm ôxit nhôm phân tán tốt trong dung môi nước, giúp hồ ổn định (trong trường hợp tạo hình đổ rót) và gốm kết khối tốt trong quá trình nung.

3.2. Ảnh hưởng của phụ gia Dolapix PC21 đến độ nhớt của hồ gốm

Để thu được sản phẩm có độ sít đặc cao thì yêu cầu phải giảm tối đa lượng nước sử dụng mà vẫn đảm bảo được tính linh động của hồ, như vậy yêu cầu phải có chất đa điện giải để phân tán tốt các hạt α-Al_2O_3 trong môi trường ít nước. Để khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng chất đa điện giải đến độ nhớt của hồ oxit nhôm, nhóm tác giả sử dụng cấp phối như sau: Oxit nhôm 100 g, nước 25 g, phụ gia phân tán

Dolapix PC21 từ 0,7-1,4 g (hàm lượng pha rắn oxit nhôm chiếm 80% trọng lượng).

Sau khi phối trộn, mẫu được trộn trong hũ nghiền 24 h. Ngay sau đó hồ được đo độ nhớt bằng nhớt kế Brookfield DV-I PRIME với tốc độ quay 100 vòng/phút. Kết quả được thể hiện ở đồ thị Hình 4.

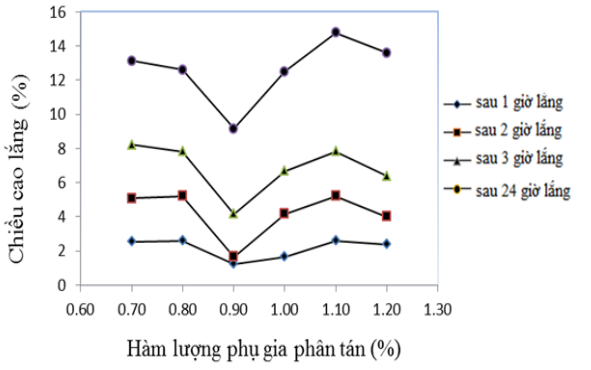


Hình 4. *Ảnh hưởng của Dolapix PC21 đến độ nhớt của hồ gốm oxit nhôm 80%*

Kết quả cho thấy, khi tăng hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 từ 0,7 lên 0,9% thì độ nhớt của hồ giảm nhanh (từ 824 cP xuống 103 cP); Hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 tăng từ 0,9 lên 1,0% thì độ nhớt hồ đạt ổn định (từ 103 cP đến 109 cP). Nếu tiếp tục tăng hàm lượng phụ gia phân tán của hồ >1,0% thì độ nhớt của hồ lại tăng lên. Như vậy, hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 tối ưu trong hồ là 0,9-1,0% trọng lượng pha rắn. Hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 tối ưu sẽ giúp hồ có hàm lượng pha rắn lớn nhưng có độ nhớt thấp nhất, giảm được lượng nước sử dụng mà vẫn đảm bảo độ linh động của hồ.

3.3. Ảnh hưởng của phụ gia Dolapix PC21 đến độ ổn định của hồ gốm

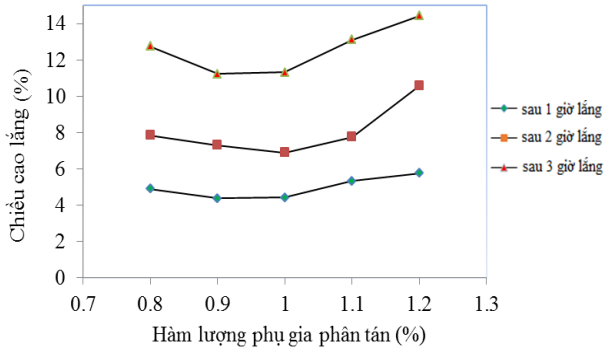
Độ ổn định của hồ cũng là một thông số quan trọng đối với tính chất của đổ rót, được đánh giá qua việc xác định khả năng lắng của hồ, cụ thể qua chiều cao lắng (là tỉ lệ phần trăm giữa chiều cao của lớp Al_2O_3 lắng xuống so với chiều cao của hồ ban đầu). Đối với hồ oxit nhôm có hàm lượng pha rắn là 30%, hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 từ 0,7÷1,2%, khảo sát sau 1 giờ, sau 2 giờ, sau 3 giờ và sau 24 giờ lắng, kết quả ảnh hưởng của phụ gia phân tán Dolapix PC21 đến chiều cao lắng của hồ được thể hiện trên đồ thị Hình 5.



Hình 5. *Ảnh hưởng của phụ gia phân tán đến chiều cao lắng của hồ có hàm lượng pha rắn là 30% oxit nhôm*

Kết quả thí nghiệm cho thấy, đối với hồ 30% oxit nhôm thì chiều cao lắng đạt giá trị thấp nhất khi hàm lượng Dolapix PC21 là 0,9%. Tuy nhiên, nếu thời gian lắng tăng lên thì chiều cao lắng cũng tăng lên tương ứng với cùng một hàm lượng phụ gia Dolapix PC21.

Đối với hồ oxit nhôm có hàm lượng pha rắn là 80%, hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 từ 0,8 đến 1,2%, khảo sát sau 1 giờ, sau 2 giờ và sau 3 giờ lắng, kết quả ảnh hưởng của phụ gia phân tán Dolapix PC21 đến chiều cao lắng của hồ được thể hiện trên đồ thị Hình 6.



Hình 6. *Ảnh hưởng của phụ gia phân tán đến chiều cao lắng của hồ có hàm lượng pha rắn là 80% oxit nhôm*

Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi hồ có hàm lượng pha rắn tăng lên (từ 30 lên 80%) thì chiều cao lắng cũng tăng lên (ví dụ, với khảo sát tại hàm lượng Dolapix PC21 0,9%, thời gian lắng 3 giờ thì chiều cao lắng tăng từ 4,17% lên 11,21 %). Nguyên nhân có thể do khi mật độ các hạt trong hồ cao sẽ hình thành nên cấu trúc mạng lưới, làm cho các hạt keo tụ lại gây lắng (flocculated network structure) [6]. Do đó, khi sử dụng hồ có hàm lượng pha rắn cao (để tạo ra mộc có độ sít đặc cao và gốm oxit nhôm có mật độ cao) thì việc đổ rót sẽ khó khăn hơn nhiều so với khi sử dụng hồ có hàm lượng pha rắn α-Al_2O_3 thấp.

Vậy kết hợp kết quả ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia phân tán Dolapix PC21 đến độ nhớt (Mục 3.2) và chiều cao lắng của hồ (Mục 3.3) thì hàm lượng phụ gia Dolapix PC21 tối ưu để chế tạo gốm oxit nhôm được chọn là 1%.

3.4. Ảnh hưởng của phụ gia kết dính HPMC đến độ lưu động, khả năng tách khuôn và sự tạo bọt khí trong quá trình tạo hình

Nhóm tác giả đã khảo sát các tính chất của hồ như độ lưu động, khả năng tách khuôn và sự tạo bọt khí khi hàm lượng phụ gia kết dính HPMC thay đổi từ 0,3 đến 1,5% trọng lượng. Kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. *Tính chất của hồ và mộc gốm oxit nhôm*

Cấp phối	**1**	**2**	**3**	**4**
Dolapix PC21(g)	1	1	1	1
α-Al_2O_3 (g)	100	100	100	100
Nước (g)	25	25	25	25
HPMC (g)	0,3	0,5	1,0	1,5
Glycerine (g)	0,5	0,5	0,5	0,5
Độ lưu động	dễ chảy	dễ chảy	dễ chảy	dễ chảy
Khả năng tách khuôn	khó	khó	dễ	dễ
Bọt khí	nhiều	nhiều	ít	ít

Như vậy, sau khi thí nghiệm với 4 bài cấp phối với hàm lượng HPMC từ 0,3 đến 1,5%, nhận thấy, khi hàm lượng HPMC thấp hơn 1% thì mộc có nhiều bọt khí, khó tách khuôn; Khi hàm lượng HPMC là 1,0% hoặc 1,5% thì hồ đạt yêu cầu: Dễ chảy, ít bọt khí và mộc dễ tách khuôn. Bài cấp phối với hàm lượng HPMC 1% được chọn là tối ưu để giảm lượng HPMC sử dụng. Lượng HPMC trong hồ không ảnh hưởng đến chất lượng gốm vì sẽ bị phân hủy trong quá trình nung ở nhiệt độ cao.

3.5. Khảo sát tốc độ bám khuôn và chiều dày mộc

Nhóm tác giả sử dụng cấp phối 3 để khảo sát tốc độ bám khuôn và chiều dày mộc. Thời gian lưu hồ trong khuôn trước khi rót hồ thừa ra ngoài dao động từ 1 đến 7 phút, chiều dày lớp mộc trong khuôn được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. *Khảo sát chiều dày lớp mộc trong khuôn*

Thời gian lưu (phút)	1	2	3	5	7
Chiều dày mộc (mm)	2,5	3,5	5,0	7,0	8,5

Dễ thấy tốc độ bám khuôn của hồ khá tốt, và chúng ta có thể lựa chọn thời gian lưu hồ phù hợp để có thể chế tạo được chén nung với các độ dày khác nhau. Tuy nhiên, so với cấp phối gốm truyền thống có sử dụng đất sét hay cao lanh thì khả năng tách khuôn của mộc gốm oxit nhôm vẫn khó khăn hơn nhiều.

3.6. Khảo sát tính chất cơ lý của gốm oxit nhôm

Nhóm tác giả lựa chọn mẫu cấp phối 3 là tối ưu để nung ở nhiệt độ 1600^{o}C. Tính chất cơ lý của gốm được thể hiện trên Bảng 3, hình ảnh chén nung được thể hiện trên Hình 6.

Bảng 3. *Tính chất của mẫu gốm cấp phối 3*

Độ hút nước H (%)	**Độ xốp biểu kiến X_{bk} (%)**	**Trọng lượng thể tích ρ_v (g/cm^3)**	**Trọng lượng riêng ρ_v(g/cm^3)**
0,32	1,67	3,40	3,70

Hình 6. *Chén nung từ gốm oxit nhôm*

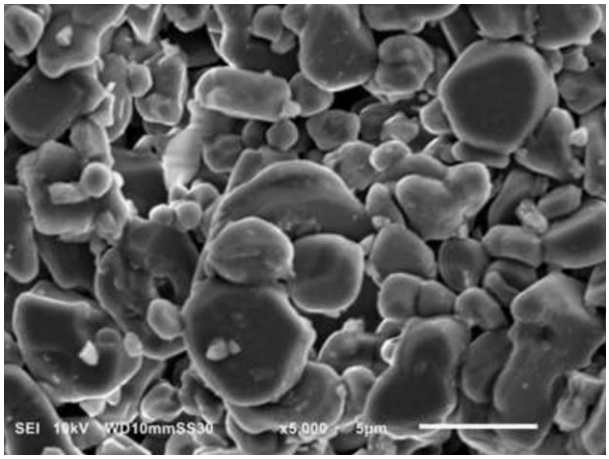
Trọng lượng riêng được xác định bằng phương pháp picnomet đạt giá trị 3,70 g/cm^3, phù hợp với thành phần cấp phối có 100% oxit nhôm.

Kết quả cho thấy, gốm có độ hút nước, độ xốp biểu kiến, trọng lượng thể tích tốt, điều này là do gốm được nung ở nhiệt độ đủ để kết khối tốt (1600^{o}C).

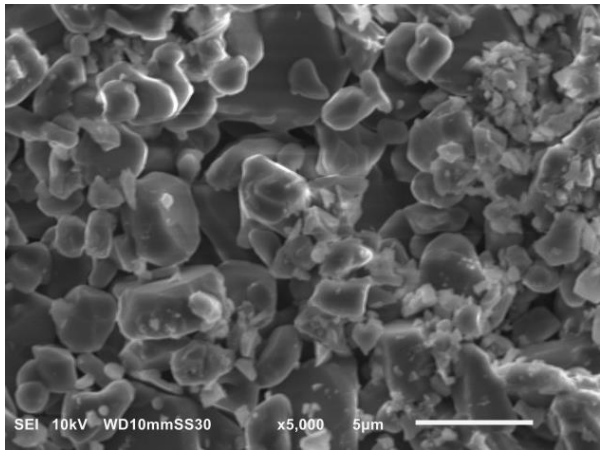
3.7. Xác định đặc trưng hình thái bề mặt của gốm oxit nhôm

Hình thái bề mặt của gốm oxit nhôm được nghiên cứu nhờ kính hiển vi điện tử quét JSM-6010PLUS/LV tại khoa Hóa, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng. Trên Hình 7 có thể thấy rõ các hạt gốm kích thước trung bình dưới 2,5 µm.

Nhóm tác giả cũng đã thực hiện thí nghiệm để bước đầu xác định mức độ chịu ăn mòn của gốm đối với kim loại lỏng nóng chảy. Hai mảnh gốm oxit nhôm phẳng kẹp giữa một tấm nhôm kim loại và đốt nóng đến nhiệt độ 700^{o}C, trong 2 giờ để kim loại nóng chảy. Sau đó mẫu được làm nguội và tách riêng mảnh gốm phẳng. Hình 8 thể hiện ảnh SEM chụp bề mặt mẫu gốm nung sau khi bị nhôm lỏng nóng chảy tác dụng trong 2 giờ.



Hình 7. *Ảnh SEM thể hiện hình thái bề mặt của mẫu gốm oxit nhôm với độ phóng đại 5000 lần*



Hình 8. *Ảnh SEM thể hiện hình thái bề mặt của mẫu gốm sau khi bị nhôm lỏng nóng chảy tác dụng trong 2 giờ (độ phóng đại 5000 lần)*

Trên Hình 8, ngoài các hạt oxit nhôm có thể nhìn thấy rõ các cấu trúc nhỏ hơn, đây có thể là nhôm kim loại còn lại sau khi nóng chảy ra và lấp vào lỗ trống trên mẫu gốm. Nhìn trực quan trên bề mặt mẫu, không nhìn thấy hiện tượng gốm oxit nhôm bị nhôm kim loại nóng chảy ăn mòn.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã cho kết quả khả quan, đã tìm ra cấp phối cho bài phối liệu chế tạo gốm oxit nhôm để làm chén nung,

chén nấu nhôm kim loại lỏng nóng chảy với nguyên liệu chính là α-Al_2O_3 và các loại phụ gia phân tán (Dolapix PC21), phụ gia hóa dẻo (glycerine), phụ gia kết dính (HPMC). Phụ gia phân tán đã cho thấy rất hiệu quả để làm giảm lượng nước sử dụng, giảm độ nhớt và tăng độ ổn định cho hồ, giúp mộc sít đặc hơn. Đặc biệt, phụ gia kết dính HPMC ảnh hưởng tốt đến độ lưu động, khả năng tách khuôn và chống tạo bọt khí trong quá trình tạo hình khi sử dụng với hàm lượng phù hợp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Viện công nghệ xạ hiếm, *Nghiên cứu quy trình công nghệ chế tạo vật liệu gốm hệ corundum*, Đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ, Hà Nội 2003.

[2] Nguyễn Văn Dũng, Võ Kỳ Anh, "Nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia phân tán đến tính chất của hồ cao lanh", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 2(45), 2015, trang 25-29.

[3] Jean Marie Haussonne, Claude Carry, Paul Bowen, James Barton, *Céramiques et verres: Principes et techniques d'élaboration*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Laussane, 2005.

[4] Athena Tsetsekou, Christos Agrafiotis, Aggelos Milias, "Optimization of the rheological properties of alumina slurries for ceramic processing applications. Part I: Slip-casting", *Journal of the European Ceramic Society*, 21 (2001) 363-373.

[5] Chandradass J., Ki Hyeon Kim et al., "Starch consolidation of alumina: Fabrication and mechanical properties", *Journal of the European Ceramic Society*, (2009), doi10.1016/jeurceramsoc.2009.02.001.

[6] Athena Tsetsekou, Christos Agraotis, Aggelos Milias, "Optimization of the rheological properties of alumina slurries for ceramic processing applications", *Mechanics and Materials*, Vol. 79, 2011, pp 177-181.

(BBT nhận bài: 11/6/2020, hoàn tất thủ tục phản biện: 25/9/2020)